НАУКИ О ЗЕМЛЕ (25.00.00)

УДК 550.8.028 СМЕШАННЫЕ СИЛЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА АКТИВНОСТЬ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ВДОЛЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СКЛОНОВ

Лютоев В.А., Лютоева Н.В.

ФГБУН «Институт геологии» Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар, e-mail: VALutoev@geo.komisc.ru

На основе комплекса геофизических и инженерно-геологических методов выяснены условия формирования оползневых тел на определенных участках склонов, примыкающих к железнодорожному полотну. Для этого были выполнены топографические работы, электроразведочные измерения, проведена вибропенетрация отобранных грунтов, осуществлен вибродинамический мониторинг природно-техногенной среды. В результате обработки полученного полевого материала были определены инженерно-геологические свойства склонов, включающие в себя геометрические параметры и физико-механические свойства слагающих грунтов, определяющие их устойчивость к вибрациям в лабораторных и естественных условиях. В основе исследований – вибродинамический метод, позволяющий проследить вибродинамические нагрузки на склоны при движении поезда с последующим описанием вибродинамических процессов для каждого интересующего нас отрезка времени. Обобщение результатов показало, что наибольшее влияние на развитие оползневых процессов оказали вибрации, исходящие при движении поезда, а именно хвостовой его части, после прохождения поворота. В этот момент происходит снижение уровня положительной дилатансии на фоне одновременного снижения предельных значений отрицательной дилатансии в пределах распространения фронта прямой сейсмической волны. Это приводит к снижению первоначальной величины угла откоса для песчаных грунтов и снижению сопротивления сдвиговой составляющей для глинистых грунтов. Таким образом, структурно измененные грунты вблизи железной дороги заметно отличаются снижением уровня несущей способности от 1,5 до 2,0 раз относительно грунтов, измененных под воздействием вибраций автомобильного транспорта и городского шума.

Ключевые слова: железнодорожное полотно, оползень, топография, электроразведка, вибропенетрация, дилатансия, вибродинамическая съемка

MIXED FORCES AFFECTING THE ACTIVITY OF LANDSLIDE PROCESSES ALONG THE RAILWAY SLOPES

Lutoev V.A., Lutoeva N.V.

Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, e-mail: VALutoev@geo.komisc.ru

On the basis of geophysical and geotechnical methods clarified the conditions of formation of landslide bodies on certain parts of the slopes adjacent to the rail track. This was made for topographic, electrical measurements of the selected soils vibropresarea implemented the dynamic vibration monitoring of natural and man-made environment. As a result of processing the received GPR data were determined geotechnical properties of slopes, including the geometrical parameters and physico-mechanical properties of soils composing, determining their resistance to vibration in laboratory and natural conditions. At the core of the studies used dynamic vibration method, which allows tracing the dynamic vibration load on the slopes during the train motion with the subsequent description of vibrodynamic processes of interest to us for each period of time. Synthesis results showed that the greatest influence on the development of landslide processes has had a vibration arising at movement of a train, namely the tail part after turning. At this point there is a decrease in the level of positive dilatancy on the background of simultaneous decrease of the limit values of the negative dilatancy within the direct propagation of seismic waves. This leads to lower initial values of angle of repose for sandy soils and decrease the shear resistance component of clay soils. Thus, structurally altered soils near the railroads differ markedly reducing the carrying capacity from 1.5 up to 2.0 times with respect to soils that have been modified under the effect of vibration of road transport and noise of the city.

Keywords: railroad tracks, landslide, topography, survey, vibrometrypenetraciy, dilatancy, dynamic vibration shooting

В распоряжении Правительства РФ от 17.06.2008 г. № 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года» планируется повысить пропускную способность железных дорог северо-запада России: Хальмер-Ю – Усть-Кара, Сыктывкар – Пермь [4]. Естественно, увеличение количества составов приведет к повышению вибродинамических нагрузок на пути, насыпи и склоновые участки. Статистика указывает, что около 7% от всей протяженности железных дорог имеет различные дефекты, возникшие по разным причинам [1]. Одним из негативных факторов являются вибрации, возникающие при движении поездов, которые инициируют на «слабых участках» железных дорог оползни, сплывы, просадки и др. Таким образом, весьма актуальным становится вопрос изученности динамики развития оползней вблизи железных дорог, исходя из утверждения, что вибрации определенной

интенсивности и продолжительности ведут к снижению несущих свойств грунтов [2, 5].

Целью наших исследований являлось выполнение экспериментальных работ, для изучения влияния вибраций, вызванных движением поезда и осложненных действиями сил склоновой гравитации в несвязных и связных грунтах.

Методы исследований основывались на комплексном подходе, затрагивающем различные аспекты решения проблемы в рамках параметрической модели диагностики развития оползней.

Основная часть

В полевой сезон 2015 г. в девяти километрах к северу от железнодорожной станции «Сыктывкар» с правой стороны относительно движения поезда из города в 15 м от железной дороги был обнаружен участок, имеющий на склонах оползневые тела четвертичных отложений. Здесь же, но уже напротив – с левой стороны склона, на удалении 17 м от железной дороги в подпочвенном слое выявлена трещина длиной более 20 м, шириной 0,1 м, глубиной до 0,7 м. Для исследований оползневых процессов был применен комплекс работ, в котором использовались следующая аппаратура и оборудование:

1) топографические – оконтуривание оползневых тел, определение угла уклона, и разности высот относительно основания насыпи и верхней точки склона (рейка нивелирная VEGA TS3M, лазерный нивелир RGK LP-106, лазерный дальномер ADA ROBOT 80, навигатор GPSmap 62s);

2) электроразведочные – определение геоэлектрического разреза для выяснения геоэлектрических параметров пород с последующей привязкой их к литологии разреза (электроразведочная станция «Электротест-C/USB» с разносами токовых электродов AB от 2 до 270 м);

3) инженерно-геологические – отбор керна на глубинах с последующими их испытаниями (вибропенетрационный комплекс, состоящий из вибратора АЯЦМ 250 Вт, блока задания частоты колебаний ГРИВ.426449.001 с шагом ускорения 0,001 до 0,1 g, электронных часов ИЧЦ с точностью измерений 1·10⁻⁵ м);

4) вибродинамические работы – определение динамической анизотропии грунтов, записи фонового уровня вибраций и вибраций, вызванных движением поезда (трехкомпонентная сейсмическая станция Zet 048-с с частотным диапазоном от 0,3 до 400 Гц).

Все эти методы были объединены в два самостоятельных раздела: инженерно-геологическая съемка и вибродинамическая съемка.

Инженерно-геологические работы представляли собой следующий комплекс исследований: топографические, инженерногеологические, электроразведочные (замена бурения), вибропенетрационные.

В результате топографической съемки определены первичные признаки оползневых процессов: наличие трещин вдоль бровки, присутствие оползневых выемок ниже бровки и оползневых уступов, а также валов ближе к подножию склона. Выяснены классификационные признаки оползней [3]: по отношению к склону - на склоне и с захватом подошвы склона; форма в плане – полуциркульная; характер поверхности – ровный; глубина захвата – от поверностного до мелкого; число поверхностей скольжения – два; происхождение поверхности скольжения оплывины, верхняя поверхность скольжения и срезающе-консеквентное вторая, нижняя поверхность скольжения; крутизна поверхности скольжения - пологая; типы оползающих пород - пески по глинам; характер двигающихся масс – массивные пакеты; искусственное изменение профиля склона – подрезка; смешанные источники сил, двигающих породы, - вес породы и сотрясения; внутреннее изменение в породах, уменьшающее их устойчивость - размягчение; характер и форма увлажнения - по слоистости; тип оползания – деляпсивный. Были построены четыре профиля, три из которых пересекают оползневые тела. В таблице (табл. 1) даны основные параметры склона: относительная высота от бровки до уреза, длина участка склона, угол уклона; также даны основные параметры оползней: объем оползневого тела, угол скольжения оползня, толщина оползневого тела.

Из таблицы видно, что все оползневые тела по размерам относятся к мелким, наиболее крупное из них находится на линии профиля 2. Здесь была сделана расчистка склона и отобраны пробы для вибропенетрации из слоев: почвенно-растительный (0–0,15) м; супесь (0,15–0,35) м; песок крупный (0,35–0,8) м; глина (0,8– 1,5) м; песок мелкий, средней степени водонасыщения (1,5–2,9) м. Эти грунтовые данные были использованы для привязки к геоэлектрическому разрезу. Ошибка геоэлектрической модели разреза по замеренным кривым КС составила менее 1%. Поэтому геоэлектрический разрез

146

НАУКИ О ЗЕМЛЕ (25.00.00)

вполне может соответствовать геологическому разрезу до глубины – 10,0 м, что достаточно для изучения оползней с мелкой глубиной захвата. Левая сторона склона нами не исследовалась проводилась только электроразведка, которая выявила идентичность геоэлектрических разрезов правой и левой стороны. Однако с целью мониторинга за ее дальнейшими подвижками с каждой стороны трещины были вбиты колышки-маркеры на расстоянии один метр. Исходя из топографических данных и геоэлектрического разреза была построена модель развития оползня левой и правой стороны склона (рис. 1).

Далее отобранные грунты с «ненарушенными» структурными связями (не нарушены кернотборником, но нарушены вибрациями поездов) были подвержены вибродинамическому нагружению с целью определения количественного характера уплотнения с фиксацией критических ускорений перехода от положительной к отрицательной дилатансии. Мелкие пески начинают уплотняться с ускорения 0,162 м/с², по мере увеличения вибродинамической нагрузки уплотнение происходит в несколько стадий: 0,254; 0,278; 0,469 м/с². Критическая величина – 0,516 м/с², при дальнейшем росте ускорения - до величины 0,561 м/с² – грунты полностью разрыхляются. Крупные пески имеют несколько большую величину начальной стадии уплотнения – 0,469 м/с², однако процесс отрицательной дилатансии начинается с той же величины, что и для мелкозернистых песков – 0,516 м/с². Для образца смешанного типа, имеющего акустическую пограничную зону между пластичными и зернистыми грунтами, процесс отрицательной дилатансии песка начинается при значении 0,469 м/с². Из этих испытаний следует, что зернистые грунты, залегающие вдоль железной дороги, проходят следующие стадии динамического отклика: слабое уплотнение, уплотнение с разрушением связей, разрыхление – со значений 0,516–0,561 м/с². В таблице (табл. 2) приведено сравнение предельных ускорений устойчивости грунтов, отобранных вблизи железнодорожной дороги и отобранных с территории г. Сыктывкара. Их различие свидетельствует о том, что вибрация, вызванная движением поездов, имеет более существенное влияние, снижая одновременно предельные значения ускорений как в положительной, так и в отрицательной области дилатансии в 1,5–2,0 (36–55%) раза.

Таблица 1

Номер про- филя	Характе	Характеристика оползня				
	Δ <i>H</i> , м	Δ <i>S</i> , м	α° _{скл}	<i>V</i> , м ³	α°₀	Δh , м
1	5,40	27,1	15°49′	9,252	26	0,8
2	4,87	26,4	15°22′	85,72	36	1,2
3	4,43	24,5	13°17′	12,6	20	0,7
4	4,26	25,6	12°24′	—	—	_

Результаты топографической съемки оползневых процессов

Обозначения: ΔH – относительная высота участка склона, м; ΔS – длина участка склона, м; α_{cKI} – трендовый угол уклона склона, град; V – объем оползневого тела, м³; α_{o} – трендовый угол зеркала скольжения, град; Δh – толщина оползневого тела, м.



Рис. 1. Модель развития оползней на правом и левом склонах относительно железнодорожного полотна: 1 – несвязные грунты, 2 – связные грунты, 3 – поверхности скольжения

Таблица 2

<u>№</u> п/п		Железнодорожное полотно			Городская территория			
	Грунты	<i>а</i> ₀ , м/с ²	<i>а</i> _{max} , м/с ²	<i>S</i> , м	<i>a</i> ₀ , м/с ²	$a_{\rm max}$, м/с ²	<i>S</i> , м	%
1	Песок крупнозернистый (маловлажный)	0,278	0,561	0,48.10-3	0,162	1,236	0,48.10-3	55
2	Глина-песок (переходная зона)	0,230	0,516	0,27.10-3	0,230	0,819	0,75.10-3	36
3	Песок мелкий (влажный)	0,230	0,561	0,37.10-3	0,230	1,236	0,56.10-3	55

Сравнение предельных ускорений устойчивости грунтов вдоль железнодорожного полотна и городской территории

П р и м е ч а н и я : a_0 – минимальное ускорение начала уплотнения грунтов; a_{\max} – максимальное ускорение при уплотнении грунтов с последующим разрыхлением; *S*, м – максимальная величина уплотнения; % – процентное соотношение ослабления грунтов вдоль ЖД относительно территории города.

Вибродинамические исследования выполнялись в два этапа:

На первом этапе определена динамическая анизотропия грунтов с помощью падающего груза массой 16 кг с высоты 1,07 м, создающего энергию удара 168 Дж (10 повторов). В результате удара со стороны ЖД (Ю-З) на удалении 15 м почвенный слой от точки возбуждения сдвигается с пиковой амплитудой ускорения – 0,000606 м/с². Перпендикулярно ему с С-З стороны, при той же энергии удара – с амплитудой 0,001018 м/с². Проверочное измерение в обратном направлении, со стороны Ю-В, показало величину – 0,001008 м/с², откуда следует, что относительная ошибка ударного воздействия составляет 0,98%. Таким образом, угол подхода прямой волны, образующийся в условиях минимальной величины декремента затухания относительно направления движения поезда – равен 0° ($Az = 120^{\circ}$). Наибольшее сопротивление среды ожидается под углом 90° ($Az = 30^{\circ}$), перпендикулярно к направлению движения поезда. При этом передаваемая через грунт вибрация зависит от условий местности, при которых происходит усиление или ослабление амплитуды прямой волны:

1) прямая волна, идущая от ЖД в сторону склона, испытывает эффект влияния топографического фактора, где в верхней точке усиливается амплитуда сигнала. С другой стороны, слой песка, имеющий высокий акустический импеданс, снижает ее;

2) прямая волна, идущая с Ю-В, быстрее распространяется по глинам и влажным пескам с более низким импедансом, максимально сохраняя при этом свою первоначальную амплитуду волны;

 изменение сигналов в точке приема на данных расстояниях близко к закону линейного убывания.

На втором этапе определены уровни вибродинамических воздействий от движения поезда, состоящего из тепловоза 2ТЭ10М (138 тонн) и семи вагонов (1 вагон – 60 тонн) на склоне. Очевидно, что длина и скорость поезда определяют силу и время воздействия колебаний. Исходя из длины состава – 192 м (семь вагонов – 175 м, тепловоз – 17 м) и времени их прохождения мимо акселерометра (т.н.) – 20 с, вычисляем скорость движения поезда – 9,6 м/с (34,6 км/ч). Непрерывные записи двухмерных спектров Фурье (рис. 2, а) позволяют проследить характер изменения уровня вибраций относительно т.н. Извлекая одномерные спектры в выбранный момент времени (рис. 2, б), начиная от минимальных – фоновых значений – до максимальных, а далее опять до фоновых, мы получим новые функциональные зависимости, отвечающие значениям среднеквадратичных ускорений движения почвы с соответствующими частотами колебаний (рис. 2, в).

Общее время измерения с учетом записи фоновых замеров составило – 92 с, за это время состав прошел расстояние 883 м. Проведем полный анализ динамики смещения почвы по компонентам на всем этом пути. Начало записи соответствует промежутку времени 5-30 с, по Z компоненте фиксируются кратные волны Рэлея, по Хи У волны Лява. Далее, на отрезке времени 30-40 с, амплитудный уровень волн расхождения постепенно начинает преобладать над амплитудами кратных волн, достигая среднеквадратичного максимума (пиковое) на 44 c: $a_{\rm c}$ cp.кв = 0,000462 (0,000661) м/c². Это происходит в момент прохождения тепловоза в ближайшей к акселерометру точке, по компоненте Х, отмечается также увеличение амплитудного уровня до $a_{\rm c}$ ср.кв = 0,000522 м/с²; на компоненте *Y*

,



Рис. 2. Динамика изменения амплитуды и частоты колебания грунтов в момент движения поезда: а – спектр 2D; б – спектр 1D; в – вибродиаграмма движения поезда при 35 км/ч; f_x f_y f_z – преобладающие частоты (в Гц) по составляющим X, Y, Z; а_y, a_y, a_z – среднеквадратичные амплитуды ускорений (в м/с²) по составляющим X, Y, Z

отмечается кратковременное снижение амплитуды сигнала с $a_{\rm c}$ ср.кв = 0,000385 м/с² до $a_{\rm v}$ ср.кв = 0,000371 м/с², что связано с ориентировкой акселерометра. По компонентам Х и У амплитуды несколько смещены ввиду динамической анизотропии амплитудного вектора давления. Далее, по мере отхода тепловоза от т.н. до момента времени 50 с, амплитудный уровень по Z компоненте снижается до величины $a_{\rm cp.\kappa B} = 0,000370 \text{ м/c}^2$. Что касается Х и У компонент, то на них отражается воздействие колебаний от вагонов, имеющих горизонтальные движения раскачки, возникающие от импульса поворота с радиусом кривизны 800 м (за 300 м до подхода вагонов поезда до т.н.), что соответствует времени 10 с на вибродиаграмме движения поезда (рис. 2, в). Таким образом, инициирующая энергия колебаний почвы при круговом равномерном движении разбивается на две составляющие, исходящие от воздействий касательной и нормальной сил. В первом случае энергия движения совпадает с продольной раскачкой вагонов, что мало влияет на колебания почвы, т.к. касательное ускорение равно нулю при постоянстве скорости. Во втором - центростремительное ускорение величиной 0,115 м/с² вызывает силу, направленную к центру радиуса движения. Поэтому, когда поезд начинает выходить из кругового движения, эта сила дает раскачку на боковые перемещения, которые ярко выражены на диаграмме Х компоненты более низкими частотами 18-20 Гц на фоне 30 Гц по Y и 35 Гц по Z

компоненте. В этих условиях критический максимум амплитуды ускорения почвы $a_{\rm c}$ ср.кв = 0,000812 (0,001161) м/с² отмечается на У компоненте в момент времени 55 с от начала записи, где воздействие тепловоза уже снижается. Горизонтальные перемещения хвостовой части поезда на компоненте У отмечаются меньшей амплитудой ускорения ввиду ориентировки акселерометра под углом 90° к источнику возбуждения. Такой момент регистрации уровня вибраций наступает, когда тепловоз находится на удалении 142 м (5-6 вагоны) от места начала регистрации. Далее, на 60 секунде, на компоненте Х отмечается максимальная амплитуда ускорения $a_{\rm cp.KB} = 0,000903 (0,001291) \,{\rm m/c^2}, a$ именно в момент прохождения хвоста поезда на минимальном расстоянии от пункта наблюдения. В это время подстилающие грунты в пункте наблюдения в районе развития оползней подвержены максимальной энергии сдвига и кручения от вибродинамического воздействия.

Заключение

Развитие оползневых процессов на данном участке обусловлено природнотехногенными факторами, состоящими из внутренних сил напряжения склона и внешнего воздействия вибродинамического поля, исходящего в основном от движения поезда по дуге. Кроме того, при пропитке грунтов водой увеличиваются силы гравитации. В результате этих смешанных сил происходят существенные изменения несущих свойств грунтов, лежащих вблизи путей, которые в итоге проявляют себя снижением уровня положительной дилатансии на фоне одновременного снижения предельных значений отрицательной дилатансии, снижением угла откоса для песков и снижением сопротивления по сдвигу для глин.

Ввиду того, что амплитуда ускорения смещения почвы в зоне затухания прямых волн, исходящих от движения поездов, больше (на 20–30%), чем от автомобильного транспорта, а продолжительность вибрации превышает в десятки раз, то процесс восстановления структурных связей в этих грунтах более затруднителен. Поэтому грунты вблизи железных дорог отличаются снижением степени устойчивости к внешнему вибродинамическому воздействию в 1,5–2 раза по сравнению с грунтами, подвергающимися воздействию движения автомобилей и городского шума.

С точки зрения возможности возникновения чрезвычайных ситуаций от оползневых процессов на данном участке железной дороги, по нашему мнению, их следует ожидать не с правой, а с левой стороны полотна по отношению к движению поезда от станции «Сыктывкар». Здесь, согласно нашей модели, в будущем возможны грунтовые подвижки более глубокого генезиса с включением нижних горизонтов – пластичных суглинков, с потенциалом, во много раз превышающим потенциал оползней правой стороны.

Список литературы

1. Востриков К.В. Устойчивость земляного полотна железных дорог, упроченного инъекциями грунтоцементного раствора, с учетом динамического воздействия поездной нагрузки: диссертация на соискание канд. техн. наук. – Новосибирск, 2014. – С. 4–5.

2. Лютоев В.А., Лютоева Н.В. Сейсмоустойчивость грунтов северной части Волго-Уральской антеклизы // Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России: материалы XIV Геологического съезда Республики Коми. – Сыктывкар, 2004. – Т. 2. – С. 29–31.

 Попов И.В. Инженерная геология. – М.: МГУ, 1959. – 505 с.

4. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Минтранс РФ. Утверждена распоряжением правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-Р. www.mintrans.ru.

5. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации / Е.К. Борисов, С.Г. Алимов, А.Г. Усов и др. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 128 с.

150