

# Использование коэффициента уязвимости при изучении вибросигналов на поверхности грунтов от движения электропоездов метрополитена

*А. Н. Сенин, Т. Е. Сенина, 2021*

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения  
Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Поступила 26 марта 2021 г.

Микросейсмические колебания верхней части грунтовой толщи происходят непрерывно под воздействием эндогенных и экзогенных процессов как естественного, так и искусственного происхождения. Микроколебания техногенной природы в особенности характерны для городских плотно застроенных территорий. Практика мониторинговых сейсмологических наблюдений показывает, что в таких условиях можно наблюдать различные типы микросейсмических колебаний, в том числе упругие вибросигналы в частотном диапазоне 1—100 Гц, генерируемые проходящими метropоездами. В расчетах сейсмической устойчивости проектируемых сооружений уделяется особое внимание резонансным характеристикам верхней части грунтовой толщи, которая на определенных частотах может существенно усиливать сейсмические колебания, например, от внешних вибровоздействий. Традиционными методами получение характеристик резонансных колебаний и их учет осуществляются, как правило, с недостаточной степенью достоверности и полноты, в результате чего они используются обычно как вспомогательные.

В настоящей работе рассматривается методический комплекс с применением современных способов измерения и обработки микросейсмических сигналов с целью выделения на исследуемой территории под строительство участков с максимальными амплитудами отклика на внешние упругие воздействия и учета их в дальнейшем при проектировании и строительстве. Изучение вибросейсмических шумов, формируемых на поверхности грунтовой толщи, например, проходящими поездами метрополитена, позволяет оценить амплитудно-частотные свойства этих грунтов, причем спектральное отношение горизонтальных смещений грунтов к вертикальным  $H/V$  и производная этих отношений — коэффициент уязвимости  $K_y$  — обеспечивают уверенное выделение ослабленных зон, подверженных наибольшему воздействию внешних упругих колебаний.

**Ключевые слова:** вибросейсмический сигнал, спектральный анализ, регистратор сейсмических сигналов, коэффициент уязвимости, спектральные отношения.

**Введение.** Микросейсмические колебания в верхней части грунтовой толщи происходят постоянно под воздействием экзогенных и эндогенных процессов как естественного, так и искусственного происхождения. Техногенные микроколебания особенно характерны для городских плотно застроенных территорий. Практика мониторинговых сейсмологических наблюдений

показывает, что в таких условиях можно наблюдать различные типы микросейсмических колебаний: квазигармонические пульсирующие сигналы в частотном диапазоне 0,1—20 Гц, импульсные сигналы (карьерные взрывы, землетрясения) в полосе частот 0,01—20 Гц случайные шумовые сигналы частотой до 100 Гц, и, наконец, предмет наших исследований, вибросигналы раз-

личной природы, в частности, формируемые в результате движения поездов метрополитена в частотном диапазоне 1—100 Гц. При строительстве зданий и сооружений в городской черте всегда следует учитывать отмеченные факторы, особенно если строительство предусматривается над тоннелями метрополитена. При этом в расчетах сейсмической устойчивости проектируемого сооружения следует уделять внимание резонансным характеристикам верхней части грунтовой толщи, которая на определенных частотах может существенно усиливать сейсмические колебания, например от внешних вибровоздействий. Традиционными методами получение характеристик резонансных колебаний и их учет осуществляются, как правило, с недостаточной степенью достоверности и полноты, в результате чего они используются обычно как вспомогательные. В настоящей статье рассматривается методический комплекс с применением современных способов измерения и обработки микросейсмических сигналов с целью выделения на исследуемой территории под строительство участков с максимальными амплитудами отклика на внешние упругие воздействия. Исследования носят прикладной характер. Методика отлаживалась на участке, расположенном в центральной части г. Екатеринбурга, под которым пролегал тоннель линии метрополитена.

**Характеристика объекта исследований.** Для изучения вибросигналов от поездов метро на поверхности был выбран участок, под которым пролегает ветка мет-

рополитена. Участок расположен на берегу городского пруда в Верх-Исетском районе г. Екатеринбурга в границах улиц Боевых Дружин — Набережной Рабочей Молодежи — Октябрьской площади. Рельеф площадки исследований спланирован на сыпных грунтах, абсолютные отметки поверхности изменяются в пределах 245—248 м с общим уклоном на северо-восток. Геология участка — сильно выветрелые, трещиноватые порфириды и сланцы. Коренные породы разрушены в верхней части до состояния крупнообломочного и глинистого элювия, а сверху, как отмечалось, перекрыты насыпными грунтами.

Поскольку участок исследований расположен на территории г. Екатеринбурга, исходная сейсмичность его определена картами общего сейсмического районирования (ОСР) Российской Федерации [Комплект ..., 2015] и не превышает 6 баллов по шкале МСК-64. Внешний вид участка показан на рис. 1.

Контур площадки вынесены на фрагмент спутниковой карты GoogleEarth, а координаты угловых точек представлены в табл. 1. Все точки наблюдения имеют GPS привязку и обозначены на рисунке двузначным числом, первое из которых — номер профиля, второе — номер пикета. Красная стрелка обозначает положение и направление тоннеля метро под площадкой исследований.

**Аппаратно-программный комплекс и методика полевых измерений.** Основным измерительным прибором при проведении настоящих исследований был регистратор

**Т а б л и ц а 1 . Координаты угловых точек контура площадки исследований**

Номер точки	Широта	Долгота
A	N56° 50' 31,9"	E60° 35' 50,9"
B	N56° 50' 30,7"	E60° 35' 53,7"
C	N56° 50' 29,5"	E60° 35' 52,1"
D	N56° 50' 31,1"	E60° 35' 48,9"

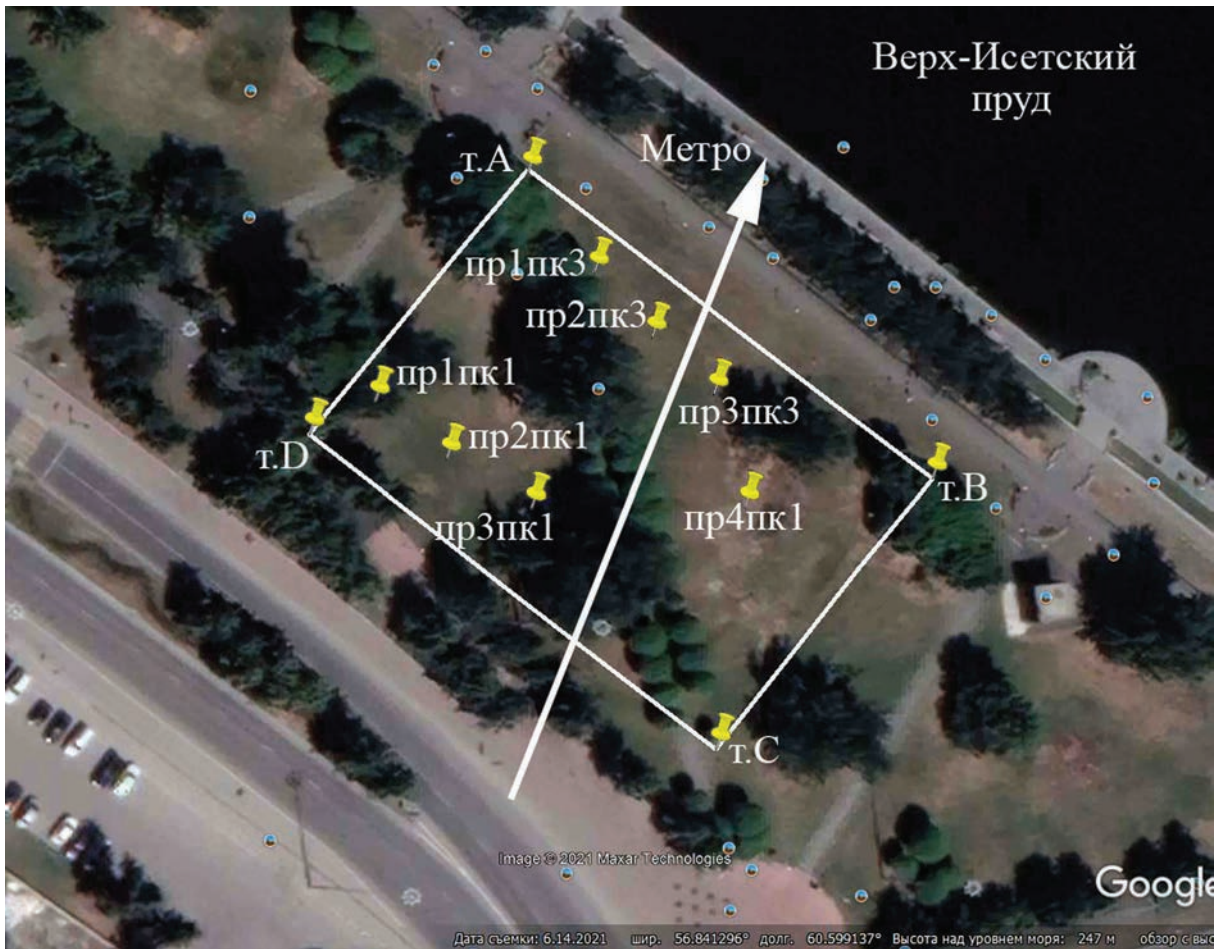


Рис. 1. Контуры площадки исследований с вынесенными на нее точками наблюдения в координатах системы Google.

Fig. 1. The contours of the research site with the observation points placed on it in the coordinates of the Google system.

сейсмических сигналов (РСС) «Регистр» [Сенин, Сенина, 2005], который представляет собой аппаратную составляющую одноименного аппаратно-программного комплекса [Сенин и др., 2017]. Прибор является автономным сейсморегистрирующим устройством и имеет технические характеристики, представленные в табл. 2.

На рис. 2 показан внешний вид установленного в точке наблюдения регистратора «Регистр» в развернутом виде. Прибор укомплектован гелевым аккумулятором с напряжением 12 В и емкостью 7 А·ч и 3-компонентным велосиметром на базе электродинамических датчиков GS-One (Vertical), GS-One (Horizontal) [Geospace ..., 2021].

Программная часть комплекса «Регистр» включает в себя блоки: загрузки исходных данных в системную память РСС; считывания информации с флэш-диска регистратора; предварительной обработки сейсмограмм [Сенина, Воскресенский, 2016]; расчета амплитудно-частотных спектров и спектров отношений результирующей горизонтальной компоненты сейсмического сигнала к вертикальной  $H/V$ ; расчета коэффициента уязвимости  $K_y$  для каждой точки наблюдения исследуемой площадки [Сенина и др., 2017].

Собственно полевые наблюдения осуществлялись по следующей методике. В точки, отмеченные на площадке исследований

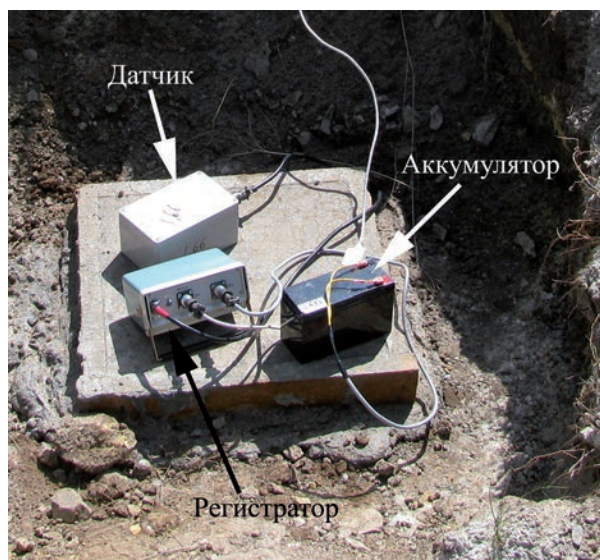


Рис. 2. Внешний вид сейсморегистрирующего комплекса «Регистр», установленного в точке наблюдения.

Fig. 2. External view of the seismic recording complex «Register», installed at the observation point.

(см. рис. 1), расставляли сейсмические датчики и регистраторы. Приборы включали на 20—30 мин записи, после чего файл счи-

тывался на компьютер для дальнейшей обработки. В работе использовались три комплекта регистраторов «Регистр». Частотный диапазон, в котором осуществлялась запись микросейсмических сигналов, был ограничен 64 Гц. Усиление для всех точек наблюдения имело значение 16.

**Обработка и интерпретация вибро-сейсмических сигналов.** Прежде остановимся на понятии «коэффициент уязвимости» ( $K_y$ ). Это понятие было введено известным японским исследователем И. Накамурой в 1997 г. [Nakamura, 1997]. В 1989 г. им была предложена методика, в основе которой лежат представления о том, что влияние «тонкого слоя», расположенного непосредственно под сейсмическим датчиком на изучаемом объекте, в большей степени способствует усилению поперечной волны ( $S$ ) и практически не изменяет продольную волну ( $P$ ) [Nakamura, 1989]. Исходя из этого положения, отношение спектральных характеристик горизонтальных компонент  $X$  и  $Y$  к спектру вертикальной компоненты  $Z$  будет характеризовать так называемую передаточную функцию, зависящую от «тон-

Т а б л и ц а 2 . Технические характеристики РСС «Регистр»

Число сейсмических каналов	3
Разрядность аналого-цифрового преобразователя	16
Диапазоны регистрируемых частот, Гц	0—2; 0—4; 0—8; 0—16; 0—32; 0—64; 0—128
Коэффициенты усиления	1; 2; 4; 8; 16; 32; 64; 128
Уровень шумов, приведенный ко входу при усилении 1, мкВ (не более)	0,28
Объем флэш-диска, Мбайт (не менее)	32
Погрешность измерения времени встроенным календарем-часами ( $\pm$ с/месяц)	2
Скорость обмена данными с компьютером через порт USB, Кбод (не менее)	256
Напряжение питания, В	10—20
Мощность потребления, Вт (не более)	0,36
Масса прибора, кг	0,5
Диапазон рабочих температур, °С	-30 ... +45

кого слоя» изучаемого объекта. Горизонтальная компонента  $H$  при этом определяется как среднее квадратичное спектров компонент  $X$  и  $Y$ , а вертикальная  $V$  соответствует спектру компоненты  $Z$ .

Возвращаясь к понятию «коэффициента уязвимости», заметим, что этот параметр успешно описывает динамические характеристики верхней части исследуемых грунтов, отмечая при этом самые слабые участки, которые в наибольшей степени подвержены воздействию упругих колебаний. Используя методику Накамуры, можно получить спектральные графики передаточной функции  $H/V$ , т. е. графики усиления сотрясений на доминирующих частотах, что позволяет вычислить значения коэффициентов уязвимости для каждой точки измерения по формуле [Nakamura, 1997]:

$$K_y = \alpha^2 / f, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — максимальное значение коэффициента усиления в соответствии со спектральной характеристикой  $H/V$ ,  $f$  — соответствующая этому значению частота.

Собственно обработка и интерпретация полученного в результате полевых наблюдений сейсмического материала осуществлялась в несколько этапов. На первом оценивалось качество сейсмограмм, выделялись наиболее характерные фрагменты, необходимые для дальнейшей обработки. На рис. 3 показан пример обзорной сейсмо-

граммы длительностью 22 минуты, зарегистрированной в точке наблюдения Пр1Пк1 (см. рис. 1). Красными стрелками показаны прохождения поездов метро непосредственно под площадкой исследований. На всех компонентах сейсмограммы уверенно отображаются всплески вибросейсмического сигнала. В среднем за время регистрации одной сейсмограммы фиксировались 7—8 прохождений поездов. При этом более короткие временные интервалы между всплесками, очевидно, характеризуют движение прямого и встречного поездов.

В каждой точке наблюдения фиксировалась аналогичная сейсмограмма. Волновое поле каждого прохождения электропоезда обрабатывалось с применением методики спектральных отношений  $H/V$ . По всем проходам поезда определялось среднее значение характерной частоты в каждой точке наблюдения и в завершение по формуле (1) рассчитывались значения коэффициента уязвимости. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Приведем пример обработки и расчетов фрагмента волнового поля, выделенного красным прямоугольным окном на рис. 3. Судя по сейсмограмме, это был шестой проход электропоезда под участком исследований. Компьютерная обработка проводилась с помощью программного обеспечения, разработанного в лаборатории сейсмометрии ИГФ УрО РАН [Сенина, Воскресенский, 2016]. На рис. 4 показана 5-се-

Т а б л и ц а 3. Результаты расчета коэффициента уязвимости  $K_y$

Точка наблюдения	$\alpha_{\text{пик}}$ , усл. ед.	$f_{\text{пик}}$ , Гц	$K_y$ , усл. ед.
Пр1Пк1	7,751	15,3	3,927
Пр1Пк3	8,78	17,2	4,482
Пр2Пк1	7,326	14,7	3,651
Пр2Пк3	3,921	12,3	1,25
Пр3Пк1	5,49	9,0	3,345
Пр3Пк3	3,984	13,8	1,15
Пр4Пк1	2,83	15,9	0,503

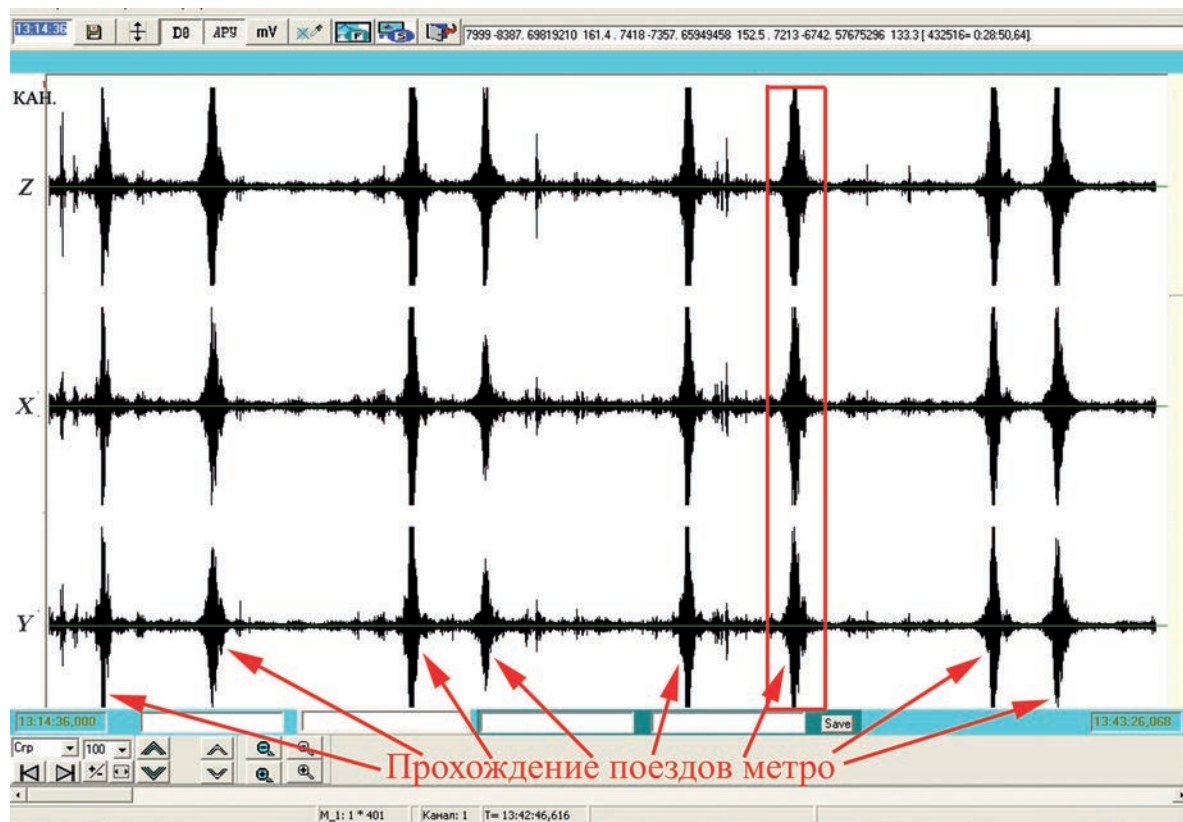


Рис. 3. Обзорная сейсмограмма, зарегистрированная в точке наблюдения Пр1Пк1.

Fig. 3. Survey seismogram recorded at observation point Пр1Пк1.

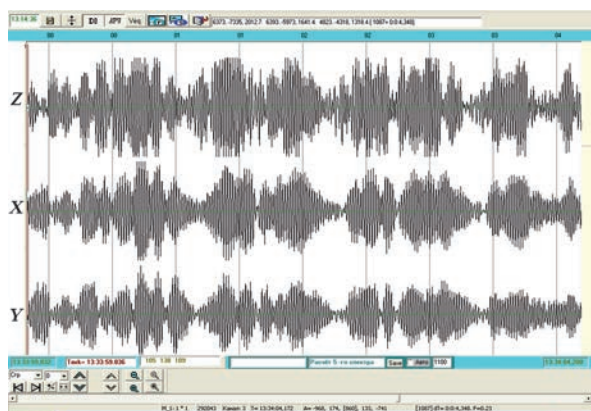


Рис. 4. 5-секундная развертка фрагмента сейсмограммы из прямоугольного окна, выделенного на рис. 3.

Fig. 4. 5-second sweep of a seismogram fragment from the rectangular window highlighted in Fig. 3.

кундная развертка фрагмента сейсмограммы из прямоугольного окна, выделенного на рис. 3. Видимый период пульсаций за-

регистрированного вибросигнала изменяется от 0,1 до 0,5 с. Частота заполнения пульсаций лежит в диапазоне 35—42 Гц.

Расчет амплитудно-частотных спектров каждой компоненты осуществлялся в программе [Сенина, Воскресенский, 2016] с использованием нерекурсивной цифровой фильтрации [Хэмминг, 1980]. При этом параметры расчета спектров задавались в следующем виде: шаг фильтра — 0,1 Гц; полосовой фильтр — 1—32 Гц; число точек фильтра — 448. Полученные спектральные характеристики, пример которых показан на рис. 5, а, служили основой для расчета передаточной функции  $H/V$  (рис. 5, б).

Несмотря на то, что в спектрах на рис. 5, а главным образом наблюдаются гармоники сигнала в высокочастотной области, на графике спектральных отношений (см. рис. 5, б) максимум функции проявляется на частоте 10,3 Гц, что подтверждает значительное усиление горизонтальных сме-

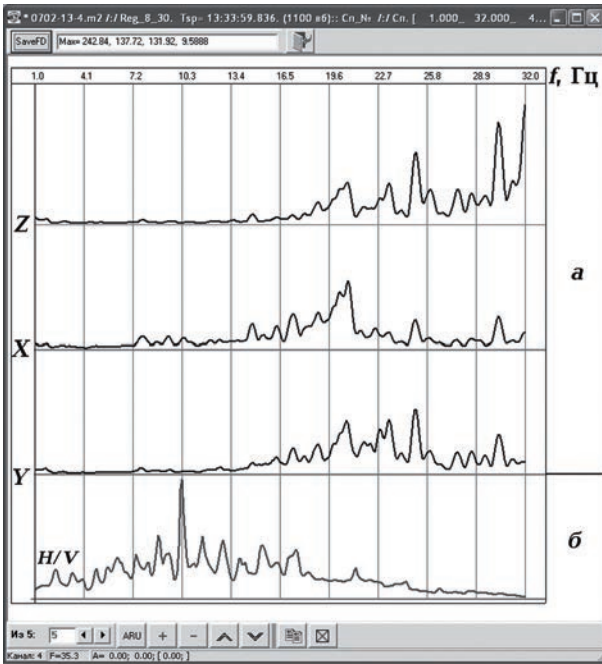


Рис. 5. Амплитудно-частотные спектры компонент вибросейсмического сигнала фрагмента сейсмограммы, зарегистрированной в точке наблюдения Пр1Пк1 (а). Передаточная функция  $H/V$ , рассчитанная с использованием этих спектров (б).

Fig. 5. Amplitude-frequency spectra of the vibroseismic signal components of a seismogram fragment recorded at the observation point Пр1Пк1 (а). Transfer function  $H/V$  calculated using these spectra (б).

щений грунтов по сравнению с вертикальными.

Возвращаясь к табл. 3, необходимо обратить внимание на характерные частоты  $f_{\text{пик}}$ . Для всех точек наблюдения эти значения лежат в относительно низкочастотном и нешироком диапазоне 9—17 Гц, что характеризует грунты на исследуемой площадке как «усилитель» упругих колебаний при поперечных смещениях в отмеченном диапа-

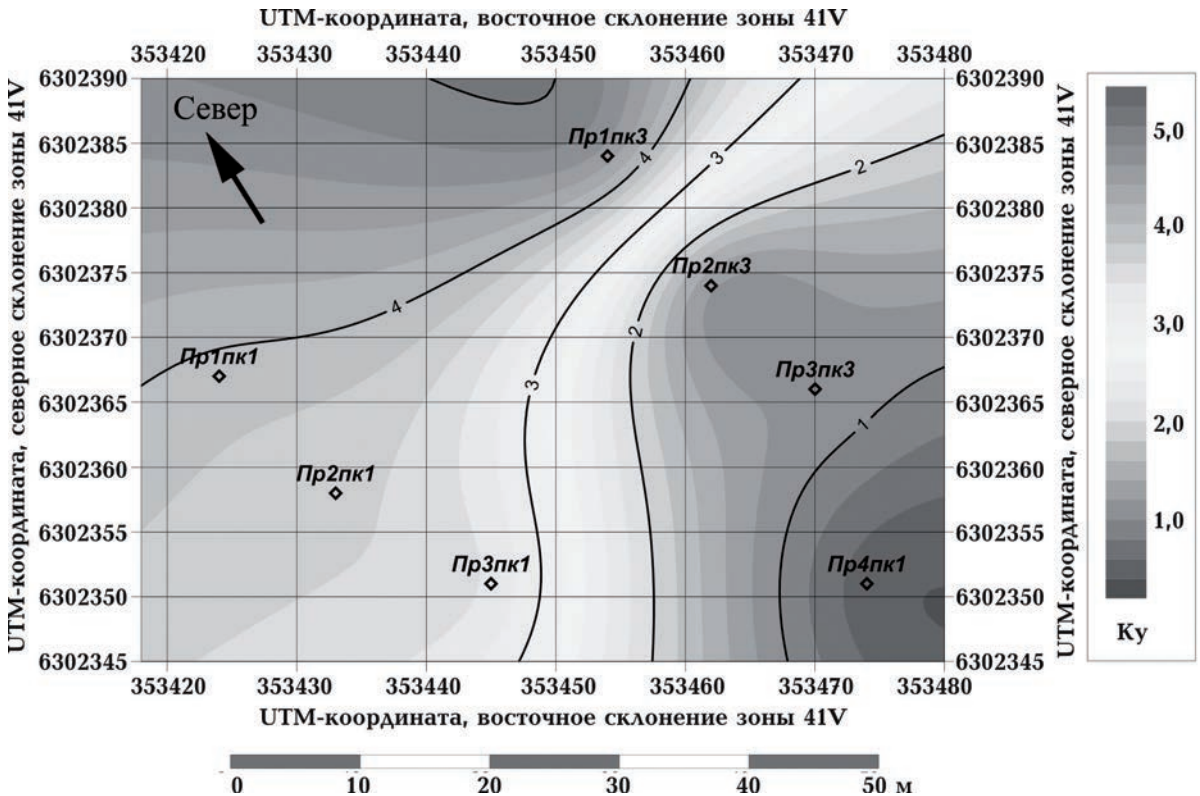


Рис. 6. Схематическая карта распределения коэффициента уязвимости  $K_y$  по площади исследования.

Fig. 6. Schematic map of the distribution of the coefficient of vulnerability of  $K_y$ .

зоне частот. Используя расчетные значения коэффициента уязвимости  $K_y$ , удалось построить схематическую карту распределения этого коэффициента по площади исследований, которая представлена на рис. 6.

**Заключение.** Изучая вибротсейсмические шумы, формируемые на поверхности грунтов проходящими поездами метрополитена, можно оценить их амплитудно-частотные свойства, а используя передаточную функцию  $H/V$  и ее производную — коэффициент уязвимости  $K_y$ , представить наиболее ослабленные участки, подверженные наибольшему воздействию внешних упругих колебаний. В частности, рис. 6 наглядно демонстрирует такое распределение площадки исследований. Его северная и северо-восточная части имеют максимальные значения  $K_y$ , тогда как юг и юго-

запад — наиболее стабильные участки, устойчивые к горизонтальным смещениям упругих колебаний, что может служить рекомендацией к выбору участка на территории исследований под застройку.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что рассмотренные в работе исследования можно охарактеризовать как некое приближение к изучению грунтов при сейсмическом микрорайонировании. Конечно, методику следует многократно опробовать в различных условиях, дополнить, например, увеличением числа точек наблюдения для повышения разрешения, сопоставить с различными методами сейсмического микрорайонирования. Но в целом, по нашему мнению, такого рода исследования перспективны, особенно для плотно застроенных городских агломераций.

### Список литературы

- Комплект карт ОСР-2015. Изменение № 1 к СП 14.13330.2014 «СНиП II-7-81\* Строительство в сейсмических районах». Приказ Министерства строительства и ЖКХ РФ от 23.11.2015 № 844/пр.
- Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н. Программа обработки сейсмической информации Reg3MSD. Свидетельство № 2016618341 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Зарегистрирована в государственном реестре программ для ЭВМ 27 июля 2016 г.
- Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Регистратор сейсмических сигналов «Регистр». *Приборы и техника эксперимента*. 2005. № 6. С. 141—142.
- Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н. Аппаратно-программный комплекс «Регистр-SD» для изучения сейсродинамических характеристик объектов, находящихся под воздействием упругих колебаний. *Приборы и техника эксперимента*. 2017. № 4. С. 157—158.
- Сенина Т.Е., Сенин Л.Н., Воскресенский М.Н. Программа вычисления энергии упругих колебаний при сейсмических исследованиях Register-E. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616131. Зарегистрировано в государственном реестре программ для ЭВМ 01 июня 2017 г.
- Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры. Москва: Советское радио, 1980. 224 с.
- Geospace Technologies Eurasia. (2021). Режим доступа <https://Geospace-Ufa.ru>.
- Nakamura, Y. (1989). A Method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Report*, 30(1), 25—33.
- Nakamura, Y. (1997). Seismic Vulnerability indices for ground and structures using microtremor. *World Congresson Railway Research, Florence* (pp. 1—7).



# The use of the vulnerability factor in the study of vibration signals on the soil surface from the movement of subway electric trains

L.N. Senin, T.Ye. Senina, 2021

Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Microseismic vibrations of the upper part of the soil strata occur continuously under the influence of endogenous and exogenous processes of both natural and artificial origin. Micro-oscillations of technogenic nature are especially characteristic of densely built-up urban areas. The practice of monitoring seismological monitoring observations shows that under such conditions it is possible to observe various types of microseismic vibrations, including elastic vibration signals in the frequency range of 1—100 Hz, generated by passing subway trains. In the calculations of the seismic stability of the designed structures, special attention is paid to the resonance characteristics of the upper part of the soil strata, which at certain frequencies can significantly enhance seismic vibrations, for example, from external vibrations sources. By traditional methods, the characteristics of resonant oscillations and their accounting are carried out, as a rule, with an insufficient degree of reliability and completeness, as a result of which and so they are usually used as auxiliary ones. In this paper, a methodological complex is considered using modern methods for measuring and processing microseismic signals in order to identify areas with maximum amplitudes of response to external elastic influences in the study area for construction and take them into account in the future in design and construction. The study of vibroseismic noises formed on the surface of the soil layer, for example, by passing subway trains, allows one to estimate the amplitude-frequency properties of these soils, and the spectral ratio of horizontal displacements of soils to vertical  $H/V$  and the derivative of these ratios — the coefficient of vulnerability of the  $K_y$  — provide a confident selection of weakened zones that are subject to the greatest impact of external elastic vibrations.

**Key words:** vibroseismic signal, spectral analysis, seismic signal recorder, vulnerability ratio, spectral relationships.

## References

- Set of maps OSR-2015. (2015). Amendment No. 1 to SP 14.13330.2014 «SNiP II-7-81\* Construction in seismic areas». Order of the Ministry of Construction and Housing and Utilities of the Russian Federation of 23.11.2015 No. 844/pr (in Russian).
- Senina, T.Ye., & Voskresenskiy, M.N. (2016). Seismic data processing program Reg3MSD. Certificate No. 2016618341 on state registration of a computer program. Registered in the state register of computer programs on July 27, 2016 (in Russian).
- Senin, L.N., & Senina, T.Ye. (2005). Registrar of seismic signals «Register». *Pribory i Tekhnika Experimenta*, (6), 141—132 (in Russian).
- Senin, L.N., Senina, T.Ye., & Voskresenskiy, M.N. (2017). Hardware and software complex «Register-SD» for studying the seismodynamic characteristics of objects under the influence of elastic vibrations. *Pribory i Tekhnika Experimenta*, (4), 157—158 (in Russian).
- Senina, T.Ye., Senin, L.N., & Voskresenskiy, M.N. (2017). The program for calculating the energy of elastic vibrations in seismic studies Register-E. Certificate of state registration of a computer program No. 2017616131. Registered in the state register of computer programs on June 01, 2017 (in Russian).
- Hemming, R.V. (1980). *Digital filters*. Moscow: Sovetskoe radio, 224 c. (in Russian).

Geospace Technologies Eurasia. (2021). Retrieved from <https://Geospace-Ufa.ru>.

*Technical Research Institute, Quarterly Report*, 30(1), 25—33.

Nakamura, Y. (1989). A Method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway*

Nakamura, Y. (1997). Seismic Vulnerability indices for ground and structures using microtremor. *World Congresson Railway Research, Florence* (pp. 1—7).

## Використання коефіцієнта уразливості при вивченні вібросигналів на поверхні ґрунтів від руху електропоїздів метрополітену

*Л.М. Сенін, Т.Є. Сеніна, 2021*

Інститут геофізики ім. Ю.П. Булашевіча Уральського відділення Російської академії наук, Єкатеринбург, Росія

Мікросейсмічні коливання верхньої частини ґрунтової товщі відбуваються безперервно під впливом ендегенних і екзогенних процесів як природного, так і штучного походження. Мікроколивання техногенної природи особливо характерні для міських щільно забудованих територій. Практика моніторингових сейсмологічних спостережень показує, що в таких умовах можна спостерігати різні типи мікросейсмічних коливань, зокрема пружні вібросигнали в частотному діапазоні 1—100 Гц, що генеруються минаючими поїздами метро. У розрахунках сейсмічної стійкості проєктованих споруд приділяється особлива увага резонансним характеристикам верхньої частини ґрунтової товщі, яка на певних частотах може істотно посилювати сейсмічні коливання, наприклад, від зовнішніх дій вібрації. Традиційними методами отримання характеристик резонансних коливань і їх облік здійснюються найчастіше з недостатньою достовірністю і повнотою, унаслідок чого вони використовуються зазвичай як допоміжні.

Розглянуто методичний комплекс із застосуванням сучасних способів вимірювання та обробки мікросейсмічних сигналів з метою виділення на досліджуваній території під будівництво ділянок з максимальними амплітудами відгуку на зовнішні пружні впливи та їх обліку в подальшому при проєктуванні і будівництві. Вивчення вібросейсмічних шумів, що формуються на поверхні ґрунтової товщі, наприклад поїздами метрополітену, дає змогу оцінити амплітудно-частотні характеристики цих ґрунтів, причому спектральне відношення горизонтальних зсувів ґрунтів до вертикальних  $H/V$  і похідна цього відношення (коефіцієнт уразливості  $K_y$ ) впевнено виділяють ослаблені зони, що зазнають найбільшого впливу зовнішніх пружних коливань.

**Ключові слова:** вібросейсмічний сигнал, спектральний аналіз, реєстратор сейсмічних сигналів, коефіцієнт уразливості, спектральні відношення.