

Способ сейсмического микрорайонирования с использованием спектральных отношений H/V

Л.Н. Сенин, Т.Е. Сенина, М.Н. Воскресенский, 2020

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Поступила 5 мая 2020 г.

Предложенный в настоящей статье способ сейсмического микрорайонирования (СМР) может быть использован в инженерной сейсмологии для оценки интенсивности сейсмических колебаний с учетом свойств грунтов, слагающих, например, сильно зашумленные территории городов, строительных площадок и т. п. Способ основан на распространенной в последнее время методике горизонтального и вертикального спектральных отношений (HVSR — Horizontal to Vertical Spectral Ratio) — аналоге квазипереходной функции. Методика была предложена Nogoshi & Igarashi в 1971 г., а позднее значительно дополнена и переработана Y. Nakamura, получив наибольшее распространение с названием « H/V Nakamura's ratio», и зарекомендовавшая себя как при изучении резонансных свойств грунтов, так и в исследованиях динамических характеристик различных строительных объектов. Авторами настоящей статьи предложено еще одно применение отмеченной методики при сейсмическом микрорайонировании с целью повышения производительности этих исследований, а также точности и стабильности определения приращений сейсмической интенсивности на исследуемых грунтах, при упругих воздействиях, вызванных, например, землетрясениями естественной или техногенной природы. На участке исследований с помощью трехкомпонентных сейсмических датчиков, установленных на грунтах с разными инженерно-геологическими условиями, проводится запись микроколебаний, фрагментируется полученная сейсмограмма на короткие отрезки с минимальной зашумленностью, рассчитывается спектр каждого фрагмента, находятся результирующие спектры горизонтальных компонент и среднее арифметическое спектров горизонтальных колебаний H и спектр вертикальной компоненты V . После расчета передаточной функции H/V выделяется максимум коэффициента усиления поперечных колебаний на исследуемом $[(H/V)_{\max}]_i$ и средневзвешенном (эталонном) $[(H/V)_{\max}]_0$ грунтах и вычисляется приращение сейсмической интенсивности из соотношения:

$$\Delta I = 2 \lg \frac{[(H/V)_{\max}]_i}{[(H/V)_{\max}]_0}.$$

В результате применения рассмотренного в статье способа повышается производительность работ, точность и стабильность определения приращений сейсмической интенсивности.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, спектральный анализ, методика спектральных отношений, сейсмограмма, сейсмическая интенсивность.

Введение. Как известно, сейсмическое микрорайонирование (СМР) проводится с целью выделения в пределах изучаемой территории участков с различной сейсмической интенсивностью (интенсивностью сотрясений), которая может отличаться от

интенсивности, определяемой картой общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2015). Различия определяются рядом причин. Во-первых, физико-механическими свойствами грунтов и особенностями их строения;

во-вторых, расположением участков исследования относительно сеймотектонических зон; наконец, особенностями характеристик очагов воздействия. При этом совокупность перечисленных факторов определяет численное значение приращения интенсивности, т. е. реальный уровень воздействия упругих колебаний на изучаемый участок, например предназначенный под строительство промышленного или жилого объекта. Следовательно, проектная документация должна составляться с учетом полученных результатов СМР. И чем точнее и адекватнее получены результаты СМР, тем надежнее будет выполнено проектирование и последующее строительство.

Историческая справка. Постановка задачи. Известны различные способы сейсмического микрорайонирования, основанные как на расчетных методиках, так и на инструментальных. Одним из таких способов СМР является инженерно-геологический с применением модели сейсмогрунтовых условий и локальной классификации грунтов по сейсмическим свойствам [Никитин и др., 2017]. Основным недостатком этого способа заключается в отсутствии инструментальной оценки приращений сейсмической интенсивности в условиях реальных упругих воздействий (землетрясений, горных ударов, микросейсмических колебаний). Это снижает точность и стабильность определения приращений балльности. К наиболее распространенным инструментальным способам СМР можно отнести метод сейсмических жесткостей, достаточно подробно описанный в работе [РСН-65-87, 1987]. Недостаток способа — высокая трудоемкость, поскольку требуется получить банк скоростей продольных или поперечных волн в пределах исследуемого и эталонного участков, т. е. выполнить комплекс сейсмических исследований, например, методом преломленных волн (МПВ). Еще один инструментальный способ СМР, основанный на регистрации микросейсмических колебаний, представлен в работе [Сейсмическое ..., 1977]. Здесь для определения приращения интенсивно-

сти отклика изучаемых грунтов на упругие воздействия используются максимальные амплитуды микроколебаний, входящие в соотношение

$$\Delta I = 2 \lg \frac{(A_{\max})_i}{(A_{\max})_0}, \quad (1)$$

где $(A_{\max})_i$, $(A_{\max})_0$ — максимальные амплитуды микросейсмических колебаний для исследуемого и средневзвешенного (эталонного) грунтов соответственно. Недостатками способа являются низкая стабильность и точность снятия отсчетов A_{\max} непосредственно с сейсмограммы, что ведет к снижению производительности и корректности учета нелинейно-упругих свойств грунтов при вычислении приращения интенсивности сейсмических колебаний. С точки зрения рентабельности этот метод среди инструментальных вне конкуренции, поскольку при минимуме измерительных средств и временных затрат позволяет получить достаточный объем первичных сейсмических материалов, обеспечивающий вычисление ΔI . В то же время возникает вопрос. При расчете ΔI по формуле (1) с сейсмограммы должны сниматься максимальные амплитуды. Очевидно, эти максимумы должны быть привязаны к некоторой частоте, характерной для грунтов в точке измерения. Вычислить A_{\max} для характерной частоты можно, например, применив спектральный анализ с использованием нерекурсивной цифровой фильтрации (НЦФ) [Хэмминг, 1980]. Расчет амплитудно-частотных спектров позволит выявить максимальные амплитуды сигналов на определенных частотах. На практике частоты для горизонтальных компонент (X и Y) измеряемого сигнала и вертикальной компоненты (Z) как правило различаются и неизвестно, являются ли изучаемые грунты наиболее уязвимыми к этим частотам.

Анализ отмеченных методик и способов СМР, наиболее распространенных сегодня, показал, что следует попытаться синтезировать некоторые современные методики, объединяющие наиболее рентабельные

полевые инструментальные измерения и обработку полученных первичных материалов с целью повышения точности и стабильности результирующих значений приращений сейсмической интенсивности ΔI [Сенин, Сенина, 2019].

Решение задачи. Полагая, что микро-сейсмические колебания представляют собой случайный процесс, стационарный во времени и пространстве [Сейсмическое ..., 1977], можно принять следующее положение. Каждая сейсмограмма достаточно большой продолжительности может быть заменена множеством коротких фрагментов такой же суммарной продолжительности. Следовательно, можно установить некоторую стандартную длительность для каждого фрагмента, проанализировать на уровень шумов и выбрать наименее зашумленные, т. е. с отсутствием на них интенсивных импульсных выбросов. Таким образом, минимизируются наиболее активные помехи, в частности имеющие техногенную природу.

В дальнейшем обработка сейсмических материалов проводится с применением известной методики Накамуры (H/V Nakamura's ratio) [Nakamura, 1989], 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). Исходя из этого положения, отношение результирующего спектра горизонтальных компонент X и Y к спектру вертикальной компоненты Z будет характеризовать так называемую передаточную функцию, зависящую от «тонкого слоя» изучаемого объекта (верхняя часть грунтовой толщи). Результирующая горизонтальная компонента H при этом может быть определена с помощью любого из соотношений:

среднее арифметическое

$$H = \frac{X + Y}{2}, \quad (2)$$

среднее геометрическое

$$H = \sqrt{X \times Y}, \quad (3)$$

векторная сумма

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (4)$$

среднее квадратическое

$$H = \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{2}}. \quad (5)$$

В работе [Lunedei, Malishewsky, 2015] эти соотношения были подвергнуты статистическому анализу, в результате которого выяснилось, что вычисление результирующего значения горизонтальной составляющей спектра практически не зависит от выбора варианта расчета. Поэтому значение H было предложено определять из формулы (5) как среднее квадратическое спектров компонент X и Y , при этом значение V будет соответствовать спектру вертикальной компоненты Z . В результате для расчетов используются соотношения (5) и

$$\frac{H}{V} = \frac{H(f)}{V(f)}. \quad (6)$$

На практике спектры рассчитываются для каждого наименее зашумленного фрагмента сейсмограммы, после чего определяется среднее арифметическое результирующего спектра горизонтальных компонент и среднее арифметическое спектра вертикальной компоненты этой же сейсмограммы и по формуле (6) вычисляется коэффициент усиления поперечных колебаний в каждой точке измерения. Из полученного банка данных находятся $\left[\left(\frac{H}{V} \right)_{\max} \right]_i$ — максимальные значения передаточной функции для точек наблюдения, расположенных на исследуемых грунтах, и $\left[\left(\frac{H}{V} \right)_{\max} \right]_0$ — максимальное значение передаточной функции для точки наблюдения, расположенной на эталонных грунтах или средневзвешенное значение максимумов передаточной функции всех точек измерения на полигоне исследований. На завершающем этапе для каждой точки наблюдения вычисляются приращения интенсивности ΔI из соотношения [Сенин, Сенина, 2019]

$$\Delta l = 2 \lg \frac{\left[\left(\frac{H}{V} \right)_{\max} \right]_i}{\left[\left(\frac{H}{V} \right)_{\max} \right]_0}. \quad (7)$$

Эксперимент. Обсуждение. Как любая другая теоретическая, методическая, аппаратная разработка в области геофизической науки, предложенный сейсмический способ исследований, безусловно, нуждается в экспериментальной проверке, включающей полевые измерения, сбор первичных сейсмических материалов, отлаживание методики компьютерной обработки этих материалов в соответствии с алгоритмом, изложенным в предыдущем разделе, формирование базы результирующих данных в табличном и графическом виде, а также сопоставление полученных результатов с аналогичными данными по участку исследований, полученными с помощью другого инструментального способа СМР.

Такого рода экспериментальные исследования были проведены в 2018—2019 гг. на участке площадью около 20000 м² с условным названием «полигон» в лесопарковой зоне юго-западного района г. Екатеринбурга. На участке в семи точках наблюдения была выполнена регистрация микросейсмических колебаний с помощью 3-канального регистратора сейсмических сигналов «Регистр» [Сенин и др., 2017] и 3-компонентного велосиметра СК-1П [Сейсмоприемник ..., 1977]. Кроме того, на этом же участке были выполнены сейсмические исследования методом преломленных волн (МПВ) с помощью 24-канальной сейсмической станции «Синус» [Сенин, Сенина, 2005].

На рис. 1 показан фрагмент спутниковой карты, на которой расположен участок исследований (белый прямоугольник), с отмеченными внутри семью точками регистрации микросейсмических колебаний Р17—Р23 и двумя профилями МПВ — Пр1 и Пр2. Профильные наблюдения на участке выполнялись для получения банка данных скоростей продольных волн с целью использования их при выполнении СМР методом сейсмических жесткостей.

В геологическом плане участок исследований расположен вблизи тектонического контакта гранитов Верх-Исетского массива и габбро в юго-западной части г. Екатеринбурга. Зону контакта участок не пересекает и приурочен к массиву габбро. Участок и собственно контакт с его переходной зоной перекрыты слоем элювиально-делювиальных суглинков мощностью до 10 м. В морфологии рыхлых отложений зона контакта не имеет видимых проявлений. Вблизи контакта, по большей части в комплексе гранитов, находится Свердловское месторождение россыпного золота, приуроченное к кварцевым жилам [Сазонов и др., 1997]. Месторождение практически полностью выбрано в предвоенные годы, главным образом шурфовым способом. Оно относится к металлогенической зоне гранитоидной Верхотурско-Верхисетской формации (Рz₃) [Геология ..., 1973]. Граница контакта гранитоидов и габбро простирается в направлении юго-восток—северо-запад.

Аппаратура и методика микросейсмических исследований. Экспериментальные исследования микросейсмических шумов имеют почти вековую историю [Саваренский, 1963]. Изучаемыми параметрами этих волновых процессов главным образом являются амплитудно-частотные характе-



Рис. 1. Участок исследований с точками регистрации микросейсмических колебаний Р17—Р23 и двумя профилями МПВ Пр1, Пр2.

Fig. 1. Points for registration microseismic tremor R17—R23 and two seismic profiles Pr1, Pr2 on the area of exploration.

ристики, соотношение амплитуд на различных частотах, а также изменения этих параметров во времени. При этом решаются два класса задач: связь параметров микросейсмического излучения с параметрами возможных первичных источников излучения упругой энергии и связь параметров сейсмических шумов со структурой, литологией и свойствами геологической среды [Надежка и др., 2003].

По первому классу задач следует отметить, что источники микросейсмического излучения делятся на эндогенные (глубинные) и экзогенные (поверхностные). Вторые, в свою очередь, подразделяются на природные и антропогенные. Каждый тип источников порождает свой тип микросейсм, существенно отличающихся по амплитудно-частотным характеристикам.

Ко второму классу относятся задачи определения по параметрам микросейсмического излучения мощности и свойств осадочного чехла, литологического расчленения верхней части разреза земной коры, выделения аномальных зон и связь этих зон с тектоническим строением.

При выполнении работ по изучению микросейсмических шумов на участке исследований применялся 3-канальный регистратор сейсмических сигналов «Регистр», отмеченный выше. Прибор был разработан и изготовлен в лаборатории сейсмометрии Института геофизики УрО РАН. Совместно с регистратором использовался, также отмеченный выше, 3-компонентный велосиметр электродинамического типа СК-1П. Методически работы выполнялись следующим образом. Регистратор с подключенным к нему велосиметром устанавливался в точке наблюдения, после чего аппаратура включалась. Регистрация трех компонент (X , Y и Z) сейсмического сигнала продолжалась в течение 15—20 мин со следующими параметрами записи: полоса регистрируемых частот 1—64 Гц, усиление 32. По окончании записи сейсμοприемник и регистратор перемещались на новые пункты наблюдения в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. Осуществлялась запись новой информации и т. д. Все данные

сохранялись на встроенном флэш-диске регистратора. По окончании полевых работ информация считывалась с диска с целью дальнейшей камеральной обработки, которая проводилась в соответствии с описанной методикой. Сейсмограмма, полученная в какой-либо точке наблюдения, фрагментировалась на участки одинаковой длительности и минимальной зашумленности. На рис. 2 показан пример такой операции. На рис. 2, *а* изображена обзорная сейсмограмма длительностью 20 мин, зарегистрированная в точке Р17, на которой пунктирным прямоугольником выделен наименее зашумленный фрагмент. На рис. 2, *б* этот фрагмент показан в развернутом виде после полосовой фильтрации в полосе частот 1—12 Гц.

Спектры по каждой из компонент рассчитывались для всех выделенных фраг-

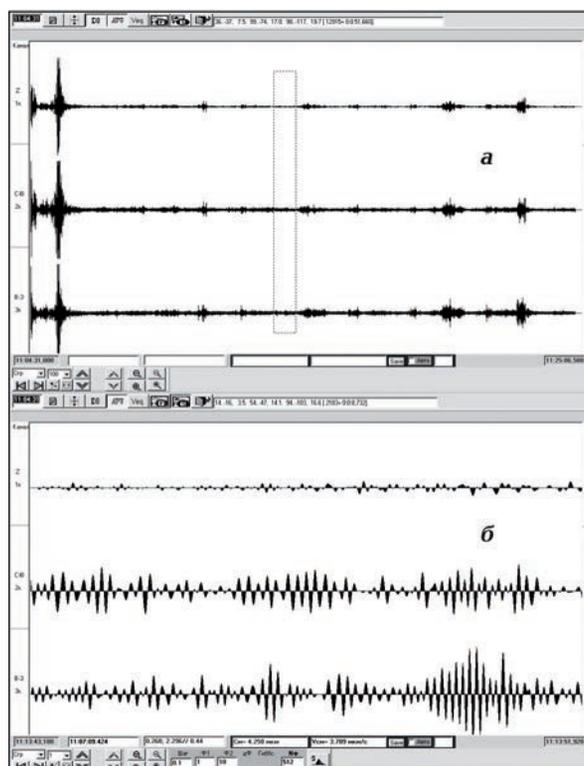


Рис. 2. Сейсмограмма микроколебаний, зарегистрированная в точке наблюдения Р17: *а* — обзорная сейсмограмма; *б* — развернутый фрагмент сейсмограммы.

Fig. 2. Seismogram by microtremor who recording in the point R17: *a* — vision seismogram, *б* — fragment this seismogram.

ментов с минимальным зашумлением. Расчеты осуществлялись в рамках программы обработки сейсмических сигналов Reg3 MSD [Сенина, Воскресенский, 2016]. В общем виде процедуру фильтрации можно представить как свертку массива последовательности цифровых отсчетов $\{\Phi_n\}$ с функцией фильтра $\{C_k\}$:

$$Y_n = \sum_{n=-m}^m C_k \times \Phi_{n-k}, \quad (8)$$

где C_k — коэффициенты фильтра, Φ_{n-k} — входные цифровые данные, Y_n — выходные цифровые данные. Для сглаживания характеристики фильтра в программной реализации НЦФ было использовано весовое окно Кайзера [Хэмминг, 1980] с модифицированной функцией Бесселя нулевого порядка. Пример амплитудно-частотного спектра фрагмента сейсмограммы, представленного на рис. 2, б, показан на рис. 3. На всех компонентах хорошо выделяются доминирующие частоты в полосе 6—9 Гц.

Полученные таким образом спектры подставлялись в формулы (5), (6) и для полосы частот 1—12 Гц рассчитывалась передаточная функция H/V , определяющая коэффициент усиления поперечных колебаний в точке измерения. Аналогично производилась обработка всех наименее зашумленных фрагментов сейсмограммы в каждой точке наблюдения. Результирующее значение H/V сейсмограммы определялось как среднее арифметическое всех выделенных на ней фрагментов. Пример распределения этого коэффициента для точки наблюдения P17 приведен на рис. 4.

Аналогично рассчитывались передаточные функции для остальных сейсмограмм, зарегистрированных в точках наблюдения P18—P23. В табл. 1 сведены максимальные значения коэффициентов H/V и соответствующие этим максимумам частоты.

Таким образом, формировался необходимый банк данных для расчета приращения сейсмической интенсивности в соответствии с соотношением (7) в каждой точке наблюдения. Рассчитанные приращения ΔI сведены в табл. 2.

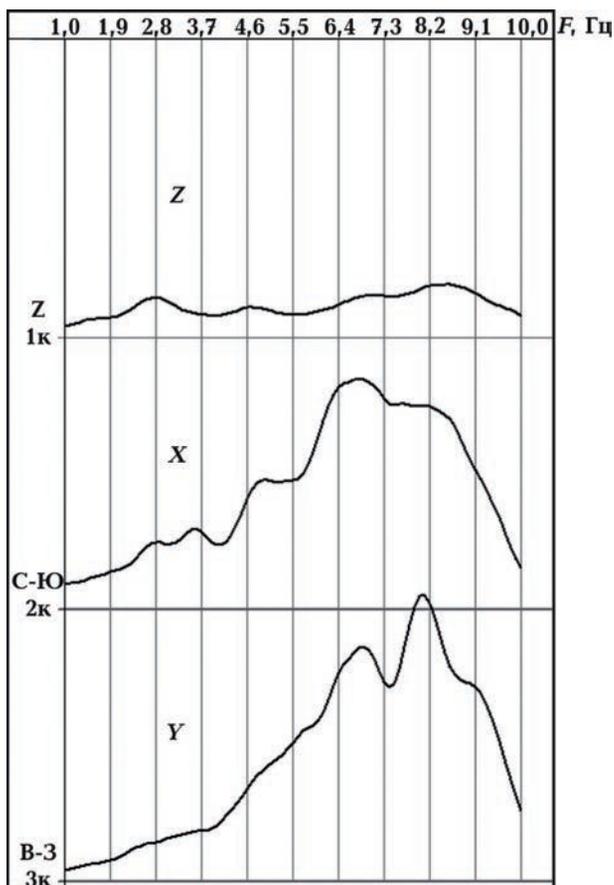


Рис. 3. Амплитудно-частотные спектры одного фрагмента сейсмограммы в точке наблюдения P17.

Fig. 3. Gain-frequency spectors by one fragment of seismicogram in the point R17.

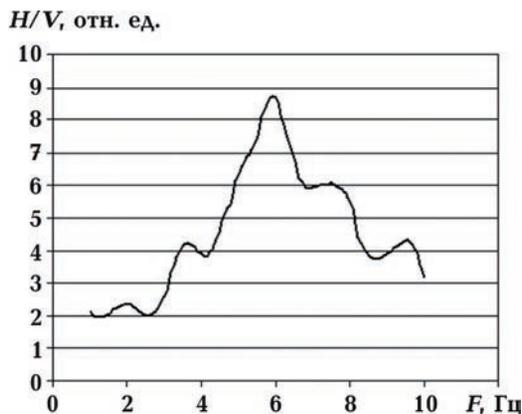


Рис. 4. Передаточная функция H/V сейсмограммы, зарегистрированной в точке наблюдения P17.

Fig. 4. Transfer function H/V by seismicogram in the point R17.

Т а б л и ц а 1 . Максимальные значения H/V и соответствующие этим максимумам частоты

Точка наблюдения	$(H/V)_{\max}$, отн. ед.	f , Гц	$(H/V_{\max})_{\text{ср}}$, отн. ед.	$f_{\text{ср}}$, Гц
P17	8,75	5,9	5,216	5,84
P18	4,44	6,1		
P19	6,66	5,8		
P20	8,14	5,5		
P21	2,38	5,8		
P22	2,61	6,0		
P23	3,54	5,9		

Заключительным этапом обработки описанного способа сейсмического микрорайонирования является графическое представление полученных результатов в виде схематической карты приращений сейсмической интенсивности ΔI по площади участка исследований. Такая карта показана на рис. 5.

Заключение. Сейсмическое микрорайонирование как составная часть изучения сейсмичности в современном мире находит широкое применение в силу все более активных проявлений сейсмической активности даже в регионах, всегда считавшихся асейсмичными. Примером тому может служить землетрясение, произошедшее 5 сен-

тября 2018 г. в Центрально-Уральском регионе (г. Катав-Ивановск Челябинской обл.) [РИА Новости, 2018]. Сила сейсмического события превысила 5 баллов по шкале МСК-64, в результате чего ощущались толчки по всей территории города, некоторые жилые и производственные здания покрылись трещинами.

Изучение сейсмичности городских территорий, в том числе методом СМР, позволяет выделить участки с грунтами, наиболее уязвимыми к упругим воздействиям, что, в свою очередь, обеспечивает наиболее правильную и безопасную застройку таких территорий. Именно поэтому разработка новых способов, аппаратуры, методических приемов, улучшающих количественные и качественные показатели в сфере изучения сейсмичности, является актуальной проблемой в современном мире и носит глобальный характер.

Представленный в настоящей статье способ сейсмического микрорайонирования с использованием спектральных отношений H/V относится к инструментальным способам микрорайонирования. К его существенным преимуществам можно отнести следующие показатели. Применять способ можно в условиях городских застроек, лесных, заболоченных и других неблагоприятных территориях. При полевых измерениях требуется минимальная приборная база. Математический аппарат, использу-

Т а б л и ц а 2 . Приращения сейсмической интенсивности ΔI в точках наблюдения P17 – P23

Точка наблюдения	ΔI , балл.
P17	+0,44
P18	-0,14
P19	+0,21
P20	+0,39
P21	-0,70
P22	-0,60
P23	-0,34

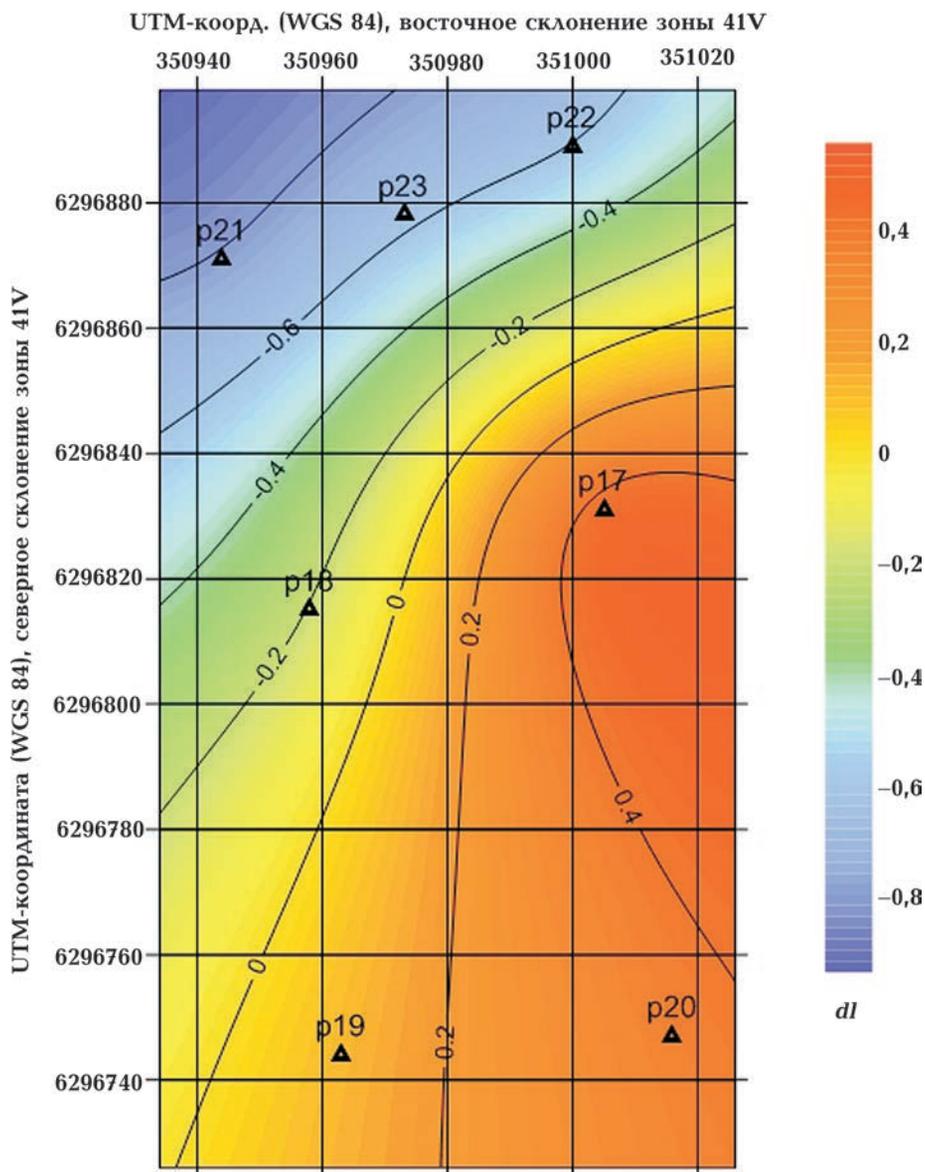


Рис. 5. Схематическая карта приращений сейсмической интенсивности участка исследований «Полигон», построенная по результатам СМР с использованием спектральных отношений.

Fig. 5. Schematic map increment of seismic intensity on the area of exploration «Poligon», this is result of seismic microzoning with using spectrum ratio.

ющийся в способе, не требует применения сложных и дорогих вычислительных комплексов. Если сопоставлять описанный в статье способ, например, с наиболее распространенным в РФ способом сейсмических жесткостей, то СМР с использованием спектральных отношений можно охарактеризовать как наиболее экономичный, оперативно выполняемый, не уступающий

по точности и стабильности получаемых результатов любым другим способом СМР. В качестве примера и с целью сопоставления результатов СМР двумя отмеченными способами на рис. 6 приведена схематическая карта приращения сейсмической интенсивности ΔI , построенная по результатам СМР методом сейсмических жесткостей. Участок исследований и построения

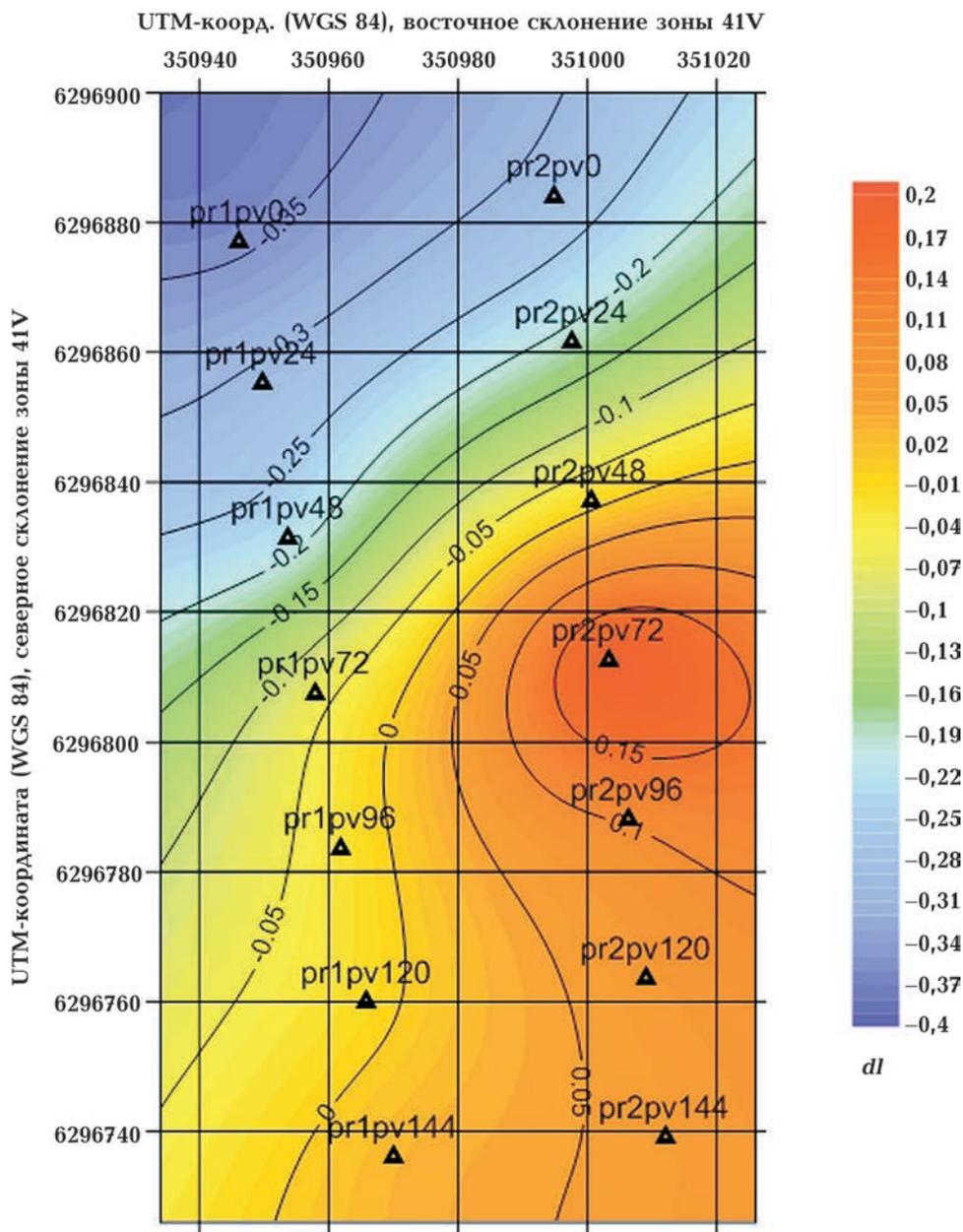


Рис. 6. Схематическая карта приращений сейсмической интенсивности участка исследований «Полигон», построенная по результатам СМР способом сейсмических жесткостей.

Fig. 6. Schematic map increment of seismic intensity on the area of exploration «Polygon», this is result of seismic microzoning by method seismic hardness.

тот же, что на рис. 1 и 5. В основе инструментальных исследований — два профиля МПВ, показанные на рис. 6 в виде пунктов возбуждения, собственно для которых выполнялись расчеты скоростей преломленной волны. Полевые измерения и расчеты выполнялись традиционно по стандартной

методике [Шерифф, Гелдарт, 1987]. Сопоставление двух представленных карт СМР (см. рис. 5 и рис. 6) позволяет сделать однозначный вывод о том, что оба метода СМР одинаково определяют наиболее уязвимый участок изучаемой площадки. При этом в численных значениях ΔI на обеих картах

наблюдаются некоторые расхождения, в основном в области отрицательных приращений. В положительной области существенных расхождений нет, что с практической точки зрения более актуально. Следует учесть также, что на получение конечного результата (схематическая карта ΔI) при выполнении СМР методом сейсмиче-

ских жесткостей было затрачено в 2 раза больше времени, чем при выполнении СМР с использованием спектральных соотношений.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта фундаментальных исследований № 18-5-5-38 комплексной программы УрО РАН.

Список литературы

- Геология СССР. Т. XII. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Полезные ископаемые. Ред. К.К. Золоев. Москва: Недра, 1973. 632 с.
- Надежка Л.И., Орлов Р.А., Пивоваров С.П., Сафронич И.Н., Ефременко М.А. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинимическими особенностями Воронежского кристаллического массива. *Вестник Воронежского университета. Геология*. 2003. № 2. С. 179—185.
- Никитин С.Н., Погребченко В.В., Никитина И.А. Способ сейсмического микрорайонирования инженерно-геологическим методом. *Инженерные изыскания*. 2017. № 6-7. С. 118—132.
- РИА Новости. На Урале зафиксировали второе за сутки землетрясение. (2018). Режим доступа: <https://ria.ru/20180905/1527855490.html>.
- РСН-65-87. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. Госстрой РСФСР, 1987. 14 с.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Сустанов С.Г., Григорьев В.В. Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона. Екатеринбург: Изд. УГГА, 1997. 225 с.
- Саваренский Е.Ф. Б.Б. Голицын и некоторые задачи современной сейсмологии. *Известия АН СССР. Сер. геофиз.* 1963. № 1. С. 3—19.
- Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Патент 2248592. Российская Федерация. Накопительная сейсмическая станция с цифровой коррекцией смещения нуля. Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 20.03.2005.
- Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Патент 2686514. Российская Федерация. Способ сейсмического микрорайонирования. Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 29.04.2019.
- 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., Воскресенский М.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016618341, Российская Федерация. Программа обработки сейсмической информации Reg3MSD. Зарегистрировано в государственном реестре программ для ЭВМ 27 июля 2016 г.
- Сейсмическое микрорайонирование. Под ред. С.В. Медведева. Москва: Наука, 1977. 248 с.
- Сейсмоприемник низкочастотный трехкомпонентный СК-1П. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. НПО «Геофизика». Завод «Казгеофизприбор», 1977. 12 с.
- Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры. Москва: Советское радио, 1980. 224 с.
- Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Т. 1. История, теория и получение данных. Москва: Мир, 1987. 448 с.
- Lunedei, E., & Malishewsky, P. (2015). A Review and some new issues on the theory of the N/V

technique for ambient vibrations. In: A. Ansal (Ed.), *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, Geotechnical and Earthquake Engineering* (Vol. 39, pp. 371—394). Springer, Cham.

Nakamura, Y.A. (1989). Method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25—33.

Seismic Microzoning Method with using procedures by spectrum ratio H/V

L.N. Senin, T.Ye. Senina, M.N. Voskresenskiy, 2020

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

Seismic Microzoning Method (SMM) proposed in the article, may be used in engineering seismology for measuring intensity of seismic waves taking into account soil properties of city areas, building plots etc. This Method is based on procedures of spectrum ratio HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) — an analogue of quasi-transition function, Nogoshi & Igarashi (1971). It was later sufficiently completed and transformed by Y. Nakamura, and obtained maximal distribution as « H/V Nakamura's ratio», and proved oneself to be good at the studies of both resonant properties of soils and dynamic characteristics of different constructional objects. The authors of this article proposed one more application of the procedure for seismic microzoning aimed at increase of efficiency of these studies and accuracy and stability of determination of accretion of seismic intensity on the studied soils during elastic actions produced for instance by earthquakes of native or anthropogenic nature. In the area of exploration a record of micro-fluctuations is conducted with the help of three-component seismic sensors installed on the soils with different engineering-geological conditions. The obtained seismogram is subdivided into a lot of small fragments with minimum noises. The spectrum of each fragment is calculated. Then spectra of horizontal components X and Y , and vertical component Z are calculated for every small fragment. Resulting spectra of horizontal components H and spectra of vertical component V are found. After calculation of transfer function H/V , maximum of gain factor by cross-cut vibrations on the exploration area $[(H/V)_{\max}]_i$ and on the weighted average (calibration) area $[(H/V)_{\max}]_0$ are determined. Then the increase of seismic intensity is calculated:

$$\Delta I = 2 \lg \frac{[(H/V)_{\max}]_i}{[(H/V)_{\max}]_0}.$$

As a result of using the novel Seismic Microzoning Method productivity of labour, accuracy and stability of calculation of ΔI is increased.

Key words: seismic microzoning, spectral analysis, procedures of spectrum ratio, seismogram, seismic intensity.

References

Zoloev, K.K. (Ed.). (1973). *Geology USSR. Vol. XII. Permian, Sverdlovsk, Chelyabinsk and Kurgan regions. Treasures of the soil*. Moscow: Nedra, 632 p. (in Russian).

Nadezhka, L.I., Orlov, R.A., Pivovarov, S.P., Saf-

ronich, I.N., & Yefremenko, M.A. (2003). About tie parameters seismic noise with Geological and Geodynamic features by Voronezh crystalline mountain range. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, (2), 179—185 (in Russian).

- Nikitin, S.N., Pogrebchenko, V.V., & Nikitina, I.A. (2017). Seismic Microzoning Method by engineering-geological procedures. *Inzhenernyye izyskaniya*, (6-7), 118—132 (in Russian).
- RIA News. The second Retrieved from earthquake during one day in the Ural. (2018). <https://ria.ru/20180905/1527855490.html> (in Russian).
- RSN-65-87. (1987). *Engineering Survey for building. Seismic Microzoning. Technical demand for manufacture*. GosstroyRSFSR. 14p. (in Russian).
- Sazonov, V.N., Ogorodnikov, V.N., Polenov, Yu.A., Sustavov, S.G., & Grigoryev, V.V. (1997). *Golden ore by Yekaterinburg Geological range*. Yekaterinburg: Ed. of the Ural State Mining University, 225 p. (in Russian).
- Savarenskiy, E.F. (1963). B.B. Golitsin and some missions by contemporary seismology. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geofizicheskaya*, (1), 3—19 (in Russian).
- Senin, L.N., & Senina, T.E. (2005). Pat. 2248592. Russian Federation. Seismic Station with accumulation and digital correction zero displacement. Registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on March 20, 2005 (in Russian).
- Senin, L.N., & Senina, T.E. (2019). Pat. 2686514. Russian Federation. Seismic Microzoning Method. Registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on April 29, 2019 (in Russian).
- Senin, L.N., Senina, T.E., & Voskresenskiy, M.N. (2017). Firmware complex «Registr-SD» for exploration seismodynamic parameters who have elastic vibrations. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, (4), 157—158 (in Russian).
- Senina, T.E., & Voskresenskiy, M.N. (2016). Instruction for processing by seismic data Reg3MSD. National certificate 2016618341, Russian Federation (in Russian).
- Medvedev, S.V. (Ed.). (1977). *Seismic Microzoning*. Moscow: Nauka, 248 p. (in Russian).
- Seismograph low-frequency 3-components SK-1P. (1977). Data Sheet. NPO Geophysics, Kaz-GeofizPribor Factory. 12 p. (in Russian).
- Hemming, R.V. (1980). *Digital Filters*. Moscow: Sovetskoye radio, 224 p. (in Russian).
- Sheriff, R., & Geldart, L. (1987). *Exploration Seismology. Vol. 1 History, theory & data acquisition*. Moscow: Mir, 448 p. (in Russian).
- Lunedei, E., & Malishewsky, P. (2015). A Review and some new issues on the theory of the H/V technique for ambient vibrations. In: A. Ansal (Ed.), *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, Geotechnical and Earthquake Engineering* (Vol. 39, pp. 371—394). Springer, Cham.
- Nakamura, Y.A. (1989). Method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25—33.

Спосіб сейсмічного мікрорайонування з використанням спектральних відносин H/V

Л.М. Сенін, Т.Є. Сеніна, М.М. Воскресенський, 2020

Інститут геофізики ім. Ю.П. Булашевича УрВ РАН, Єкатеринбург, Росія

Запропонований у цій статті спосіб сейсмічного мікрорайонування (СМР) може бути використаний в інженерній сейсмології для оцінки інтенсивності сейсмічних коливань з урахуванням властивостей ґрунтів, що складають, наприклад, сильно зашумлені території міст, будівельних майданчиків і т. п. Спосіб заснований на поширеній останнім часом методиці горизонтального і вертикального спектральних відношень (HVSР — Horizontal to Vertical Spectral Ratio) — аналогу квазіпереходної функції. Методика була запропонована Nogoshi & Igarashi в 1971 р., а пізніше зна-

чно доповнена і опрацьована Y. Nakamura, отримавши найбільше поширення під назвою « H/V Nakamura's ratio», і зарекомендувала себе як при вивченні резонансних властивостей ґрунтів, так і в дослідженнях динамічних характеристик різних будівельних об'єктів. Авторами цієї статті запропоновано ще одне застосування зазначеної методики при сейсмічному мікрорайонуванні з метою підвищення продуктивності цих досліджень, а також точності і стабільності визначення збільшень сейсмічної інтенсивності на досліджуваних ґрунтах, при пружних впливах, викликаних, наприклад, землетрусами природної або техногенної природи. На ділянці досліджень за допомогою трикомпонентних сейсмічних датчиків, встановлених на ґрунтах з різними інженерно-геологічними умовами, проводиться запис мікроколиваний, фрагментується отримана сейсмограма на короткі відрізки з мінімальною зашумленістю, розраховується спектр кожного фрагмента, знаходяться результуючі спектри горизонтальних компонент і середнє арифметичне спектрів горизонтальних коливаний H і спектр вертикальної компоненти V . Після розрахунку передавальної функції H/V виділяється максимум коефіцієнта посилення поперечних коливаний на досліджуваному $[(H/V)_{\max}]_i$ і середньозваженому (еталонному) $[(H/V)_{\max}]_0$ ґрунтах і обчислюється приріст сейсмічної інтенсивності зі співвідношення:

$$\Delta I = 2 \lg \frac{[(H/V)_{\max}]_i}{[(H/V)_{\max}]_0}.$$

У результаті застосування розглянутого в статті способу підвищується продуктивність робіт, точність і стабільність визначення приросту сейсмічної інтенсивності.

Ключові слова: сейсмічне мікрорайонування, спектральний аналіз, методика спектральних відношень, сейсмограма, сейсмічна інтенсивність.