УДК 550.034
DOI: 10.33580/9785904868277_158

ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ГРУНТОВ ПРЯМЫМИ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Заалишвили В.Б.[1], Мельков Д.А.[1], Персаева З.В.[1], Акбиев Р.Т.[2]

[1]Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Владикавказ, Россия

[2]ЦНИИП Минстроя России

Введение

Адекватность определения зависимости реакции застройки, подвергшейся сильному землетрясению, от грунтовых условий и их состояния представляет важнейшую проблему сейсмического микрорайонирования (СМР). В то же время, нередко инженерное макросейсмическое обследование эпицентральной зоны сильных и разрушительных землетрясений, показывает, что проявление интенсивности зачастую не соответствуют результатам, прогнозируемым СМР.

Определить количественно «степень нелинейности» практически невозможно, а оценка ее свойств несет качественный характер. Современные методы позволяют давать количественную оценку нелинейности грунтов, что дает возможность прогнозировать сейсмические свойства грунтов с целью работы над сейсмическим микрорайонированием.

Нелинейные свойства грунтов. Анализ проявления большинства разрушительных землетрясений показывает, что, как правило, чем «мягче» грунт, тем он более опасен в сейсмическом отношении [Шейдеггер, 1981; Болт, 1981]. Влияние на интенсивность оказывает не просто грунт, а реальное, конкретное образование, достаточно сложное для изучения даже при его кажущейся однородности.

Первой работой, которая была посвящена вопросам непосредственной оценки нелинейности в грунтах, явилась теоретическая работа А.В.Николаева [Николаев, 1967]. Позже А.А.Гвоздев и В.В.Кузнецов исследовали нелинейные явления в эпицентре небольшого взрыва [Гвоздев и Кузнецов, 1977]. Как показывают соответствующие исследования, в формировании сейсмических волновых полей в реальных средах определенную роль играет физическая нелинейность, характеризующаяся нелинейностью связи напряжения и деформации.

В.Б. Заалишвили было предложено использовать такой параметр как площадь спектра для оценки нелинейных свойств. При этом в качестве параметра, характеризующего реакцию толщи на любое воздействие, рассматривается площадь области спектра, ограниченная огибающей кривой спектра колебаний грунтовой толщи. Было установлено, что ее трансформация при интенсивных нагрузках может служить показателем степени нелинейности грунтовой толщи.

Для того чтобы привести все измерения к одинаковой интенсивности, избран путь использования стандартного сейсмического источника – сейсмического вибратора (импульсного источника) и стандартных условий измерений.

Явление нелинейности мощными источниками. Для отработки и изучения различных способов выделения нелинейных показателей грунтов целесообразно и, очевидно, наи-

более приемлемо применение искусственных, невзрывных источников большой мощности. Применение искусственного воздействия позволяет выделить различные, структурные связи исследуемых явлений с помощью их параметрического изучения [Аптикаев, 1983; Береснев и др., 1987; Рудаков и Цымбал, 1959].

Параметрический подход предполагает, в частности, оценку пределов изменения пикового значения ускорения, связанного с изменением инженерно-геологического строения исследуемой площадки. С этой целью на участках с известной проявленной сейсмичностью сильного землетрясения необходимо применить существующие приемы выделения и оценки показателей нелинейности для их последующего использования в практических работах по сейсмическому микрорайонированию [Николаев, 1987]. Современные, мобильные источники [Николаев, 1981; Шнеерсон и др., 1985] с высокой стабильностью воздействия позволяют получить результаты, несомненно, являющиеся новой ступенью геофизических экспериментальных исследований. Необходимо отметить, что толкающее усилие вибрационного источника более 10 т сохраняется в диапазоне от 12 до 100 Гц и более.

Основной особенностью использования вибрационного источника для целей сейсмического микрорайонирования является возможность управления спектральным составом излучаемого сигнала. Подобный источник позволит выявлять спектральные особенности грунтовой толщи, сложенной как однородным по литологическому составу видом грунта, так и неоднородным, составленным слоями грунтов различной мощности и видов.

В качестве вибрационного источника в работе использовался отечественный сейсмический вибратор СВ-10/100.

Источник предназначен для генерирования сейсмических волн с изменяющейся частотой и амплитудой в грунтовой толще путем воздействия на ее поверхность. Областью применения источника являются сейсморазведочные работы на нефть и газ. В таблице 2.1 приводятся основные технические характеристики источника [Шагинян, 1977].

Согласно данным, диапазон со «столообразной» характеристикой (диапазон рабочих частот) ограничен по частоте от 4 до 100 Гц. Широкий диапазон изменения длительности посылки сигнала позволяет «раскачивать» среду, т.е. выводить ее из равновесного состояния и колебать с вынужденной гармонической частотой (f) или в виде «свип»-сигнала, когда сигнал плавно изменяет частоту в пределах Δf .

Методика проведения экспериментальных исследований.

С помощью источника СВ-10/100 в грунтовой толще возбуждались свип – сигналы в пределах 1-100 Гц и проводились наблюдения сейсморазведочного типа. Длительность воздействия составляла 2с и 12с. Колебания регистрировались аналоговой аппаратурой (канал СМ-3 – ГБ-III-3). Далее производилась оцифровка записей по специально разработанной методике, данные определенным образом структурировались, и была создана база данных записей, содержащая оригинальные образы отсканированных сейсмограмм и результаты их обработки (рис. 1-3) [Заалишвили, 2009].

Для всех оцифрованных записей строились спектры Фурье, а также: максимальные амплитуды спектра, средневзвешенная частота колебаний и площадь реального спектра колебаний грунтов. Кроме того, рассчитывались показатели нелинейности и «чистой» нелинейности, показатели поглощения, которые тесно связаны с грунтовым движением [Заалишвили, 2000].

Особый интерес представляет анализ вариаций показателя «чистого» поглощения. Показатель для скальных грунтов соответствует $S_n/f_{св}$ = 0.1-0.3, для «средних» грунтов – $S_n/f_{св}$ = 0.3-0.7 и для рыхлых или «слабых» грунтов, характеризуемых высокой нелинейностью, – $S_n/f_{св}$ = 0.6-0.9. Максимальные значения $S_n/f_{св}$ характерны для ближней зоны источника, т.е. поглощение энергии для всех видов грунтов в ближней зоне – наибольшее.

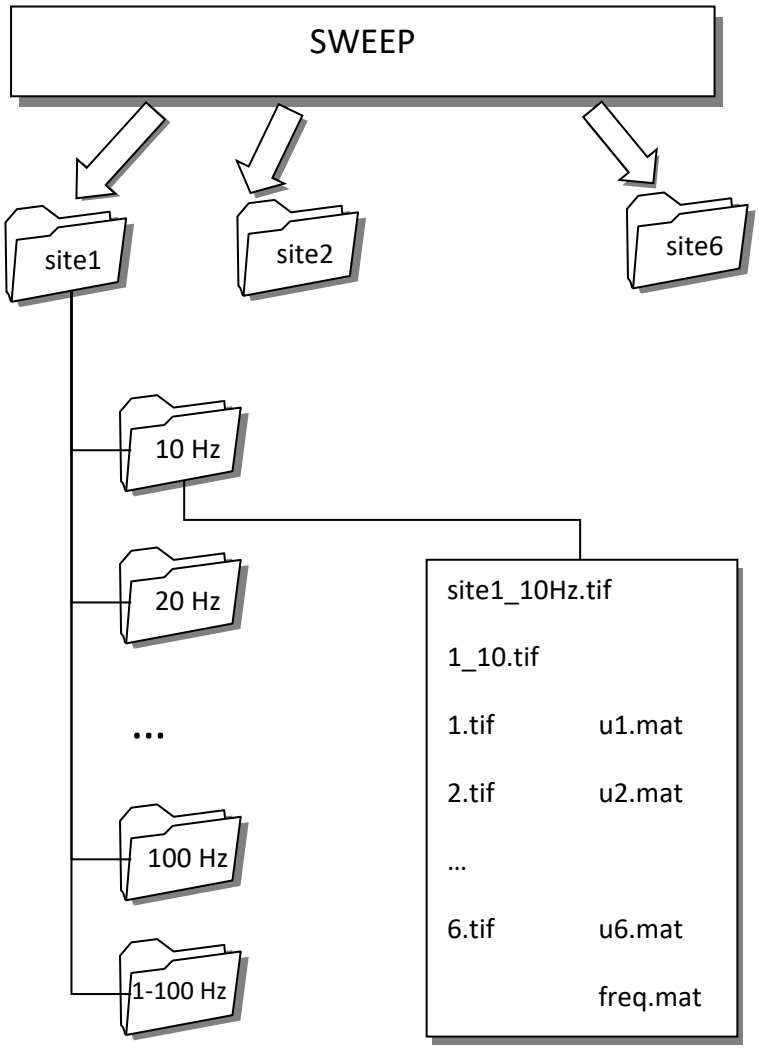


Рис. 1. Структура базы данных оцифрованных записей

Примечания:
site1_10Hz.tif – сканокопия оригинальной записи
1_10.tif – запись подготовленная для оцифровки (все каналы)
1.tif … 6.tif – отдельные каналы
u1.mat … u6.mat – результаты оцифровки отдельных каналов
*mat – формат данных программы MATLAB

Таким образом, показатели нелинейности позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние грунтов (линейная упругость, нелинейная упругость, неупругость). С другой стороны, если принять указанное выше, что показатель «чистого» поглощения представляет собой коэффициент потерь, это позволит широко использовать легко рассчитываемый показатель «чистого» поглощения для оценки многих задач инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства, а также повысить надежность получаемых данных. В частности, указанные показатели могут быть использованы при энергетическом расчете зданий, сооружений и т.д.

Использование вибрационных источников, позволяющих возбуждать в среде квазигармонические колебания определенных частот в отличие от импульсных, формирующих широкополосные, позволяют выявлять особенности проявления нелинейных свойств среды в зависимости от частоты колебаний, возбуждаемых источником.

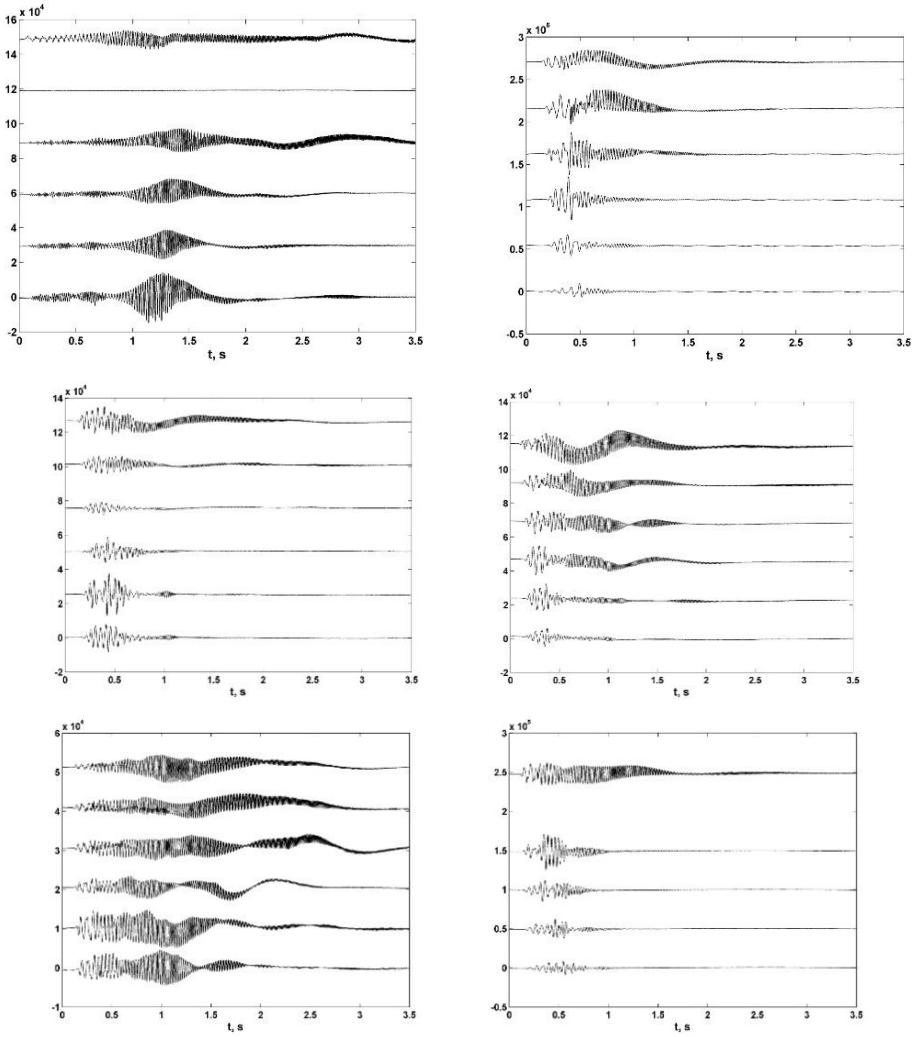


Рис. 2. Сейсмограммы вибрационного воздействия длинным свип-сигналом, участок 1-6

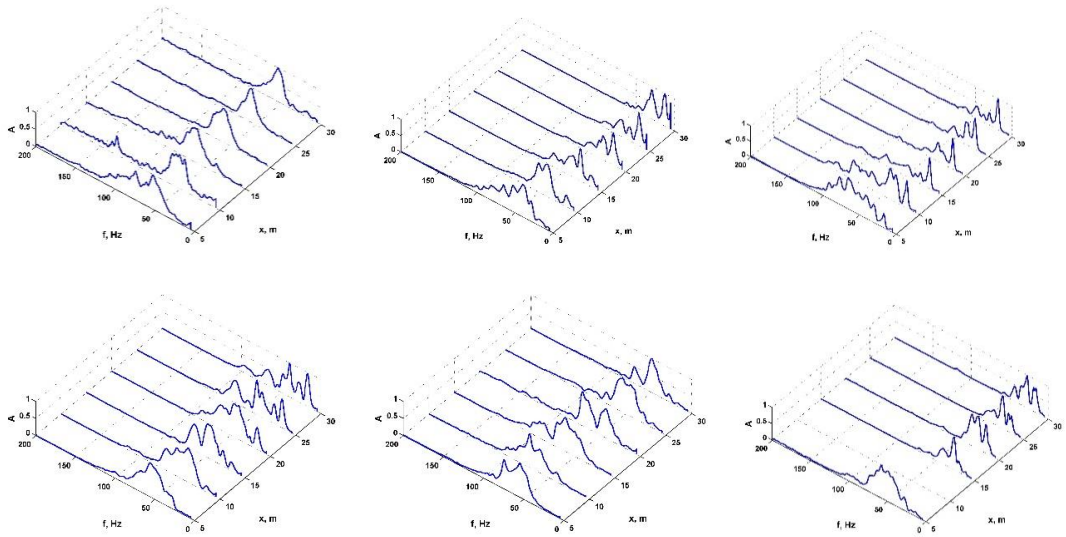


Рис. 3. Изменение спектрального состава колебаний с расстоянием (нормированные спектры Фурье), участки 1-6

При генерации квазигармонических колебаний нелинейные процессы приводят к тому, что в сигнале помимо колебаний с основными (заданными) частотными составляющими присутствуют колебания с кратными им высшими частотами. На всех записях при включении сигнала в начальный момент времени – в период первых 0,2 с наблюдается перестройка частоты колебаний. На рис. 4 представлен вейвлет-спектр разложения начального участка сигнала с частотой 10 Гц первого канала пятого участка. Частота сигнала изменяется с 13.4 Гц на 17.8 Гц, при этом происходит нарастание амплитуд колебаний. Далее наблюдаются колебание в интервале частот 14.9 Гц -16.9 Гц, что в рассматриваемом интервале 1-100 Гц сигнал можно считать монохроматическим.

В зависимости от типа и состояния грунтовой толщи наблюдались различные вариации спектра во времени. Выделяются максимумы на определенных для каждого участка частотах колебаний, при этом вид этих «всплесков» различен, они могут быть одиночными, локализованными по частоте и времени, или в определенном диапазоне частот, когда форма свип-сигнала практически не изменяется (участок 1), а обеднение состава колебаний в высокочастотной части спектра объясняется спектральными особенностями затухания сейсмических волн. Для сравнения можно рассмотреть спектральные особенности сейсмограмм участка №5, где наблюдается выделение отдельных максимумов на кратных частотах, что особенно хорошо выражено на последнем канале.

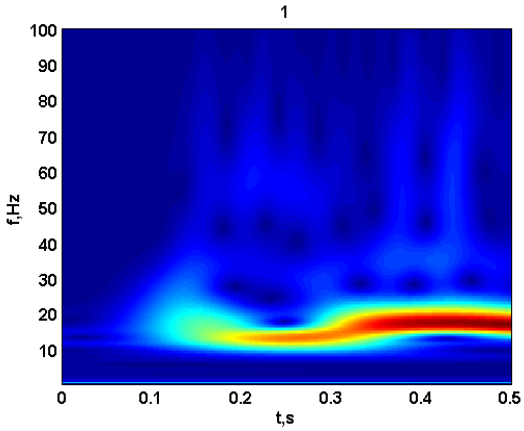


Рис. 4. Вейвлет-спектр сигнала при включении вибрационного источника, частота 10 Гц, канал 1, участок 5

Появление в спектре кратных частот отмечается наличием дополнительного «свип-сигнала» малой амплитуды с большим углом наклона по отношению к временной оси.

В интервале 0,4-0,7 с на втором канале записи, полученной для участка №5 наблюдается перемещение максимума колебаний в область кратных частот, что хорошо видно на рис. 6.

Инструментальные исследования нелинейных и просадочных свойств грунтов при интенсивных сейсмических воздействиях

В процессе проведения сейсмического микрорайонирования, нередко предстоит произвести оценку сейсмических свойств участков, сложенных просадочными грунтами.

В условиях просадочных грунтов при сильных землетрясениях нередко наблюдается разжижение грунта и, как следствие, неравномерная осадка сооружений, поэтому физически обоснованная оценка смещений за счёт остаточной деформации грунта и проявления его просадочности является актуальной задачей СМР.

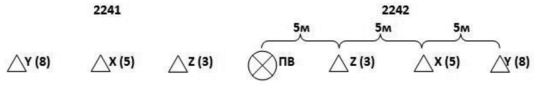
Структурно-неустойчивая группа суглинистых грунтов с пропластками и линзами глин различной консистенции являются наиболее неблагоприятными для строительства (Заалишвили, 2000) и безопасности эксплуатации застроенных сооружений.

Высокая степень влажности всех структурных разновидностей грунтов суглинистой толщи предполагает наличие в ней парагенетической воды капиллярного и гравитационного комплексов за счёт образования локальных водонасыщенных горизонтов на контактах суглинистых и глинистых пород. Это, в свою очередь, способствует активизации просадочных свойств грунтов при изменении естественных условий техногенным или природным воздействием [Кригер и др., 1984].

Исследования проводились на участках Весна и Карцинское шоссе, где распространены просадочные грунты. Для оценки остаточной деформации просадочных и непросадочных грунтов была использована специальная схема проведения экспериментальных наблюдений. Для возбуждения колебаний применялась ударная установка с грузом 500 кг. На участках «Карцинское шоссе» и «Гадиева» сейсмоприёмники расставлялись на расстояниях 5, 10 и 15 метров от источника возбуждения колебаний. На участке «Весна» использовалось 2 сейсмоприёмника на расстоянии 5 и 10 метров. Записи проводились до и после уплотнения. На расстоянии 5-ти метров было проведено 3 удара для уплотнения грунта, на расстоянии 10 метров 5 ударов и на расстоянии 15 метров было произведено 8 ударов. По соответствующим записям колебаний грунтов строились амплитудные спектры Фурье.

Анализ данных показал, что в спектре колебаний ближней зоны источника, преобладает ВЧ составляющая, которая с расстоянием быстро затухает. При этом в случае нелинейно – упругих деформаций основная энергия сосредоточена в ВЧ диапазоне спектра, а при неупругих – в НЧ диапазоне. Также необходимо отметить значительное изменение ширины пика при удалении от источника колебаний и его сдвиг в ВЧ область.

Для упругих линейных или нелинейных колебаний имеет место постоянство площади реального спектра, являющейся показателем величины энергии конкретного источника, поглощаемой грунтом. Анализ полученных данных позволяет сделать заключение, что при неупругих явлениях площадь спектров соответствующих колебаний грунта величина не постоянная. Она уменьшается и тем больше, чем меньше прочность грунта. Данный факт хорошо виден согласно данным приведенным в табл. 2.



- отметка удара; 2241, 2242– номера пикета; Δ^Y, Δ^X, Δ^Z -шаг расстановки, в м

Рис. 5. Схема расстановки сейсмоприемников при проведении экспериментов

Наибольшее уменьшение площадей реальных спектров наблюдается для участка на Карцинском шоссе, характеризуемого наибольшей величиной просадочности грунтов, слагающих его. При этом площадь спектра колебаний в наибольшей степени уменьшается в ближней зоне. На участке «Весна» площадь реальных спектров отличается уже не столь заметно, а на непросадочных грунтах участка Гадиева площадь спектра, практически, уже не зависит от уплотнения. Более того, здесь амплитуды, пусть незначительно, но, наоборот, растут после каждой группы воздействий. Необходимо отметить, что на расстояниях 10 и 15 (м) может наблюдаться небольшой рост площади спектра, что, на первый взгляд, связано со свойствами нижележащего слоя, характеризующегося большей величиной скорости распространения волн (рис. 6).

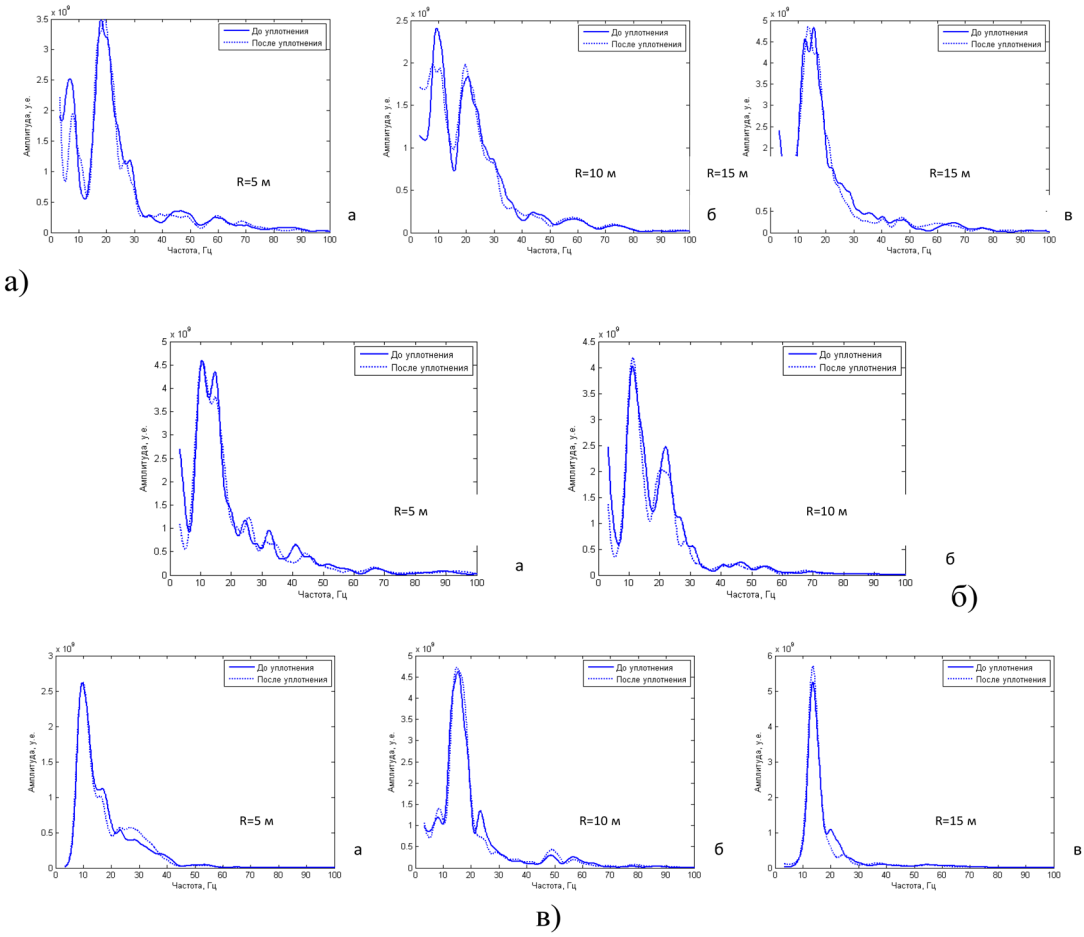


Рис. 6. Участок «ул. Гадиева» (а), Весна (б)

На просадочных грунтах участка «Карцинское шоссе» спектры колебаний в ближней зоне характеризуются преобладанием энергии в ВЧ области частотного диапазона (рис. 8). В промежуточной зоне или зоне между ближней и дальней зонами основная энергия спектра колебаний заключена в НЧ области. Это указывает на то, что ВЧ составляющая спектра с расстоянием значительно поглощается рыхлой средой. В дальней зоне можно наблюдать полное исчезновение ВЧ составляющей, правда при этом весь спектр колебаний несколько смещается в ВЧ область диапазона.

После уплотнения просадочных грунтов спектры колебаний в ближней зоне источника, характеризуются заметным уменьшением НЧ-составляющей и постоянством ВЧ составляющей. В промежуточной зоне или зоне между ближней и дальней зонами наблюдается незначительный рост ВЧ составляющей относительно исходного уровня (до уплотнения).

В просадочных грунтах на расстоянии равном три метра имеют место сильные неупругие деформации. При этом значительно уменьшаются НЧ и остаются постоянными ВЧ составляющие спектра. При нелинейно-упругих деформациях значительно уменьшаются НЧ, но заметно растут ВЧ составляющие спектра, т.е. идет «перекачка энергии». При линейно-упругих деформациях амплитудные уровни спектра колебаний до и после уплотнения, практически, не меняются, если не считать совсем незначительного поглощения ВЧ составляющей.

В непросадочных грунтах на расстоянии равным трем метрам при воздействии не достигаются неупругие деформации. Здесь, безо всякого сомнения, имеют место нелинейно-упругие деформации. В частности, имеет место «перекачка энергии» в ВЧ область спектра. При этом наблюдаются постоянство НЧ-составляющей. С удалением от источника наблюдаются рост амплитуд в НЧ области и такое же по величине уменьшение в ВЧ области спектра. С дальнейшим удалением основная энергия концентрируется в НЧ области, и амплитудный уровень заметно растет относительно исходного, неуплотненного грунта. При этом ВЧ составляющая полностью поглощается, но само поглощение мало.

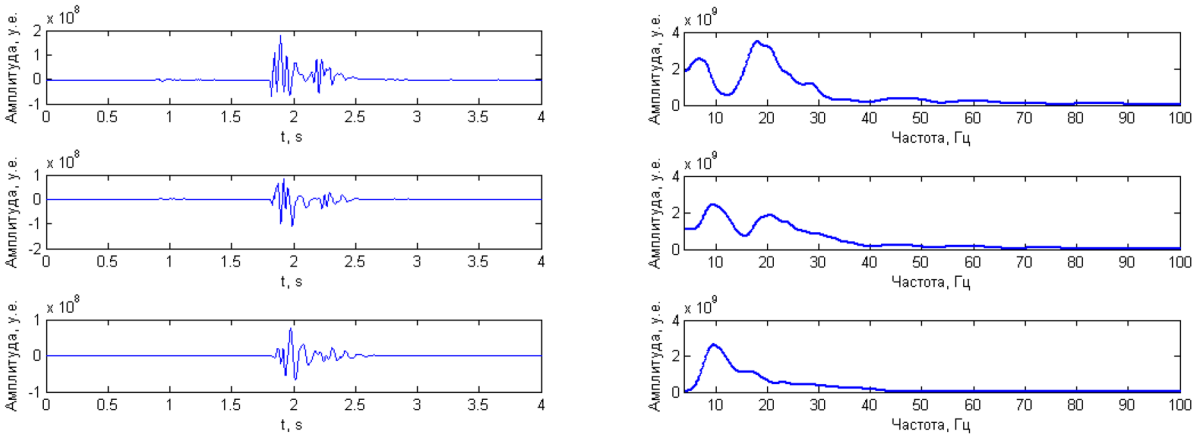


Рис. 7. Изменение записей и спектров с расстоянием на участке «Карцинское шоссе»

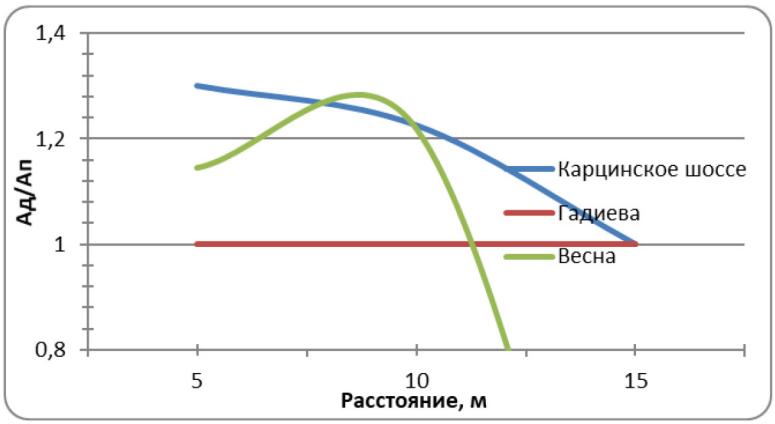


Рис. 8. Зависимость отношений максимальных амплитуд до и после уплотнения от расстояния (НЧ область частотного диапазона спектра)

Анализ зависимости отношения максимальных амплитуд в НЧ области спектра до и после уплотнения от расстояния, можно заключить, что на участках с просадочными грунтами указанное отношение с расстоянием стремится к единице (рис. 8). На непросадочных грунтах данное отношение практически равно единице.

Использование специальной схемы проведения экспериментальных наблюдений позволило непосредственно оценить неупругие свойства грунтов и установить значительное влияние уплотнения на свойства просадочных грунтов. Кроме того, установлено, что в спектре колебаний грунта, вызванных близким источником возбуждения, преобладает ВЧ составляющая, которая с расстоянием быстро затухает. Проведя анализ полученных данных можно заключить, что при неупругих явлениях площадь спектров соответствующих колебаний грунта величина не постоянная. Она уменьшается и тем больше, чем меньше прочность грунта. Самое значительное уменьшение площади реальных спектров наблюдается для участка, характеризуемого наибольшей просадочностью грунтов. При этом площадь значительно уменьшается в ближней зоне. А на непросадочных грунтах площадь спектра практически не зависит от уплотнения.

Заключение

1. Использование вибрационных источников позволяет задавать воздействия с регулируемым спектральным составом, как гармонические, так и в виде «свип»-сигнала, когда сигнал плавно пробегает значения в регулируемых границах частот. Составление скоростного разреза с помощью вибрационного источника более трудоемко, чем при использовании импульсного. В связи с этим для упрощения полевых задач скоростной разрез можно составлять с помощью маломощного импульсного источника. Другими словами, особенности невзрывных источников таковы, что не мешают их успешному использованию для целей сейсмического микрорайонирования, а преимущества – очевидны.

2. Продольное профилирование с встречными системами наблюдений, проводимое на основе стандартных условий возбуждение – прием сигналов, позволит непосредственно исследовать спектральные характеристики грунтов в пределах типичных участков с определенными инженерно-геологическими условиями. Это позволит, в свою очередь, исполь-

зовать обработанные достаточно точными методами экспериментальные данные для непосредственной оценки приращений балльности грунтов, слагающих грунтовую толщу на районируемой территории.

Литература

1. Шейдеггер А.Е. Физические аспекты природных катастроф. М.: Недра, 1981. 232 с.

2. Болт Б.А. Землетрясения. М.: Мир, 1981. 256 с.

3. Николаев А. В. Сейсмические свойства рыхлой среды // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1967. С. 23–31.

4. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмики // Проблемы нелинейной сейсмики. М.: Наука, 1987. С. 5–20.

5. Николаев А.В. Изучение Земли невзрывными сейсмическими источниками // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 5–28

6. Гвоздев А. А., Кузнецов В. В. О явлении частичного откола // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1977. № 2. С. 21–27.

7. Аптикаев Ф.Ф. Оценки параметров сейсмических колебаний при сейсмическом районировании // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1983а. С. 173-180.

8. Береснев И.А., Николаев А.В., Соловьев В.С., Шалашов Г.М. Нелинейное распространение модулированного сейсмического вибросигнала // Докл. АН СССР. 294:1. 1987. С. 51–53.

9. Рудаков А.Г., Цымбал Т.М. О некоторых экспериментальных исследованиях динамических характеристик импульсного воздействия // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: ЛГУ, 1959. С. 159–186.

10. Шнеерсон М.Б., Гродзенский В.А., Ваншельбойм В.Г., Жуков А.П., Майоров В.В. Установки для возбуждения упруги х колебаний в наземной невзрывной сейсморазведке // Обзор. Сер. Разведочная геофизика. М.: ВИЭМС, 1985.

11. Заалишвили В.Б. к вопросу сейсмической опасности территории Республики Северная Осетия-Алания // Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе. Труды III Кавказской международной школы-семинара молодых ученых. Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и РСО-А. 2009. С. 131–136.

12. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования. М., 2000. М.: ОИФЗ РАН, 367 с.

13. Кригер Н.И. Грунт с инженерно-сейсмологической точки зрения // Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1984. С 18–22.