

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55475

## ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА

© 2014 В.Б. Заалишвили

Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и PCO-A, Россия, 362002,  
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, E-mail: vzaal@mail.ru

В работе рассмотрены вопросы зависимости спектральных характеристик сейсмических волн от строения верхней части разреза. Показано, что введение величины средневзвешенного периода колебаний грунтов значительно повышает качество дифференциации грунтов различного вида. Приведены результаты анализа полевых данных в виде соотношений для расчетов плотностей грунтов различных видов. Рассмотрена зависимость спектрального состава сейсмических волн от мощности, физико-механических свойств грунтов, слагающих грунтовую толщу, и гидрогеологических условий.

На основе анализа данных сделан вывод о высокой целесообразности использования при сейсмическом микрорайонировании мощных импульсных и вибрационных искусственных невзрывных источников. В работе использовались комплекс методов: полевые и численные (на физико-математических моделях) эксперименты, а также проведение экспериментов по анализу спектральных характеристик грунтов на лабораторных моделях.

Особое внимание было уделено исследованию показателей поглощения сейсмической энергии в различных видах грунтов. Показано, что использование расширенного типа показателей грунтов, в частности, за счет включения стандартных спектральных характеристик позволяет значительно повысить достоверность и надежность установления инженерно-геологического разреза грунтовой толщи и ее гидрогеологических условий.

**Ключевые слова:** грунты, спектры, анализ, сейсмограммы, активная зона, средневзвешенный период колебаний, плотность грунта, поглощение.

Грунтовая толща, состоящая из одного или нескольких слоев, обладает избирательностью, выделяя и усиливая колебания в определенной полосе частот. Причина избирательного усиления – интерференция многократно отраженных в слоях сейсмических волн и существование собственных колебаний слоев грунтов. Кроме того, амплитудно-частотный спектр колебаний на поверхности толщи зависит от спектрального состава подходящей волны, угла подхода, мощности толщи, физико-механических свойств грунтов, слагающих эту толщу и гидрогеологических условий.

### 1. Спектральный анализ сейсмограмм

Размеры и форма активной зоны объемного источника определяются плотностью и вязкостью грунтов, слагающих верхнюю часть грунтовой толщи, характеристикой направленности источника и т. д. Глубина активной зоны (зоны локализации остаточных деформаций) может быть рассчитана по приближенной формуле [Шнерсон, Майоров, 1980]:

$$h=3d_{ш} \quad (1)$$

где  $d_{ш}$  – диаметр штампа (плиты).

Присоединенная масса грунта, который участвует в движении системы, является массой активной зоны. Учитывая, что у источника СИ-32 диаметр плиты состав-

ляет  $d=1,0$  м и плотность грунта (суглинка)  $\rho=1,8$  т/м<sup>3</sup> рассчитаем присоединенную массу по формуле:

$$m_{пр} = 2,4\rho d^3 \quad (2)$$

Присоединенная масса грунта для данного случая составляет  $m_{пр} = 4,3$  т. Для кувалды, при использовании диска диаметром  $d = 0,3$  м, присоединенная масса составляет  $m_{пр} = 110$  кг. Источник большой мощности можно представить в виде сферы с вершиной в точке приложения силового воздействия. За пределами активной зоны будут наблюдаться исключительно упругие сейсмические волны.

Таким образом, чем мощнее источник, тем больший объем грунтового массива приводится в колебательное движение.

Для спектрального анализа сейсмограмм колебаний грунтов применена программа, составленная для разложения несинусоидального процесса в ряд [Дженкинс, Ваттс, 1971].

В связи с тем, что при исследованиях использовалась измерительная аппаратура с относительно малым усилением, необходимо было выяснить влияние длины отрезка исследуемой сейсмограммы на основные характеристики спектра. В качестве исходной использовалась сейсмограмма колебаний относительно рыхлого грунта (суглинка, г. Рустави, участок 2). (Исходная длительность сейсмограммы  $t = 0,65$  с; число точек отсчета  $N = 139$ .) На рис. 1 приведены образцы спектров последовательно отрезаемой сейсмограммы (с конца записи). При этом число точек отсчета уменьшалось до  $N = 9$  равномерного шага оцифровки. Видно, что изрезанность спектральной характеристики сменяется более плавной огибающей частотных линий; уменьшается вес высокочастотной части спектра. Это указывает на то, что в последующую за основной волной часть записи приходят преломленно-отраженные волны с глубоко залегающих горизонтов, в виде высокочастотных колебаний малой амплитуды (из-за рассеяния на мелких неоднородностях). Хорошо видно, что если уменьшить используемую длину отрезка почти на 70%, то это практически не влияет на спектральный состав до гармоник  $n = 4$  (рис. 2).

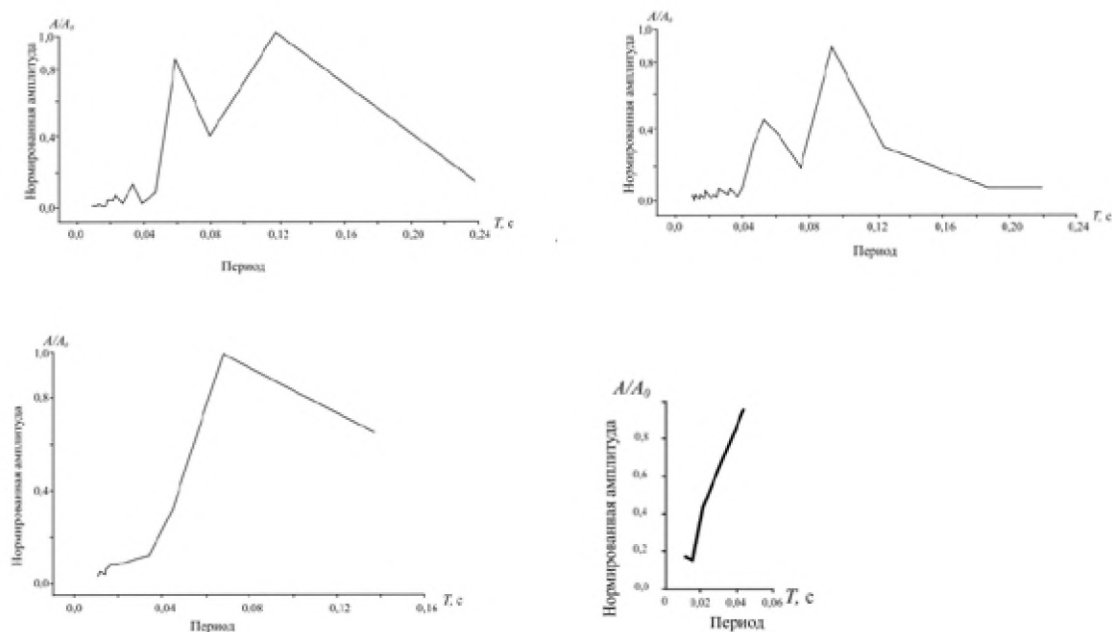


Рис. 1. Спектры отрезков сейсмограмм (число точек отсчета  $N = 139-85-29-9$ )

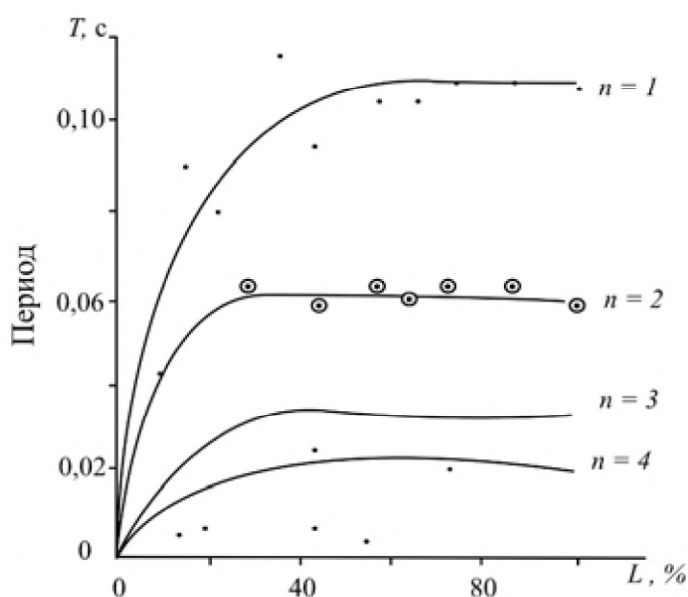


Рис. 2. Изменение максимальных периодов с уменьшением отрезка сейсмограммы

Это, очевидно, объясняется тем, что основная информация импульсного источника находится в первых 20-30% длины всей записи. В то же время, наблюдается более заметное уменьшение средневзвешенного периода. Исходя из этого, при построении спектров использовался весь отрезок сейсмограмм с видимыми амплитудами колебаний.

## 2. Средневзвешенное значение периода

Спектральный анализ сейсмограмм колебаний грунта, возбужденных мало-мощным источником, позволил установить, что для различных видов грунтов (например, заторфованных грунтов и галечников с песчано-глинистым заполнителем более 30%) наблюдаются близкие значения максимальных периодов (рис. 3а).

Это можно объяснить тем, что маломощные источники на участках, сложенных различными видами грунтов, возбуждают колебания в области, практически одинаковой по глубине (различие в величинах их активных зон незначительно). Кроме того, высокочастотные составляющие сигнала быстро затухают (в галечниках из-за рассеивания, в торфе – поглощения) и в точку наблюдения приходят упругие волны, близкие по значениям максимальных периодов.

Учитывая, что при СМР в основном используют максимальные значения периодов [Аракелян и др., 2008; Ершов, 1965; Заалишвили, Рогожин, 2011], отметим следующее: очевидно, более целесообразно использовать средневзвешенное значение периода (т.е. энергоёмкость спектра или представительность), рассчитываемое по формуле:

$$T_{\text{св}} = \frac{\sum A_i T_i}{\sum A_i} \quad (3)$$

где  $A_i$  и  $T_i$  – амплитуда и соответствующий период спектра.

На рис. 3а. показано, что приращение значения средневзвешенного периода спектра относительно его максимального периода для торфа достаточно большая

величина ( $\Delta T_1$ ). Для галечника приращение ( $\Delta T_2$ ) меньше (рис. 3б). Отсюда, средневзвешенное значение периода можно использовать, как дополнительный показатель характеристики грунтов.

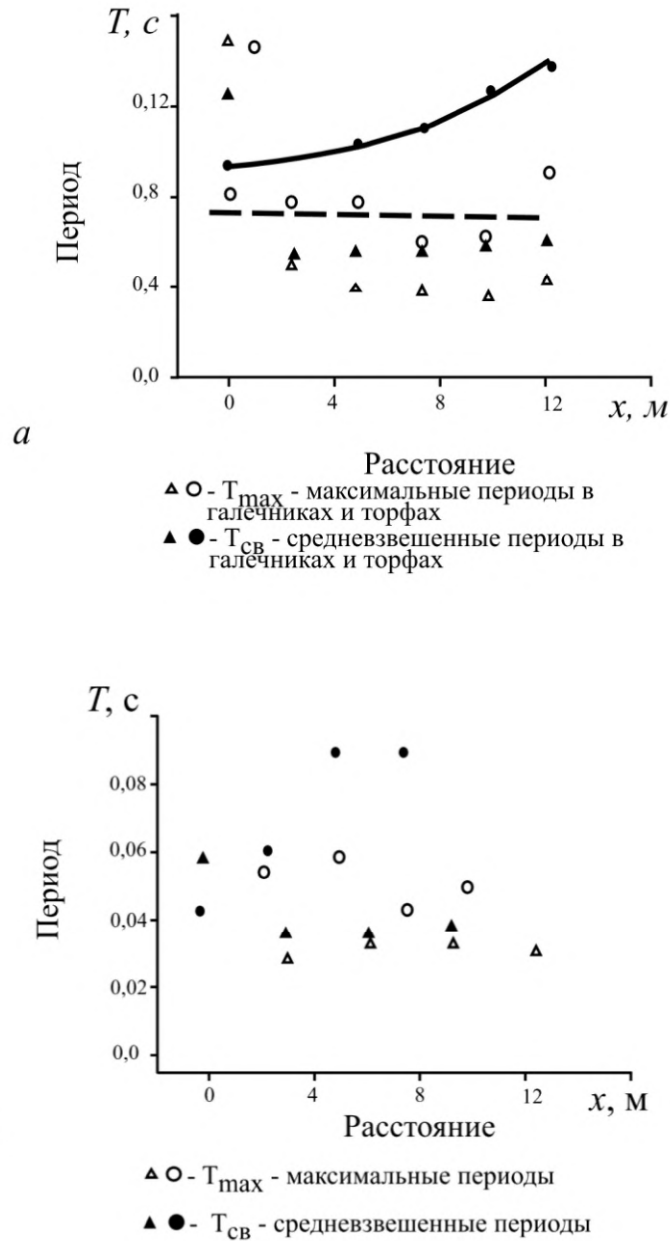


Рис. 3. Средневзвешенный период колебаний;  
 а – галечники с песчаным заполнителем более 30% и торфы;  
 б – галечники с песчаным заполнителем менее 30% и суглинки

Статистический анализ фактического материала, полученного на участках, сложенных грунтами различного вида, позволил получить кривую зависимости средневзвешенных значений периодов (для однотипного маломощного источника) от скорости распространения поперечных волн. Значения скоростей поперечных волн при этом непосредственно характеризуют физико-механические свойства указанных грунтов (рис. 4).

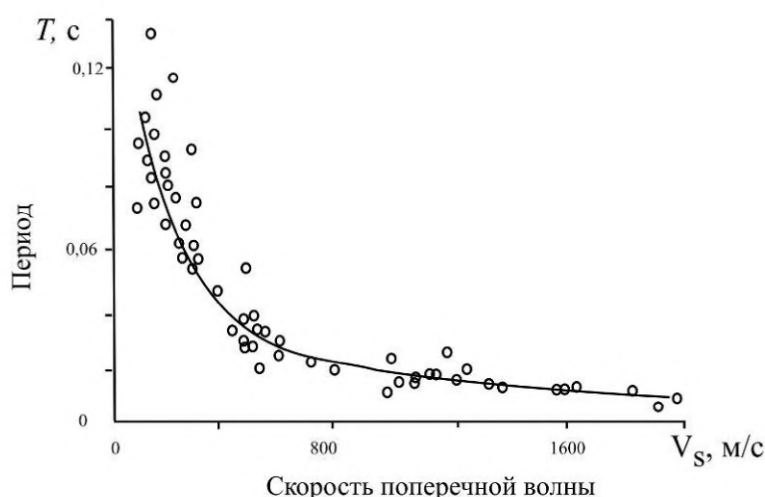


Рис. 4. Средневзвешенные периоды колебаний грунтов: зависимость средневзвешенных периодов от скорости распространения поперечных волн

Рассматриваемая кривая (рис. 4.) может быть аппроксимирована эмпирическим выражением:

$$T_{\text{св}} = a + be^{-c/v_s}, \quad (4)$$

где  $a = 0,016$ ;  $b = 1,447$ ;  $c = 1,245$ .

Известна формула для расчета приращения интенсивности А.Б. Максимова [Максимов, 1969]:

$$\Delta I = 0,8 \frac{\rho_0 v_0 f_0^2}{\rho_i v_i f_i^2}, \quad (5)$$

где:  $\rho_0 v_0$  – акустические жесткости сопоставляемых грунтов;  $f_0$  – преобладающие частоты колебаний грунтов.

Учитывая полученную зависимость (4) и, внося приближение  $a \approx 0$ , получим:

$$\Delta I = \lg \frac{\rho_0 v_0}{\rho_i v_i} e^{2,5(\lg v_0 - \lg v_i)}, \quad (6)$$

Ранее нами были получено (рис. 5), что плотность песчано-глинистых и крупнообломочных грунтов можно с достаточной точностью рассчитать единой зависимостью [Заалишвили, 2009]:

$$\rho = 2,4v_s^{0,2}. \quad (7)$$

При этом плотность коренных пород (рис. 5) можно рассчитать по формуле:

$$\rho = 2,0v_s^{0,4}. \quad (8)$$

Это позволяет реализовать оценки плотности грунтов без проведения специальных инженерно-геологических изысканий.

Таким образом, при отсутствии данных о плотности  $\rho$  грунта с учетом зависимостей (7) и (8), формула для расчета приращения интенсивности примет вид [Заалишвили, 2009]:

$$\Delta I = \lg \frac{a_0 v_0^{1+n_0}}{a_1 v_1^{1+n_1}} e^{2,5(\lg v_0 - \lg v_1)}, \quad (9)$$

где  $a_{01}$  – коэффициенты, равные 2,4 для песчано-глинистых и крупнообломочных грунтов и 2,0 – для коренных пород;  $n_{01}$  – показатель степени, равный 0,2 для песчано-глинистых и крупнообломочных грунтов; и 0,4 – для коренных пород.

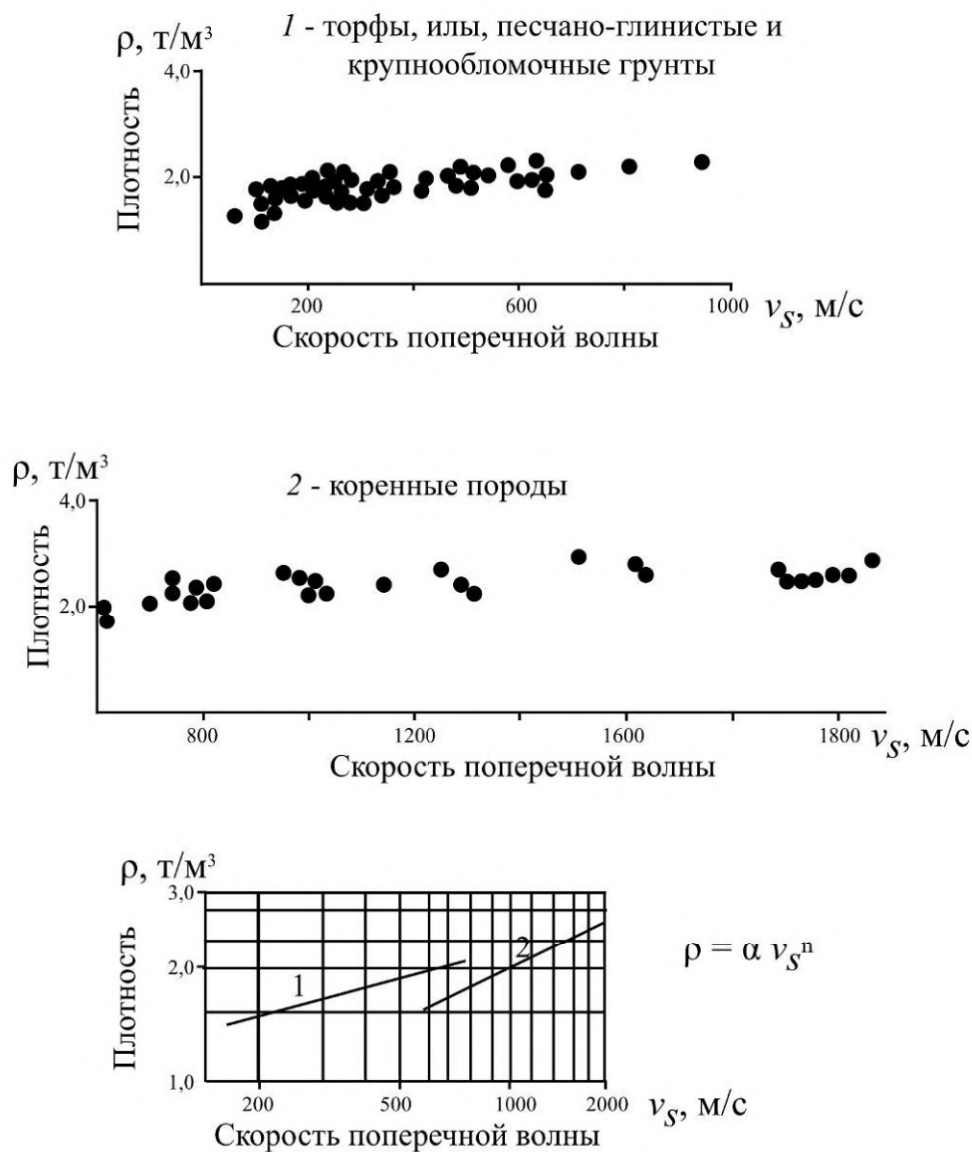


Рис. 5. Зависимость плотности грунтов от скорости поперечной волны в них

Таким образом, получена формула для расчета приращения интенсивности при использовании маломощных источников, где учтены одновременно три характеристики грунта. И при этом, для расчетов необходимо, практически, определить значение только одной величины, а именно: скорости распространения поперечной волны. Это позволяет в случае надобности получать оперативную и в то же время вполне физически обоснованную информацию о свойствах исследуемых грунтов.

Анализ данных использования мощного импульсного источника СИ-32 [Заалишвили, 1983] позволил получить характер изменения средневзвешенных периодов колебаний с расстоянием в зависимости от вида и мощности грунтов. Хорошо видно, что каждый вид грунта занимает определенную область периодов. При этом

глинистые грунты в связи с большим разбросом их мощностей характеризуются соответствующим разбросом периодов (рис. 6).

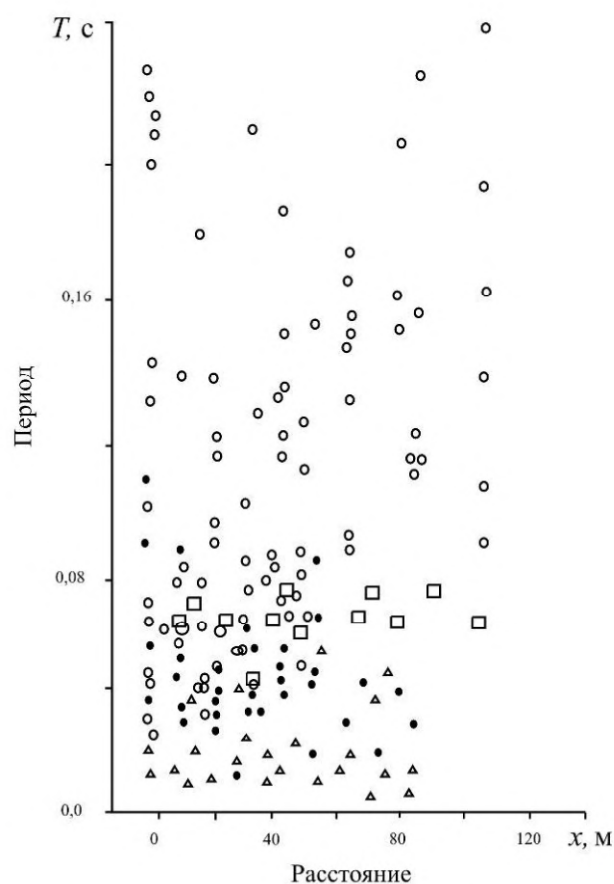


Рис. 6. Изменение средневзвешенных периодов колебаний с расстоянием в зависимости от вида и мощности грунтов

Анализ изменения средневзвешенных значений периодов показал, что при мощности поверхностного слоя грунта  $H \leq \lambda/4$  ( $\lambda$  – длина волны) вид подстилающего слоя влияет на частотную характеристику сейсмических волн при наземных наблюдениях. Так, если подстилающий слой сложен плотными грунтами (известняками, конгломератом и т. д.), то с удалением точки наблюдения от источника периоды сейсмических волн уменьшаются. При относительно рыхлом виде грунта, составляющего подстилающий слой (илы, торф, рыхлые суглинки и т. д.), периоды увеличиваются. Очевидно, это объясняется тем, что с удалением от источника на получаемых сейсмограммах в область первых вступлений выходят преломленные сейсмические волны, частотно-модулированные нижележащими слоями. Можно заметить, что каждый вид грунта характеризуется определенной областью значений периодов. Аппроксимируя их прямыми, получим т. н. «частотные уровни» (рис. 7) для различных видов грунтов (для однотипного источника). Отметим, что для источников малой интенсивности мощность грунтов практически не влияет на значения средневзвешенных периодов.

Анализ значений средневзвешенных периодов колебаний грунтовой толщи, возбужденных мощными невзрывными источниками показывает, что:

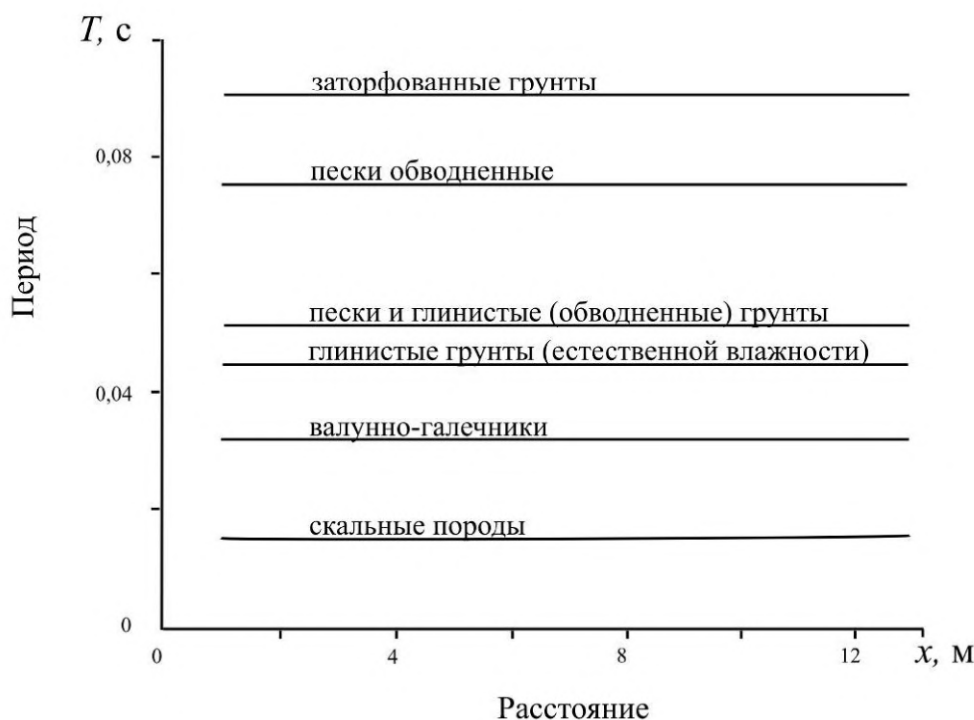


Рис. 7. Экспериментальные значения периодов колебаний грунтов, возбужденных стандартным источником – «частотные уровни»

- каждый вид грунта одинаковой мощности характеризуется определенным уровнем средневзвешенного периода ( $T_{св}$ );
- значения  $T_{св}$  изменяются в зависимости от мощности и вида грунта;
- наличие рыхлого почвенного слоя (пашня и т. д.) вызывает наличие больших значений  $T_{св}$  в непосредственной близости от источника колебаний грунта;
- на расстоянии порядка 30-40 м от источника значения  $T_{св}$  приближаются к значениям  $T_{пр}$  для мощности толщи 8-10 м ( $T_{пр} = 4 H/v_s$ );
- с расстоянием для грунтов большой мощности ( $H > 10$  м) на расстоянии более 40 м наблюдается скачкообразное увеличение  $T_{св}$ , приближающееся к соответствующим  $T_{пр}$ ; причем для грунтов (мощностью  $H \approx 8-10$  м) увеличение  $T_{св}$  с расстоянием более 30-40 м мало.

Таким образом, исследование средневзвешенных периодов позволяет изучать как физико-механические свойства грунтов, так и их резонансные свойства, определяемые равенством средневзвешенных и преобладающих периодов колебаний.

### 3. Зависимость спектрального состава сейсмических волн от мощности, физико-механических свойств грунтов, слагающих грунтовую толщу, и гидрогеологических условий

Спектр колебаний в пункте наблюдения  $S_i(f)$  связан со спектром колебаний в проходящей волне  $S_0(f)$  соотношением  $S_i(f) = S_0(f) K_i(f)$  [Миндель и др., 1979]. Таким образом, частотная характеристика среды в  $i$ -м пункте наблюдения определяется, если известны спектры колебаний на поверхности среды  $S_i(f)$  и, в подстилающем рыхлую среду, скальном основании  $S_0(f)$ . На практике амплитудно-частотные характери-



ки грунтов исследуемого участка рассчитывают, непосредственно относя спектры их колебаний к спектрам колебаний грунтов эталонного участка. Это позволяет изучать особенности процесса любого движения [Заалишвили, Невская, 2004; Заалишвили и др., 2005]. Эталонный участок, при этом, сложен коренными породами, которые выходят на поверхность [Миндель и др., 1979; Рекомендации..., 1985].

Прежде всего, рассмотрим спектр колебаний в пункте наблюдения. Анализ спектральных особенностей волн, возбужденных на поверхности грунтовой толщи показывает, что вид спектральной огибающей периодов и их значения находятся в прямой связи с видом и мощностью грунтов, слагающих толщу.

Так, при использовании маломощного источника (удар кувалдой) в зависимости от вида грунта изменяется ширина спектра и конкретное значение периода. При переходе наблюдения от скальных грунтов к заторфованным грунтам ширина спектра увеличивается в 6 раз (рис. 8).

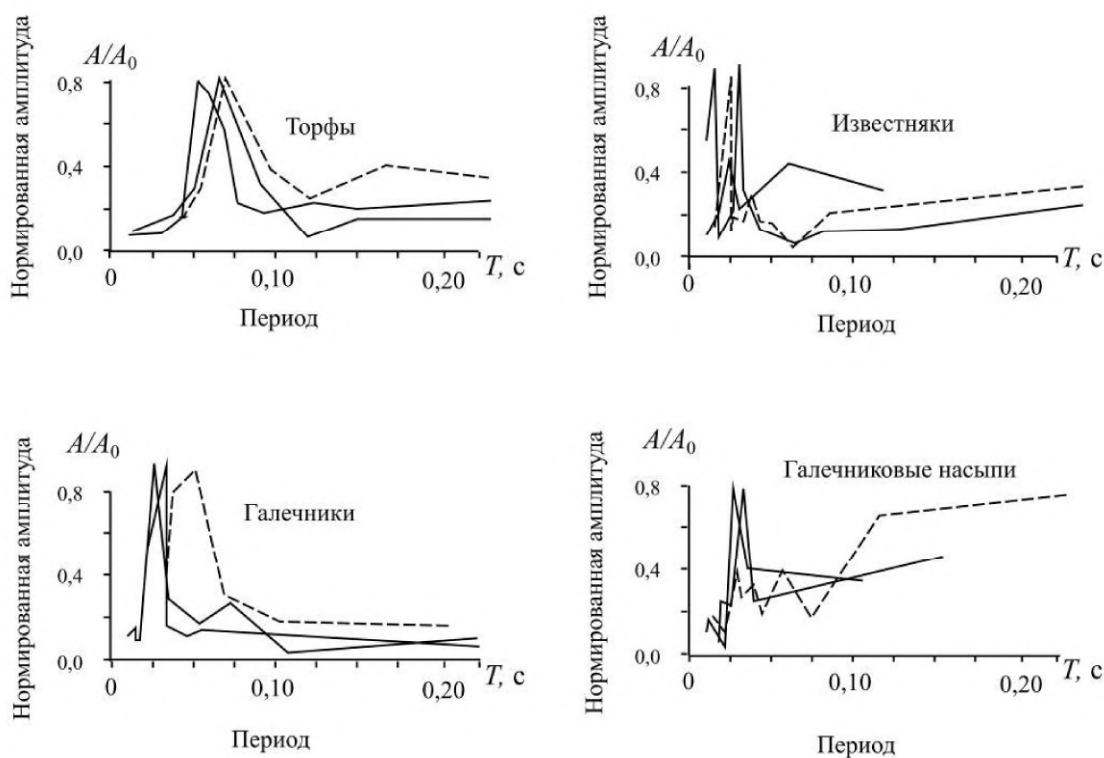


Рис. 8. Спектры колебаний, возбужденных маломощным источником

Отметим, что в работе А.Л. Левшина приводятся данные о различии спектров колебаний галечников и песков, соответствующие полученным данным [Левшин, 1961]. Даже если грунт находится под слоем почти трехметровой насыпи, вид спектра в области максимума практически не изменяется.

Отметим, что форма спектра при использовании маломощного источника имеет в основном вид равнобедренного треугольника для любого вида грунта, причем хорошо видно, что с удалением от источника (1–4), спектры, как правило, смещаются в высокочастотную область, не изменяя площади занимаемой спектром. Учитывая, что расстояния стандартны, можно оценивать приращения интенсивности описываемых грунтов по площади занимаемой их спектральными характеристиками, а также оценивать поглощение сейсмических волн в грунтах.

При анализе спектров колебаний обводненных грунтов, возбужденных мало-мощным источником, установлено, что значения максимальных периодов непосредственно связаны с глубиной стояния грунтовых вод. В данном виде грунта, например, глинистом, по мере увеличения глубины стояния грунтовых вод увеличивается период колебаний толщи. Сопоставляя колебания от различных источников, можно видеть, что уровень амплитудного спектра колебаний, вызванных мощным импульсным источником, значительно превосходит спектр колебаний, вызванных ударом кувалдой (рис. 9).

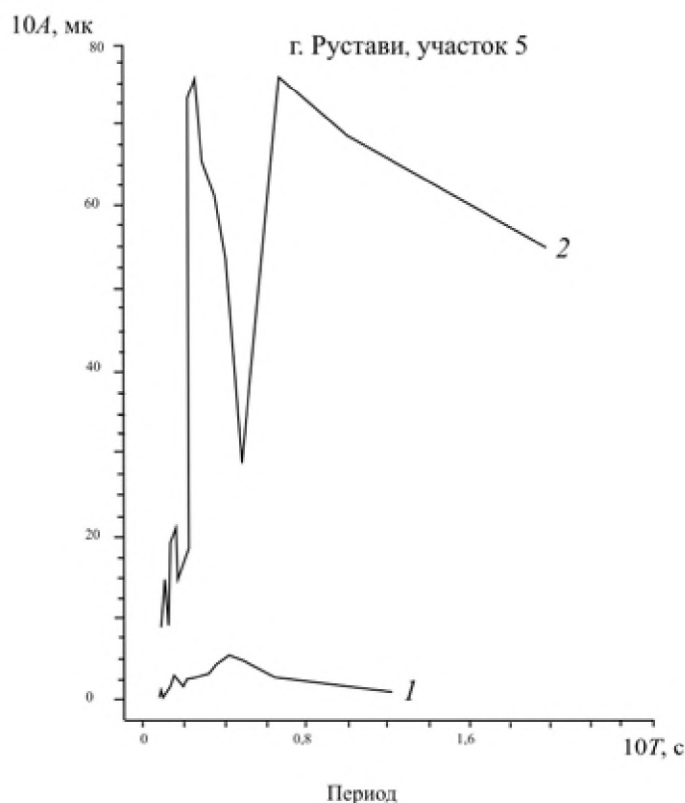


Рис. 9. Спектр колебаний на участке 5, г. Рустави:  
1 – удар кувалдой (вертикальный);  
2 – удар мощным импульсным источником СИ-32

При анализе спектров колебаний грунтовой толщи, возбужденных невзрывными источниками большой мощности (СИ-32), установлено, что спектральная характеристика колебаний грунтовой толщи и здесь – устойчивая величина (рис. 10). Это справедливо, как при распространении колебаний с расстоянием при фиксированном источнике, так и при фиксированных точках наблюдения с изменением местоположения источника (встречная система наблюдения) с противоположным (обратным) расположением источника. Указанные особенности справедливы и для вибрационных источников СВ-10/100.

Спектральный состав изучаемых колебаний представлял собой монохроматический  $f = 10$  Гц сигнал, а также «свип» – сигнал с полосой излучения  $f_n - f_k = 5-30$  Гц. При монохроматическом сигнале источника генерируемых колебаний в толще глинистых грунтов (чередование суглинков и глин) сейсмограмма представляет собой запись гармонических (точнее пилообразных) колебаний с частотой  $f = 10$  Гц. В

этом случае грунты ведут себя, как системы с одной степенью свободы. Исключение представляют собой начальная и конечная части записи, связанные с переходным явлением воздействия. Длительность времени посылки сигнала при этом совпадает с длительностью вынужденных колебаний в области, непосредственно примыкающей к источнику. С удалением от источника сигнал расплывается из-за явления дисперсии, и общая длительность сигнала незначительно увеличивается.

При аналогичном возбуждении колебаний в сложно составленной толще (чередование тонкослоистых суглинков и выветрелых коренных пород различного вида) на соответствующей сейсмограмме появляются высокочастотные наложения, обусловленные частотными особенностями подстилающих грунтов. Следует отметить, что эти наложения с расстоянием сильно поглощаются и практически исчезают. Гармонические колебания с частотой  $f = 10$  Гц, тем не менее, проявляются по всем трассам сейсмограммы достаточно уверенно. Это позволяет непосредственно сопоставлять амплитуды гармонических колебаний, чтобы в последующем рассчитывать приращения балльности участков, сложенных различными грунтами.

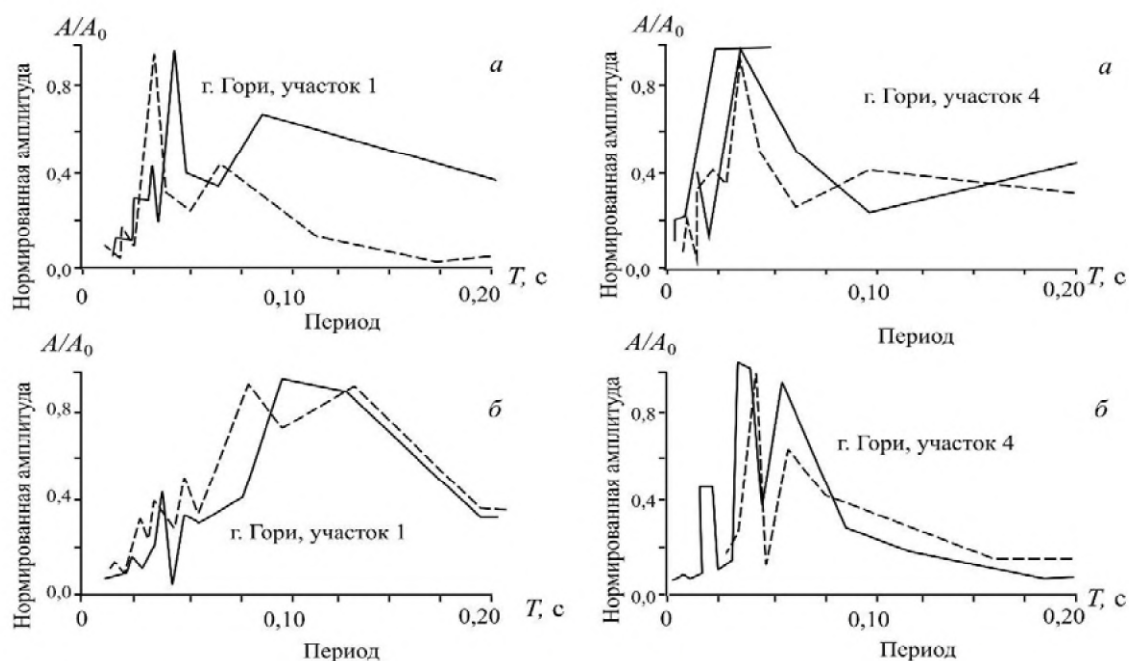


Рис. 10. Спектры колебаний грунта, вызванных мощным импульсным источником СИ-32: а – ближняя зона; б – дальняя зона

Отметим, что при вибрационном воздействии влияние приповерхностного слоя непосредственно рядом с источником ослабевает. Это объясняется тем, что остаточные, пластические деформации в ближней зоне вибрационного источника (в отличие от импульсных) значительно меньше. При этом в соответствующих областях наблюдаются частоты, которые генератором не задавались. Так, при посылке «сви́п» – сигнала с параметрами  $\Delta f = 5-30$  Гц на сейсмограммах глинистых грунтов появляются колебания с частотами 1-3 Гц и на скальных колебания с частотой 40-80 Гц, соответственно. Как отмечалось ранее, длительность исходного сигнала составляла  $t = 2,0$  с. Отметим, что длительность колебаний в грунтах при этом составляла  $t = 2,0$  с. Наблюдалось незначительное уменьшение длительности в скальных неветрелых грунтах (2%) и увеличение – в глинистой рыхлой толще (5%).

Таким образом, различие в продолжительности реакции в различных видах грунтов от исходного сигнала не превышает 3%. С удалением от источника искажение продолжительности сигнала возрастает и на расстоянии уже 20 м достигает 8%.

Анализ спектров сейсмограмм, возбужденных вибрационными источниками, показывает картину, аналогичную спектрам сейсмограмм колебаний грунтов, возбужденных мощными импульсными источниками. Для мощной толщи глинистых отложений спектральные кривые (точнее подспектральная область) более представительны, а для глинистых, тонкослоистых грунтов, подстилаемых коренными породами, спектральные кривые более изрезаны и их представительность меньше (рис. 11).

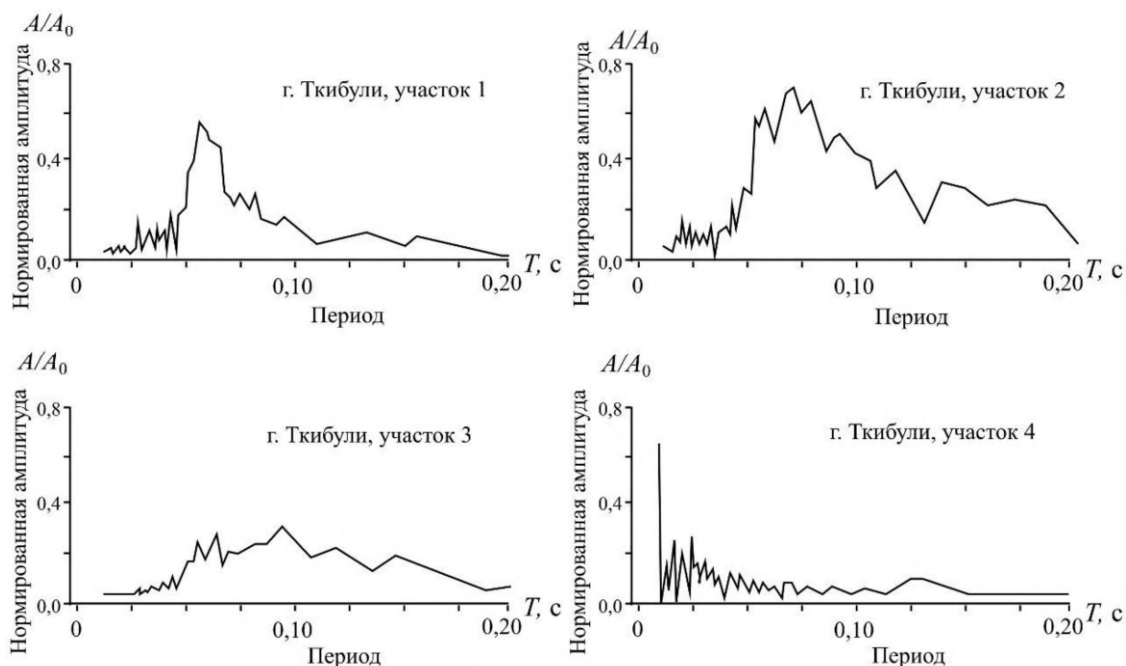


Рис. 11. Спектры колебаний возбужденных мощным вибратором СВ-10/100

Таким образом, площадь спектральной кривой непосредственно связана с физико-механическими и, следовательно, с сейсмическими свойствами грунтов, слагающих толщу. Применение вибрационных источников позволяет исследовать составляющие спектров на периодах 1-1,5 с. Увеличение длительности посылки сигналов увеличивает границы исследования частотных особенностей грунтов.

Таким образом, каждый вид источника обладает определенными особенностями воздействия. Учет подобных показателей позволит при СМР использовать тот или иной вид источника в зависимости от условий работы или детальности получения необходимых данных.

При анализе данных, полученных с помощью маломощного источника, установлено, что геометрические размеры грунтовой толщи влияют на спектральный состав возбуждаемых колебаний незначительно. Каждый вид грунта при стандартном наблюдении характеризуется определенным видом спектральной кривой и средневзвешенным значением периодов. Совокупность различных видов грунтов обуславливает существование их частотных уровней. Чем хуже грунт по своим сейсмическим свойствам, тем выше средневзвешенное значение периодов его ко-

лебаний. Это различие достигает больших значений, чем изменение соответствующих максимальных периодов.

Если грунт подстилается плотными грунтами, то его средневзвешенный период колебаний с расстоянием уменьшается, а если рыхлыми – увеличивается. Спектральная кривая в области максимальных значений амплитуд имеет треугольную форму, с расстоянием (0-20 м) мало изменяющуюся. С ухудшением сейсмических свойств грунтов ширина соответствующего спектра увеличивается. Спектральная характеристика грунта – устойчивая величина для каждого его вида. Так, при перекрытии естественной насыпью ( $h=2,5$  м) спектральная характеристика (в области максимальных значений) исследуемого грунта практически сохраняется неизменной. Влияние насыпи выражается лишь добавлением в спектр колебаний длиннопериодной, представительной (по площади) области. С удалением от источника, когда деформации грунта, в основном, упругие, спектр колебаний определяется всем объемом грунта и влияние приповерхностного слоя ослабевает. Насыпной грунт практически повторяет движение подстилающего грунта и вид спектральной кривой в ее основной части аналогичен колебаниям грунта без насыпи. Влияние насыпи при этом выражается в незначительном увеличении амплитудного уровня колебаний. Это явление может быть использовано, чтобы уточнять вид и мощность грунтов на исследуемых участках. Когда подстилающие грунты рыхлые, с расстоянием спектральная кривая становится представительной и основной максимум смещается в низкочастотную область.

Уменьшение глубины стояния грунтовых вод вызывает смещение спектральной характеристики в высокочастотную область и увеличение амплитудного уровня почти в два раза при изменении глубины стояния воды от восьми до двух метров.

Анализом колебаний (грунтов), вызванных мощными невзрывными источниками, установлено, что спектральная характеристика колебаний в пределах типичного участка с определенными инженерно-геологическими условиями обладает устойчивостью как при перемещении наблюдательного пункта, так и при перемещении самого источника. При больших углах наклона границ, что для исследуемой глубины наблюдается редко, амплитуда может значительно изменяться, но форма спектральной кривой сохраняется. В случае тонкослоистых, сложно составленных грунтов могут наблюдаться общие колебания толщи как целого, что с расстоянием выглаживает вид спектральной кривой. Продольное профилирование с встречными системами наблюдений дает возможность выявить резкое изменение вида спектральной кривой.

Вид спектра колебаний, вызванных мощным источником, непосредственно связан с мощностью поверхностного слоя толщи и, чем больше мощность грунта, тем больше площадь подспектральной области. При сравнении колебаний грунтов одной мощности, наблюдается распределение спектров в различных частотных областях спектра в зависимости от вида исследуемого грунта. Наличие рыхлого приповерхностного слоя в случае импульсного источника вызывает увеличение низкочастотных составляющих спектра в непосредственной близости от зоны воздействия. С удалением от источника его влияние ослабевает и вид спектральной кривой, практически, определяется особенностями инженерно-геологического строения, физико-механических свойств и гидрогеологических условий толщи в целом.

Средневзвешенные периоды практически являются преобладающими периодами колебаний толщи соответствующей мощности. Для рыхлых грунтов на рассто-

янии 30-40 м они совпадают с преобладающими периодами ( $T_{пр} = 4H/v_s$ ) для мощности грунта  $H \approx 8-10$  м и соответствующей скорости распространения поперечной волны. С дальнейшим удалением от источника значения средневзвешенных периодов колебаний для указанных мощностей толщи незначительно увеличиваются (на расстоянии до 100 м). Для рыхлой толщи мощностью  $H = 15-20$  м средневзвешенные периоды близки к соответствующим преобладающим периодам с расстояния 30-40 м, а с удалением на 80-100 м совпадают с ними. Это объясняется тем, что с расстоянием волны охватывают все больший объем толщи.

Сопоставление результатов применения невзрывных источников, как импульсного, так и вибрационного действия позволило установить следующее.

Несмотря на то, что при использовании импульсных источников мы практически наблюдаем собственные затухающие колебания толщи, а при использовании вибрационных источников – вынужденные, реакция грунтовой толщи на стандартный сигнал сходна.

Для рыхлой толщи глинистых грунтов подспектральная область колебаний, возбуждаемых обоими видами источников, значительно превосходит подспектральную область колебаний плотной толщи. Влияние приповерхностного тонкого слоя при использовании вибрационного источника в указанном частотном диапазоне незначительно и в ближней зоне воздействия. Аналогичность конечных результатов применения обоих видов источников – основание для обобщения полученных ими данных, и повышает обоснованность результатов.

Таким образом, можно сделать вывод о высокой целесообразности использования при СМР мощных импульсных и вибрационных искусственных невзрывных источников.

### **3.1. Исследование спектральных характеристик грунтов на моделях**

Наиболее полную информацию о поведении исследуемого объекта при различного вида внешних воздействиях можно получить при натуральных экспериментальных исследованиях. Но при таких исследованиях, практически, невозможно изменять какие-либо параметры натурального объекта: изменение инженерно-геологического строения толщи, гидрогеологических условий и т.п. Кроме того, увеличение, например, силового воздействия также связано с определенными техническими трудностями и экономическими затратами. Существует различного вида моделирование: наглядное; символическое (знаковое); математическое мысленное; натурное; физическое и аналого-цифровое моделирование [Аракелян и др., 2008; Веников, 1976].

Для наших целей более всего подходит физическое моделирование, характеризуемое прежде всего тем, что исследования проводят на установках, обладающих физическим подобием, т.е. сохраняющих полностью (или хотя бы в основном) природу явлений. При этом по характеристикам модели можно получить все характеристики оригинала пересчетом с помощью масштабных коэффициентов.

Основная цель моделирования – исследовать спектральные особенности колебаний грунтовой толщи, сложенной различного вида грунтами.

В качестве оригиналов были выбраны инженерно-геологические разрезы двух типичных участков территории г. Рустави, на которых при СМР, колебания возбуждали мощным импульсным источником. В моделях использовали соответствующие

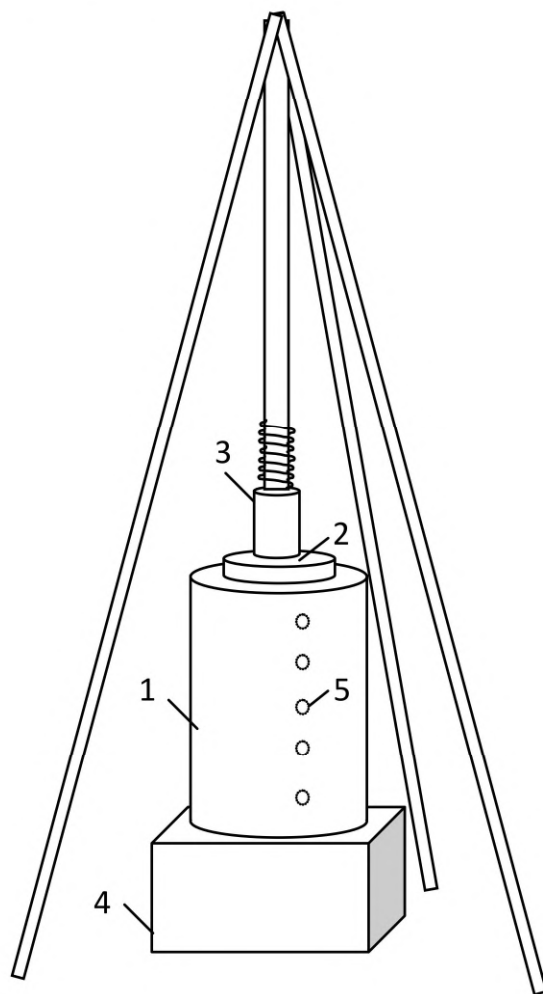


Рис. 12. Исследование спектров колебаний на моделях: оборудование эксперимента.  
Ударный вибростенд: 1 – цилиндрический шаблон; 2 – диск; 3 – ударник; 4 – постамент;  
5 – датчики

грунты участков, т. е. имели простое подобие, что существенно упрощает задачу. Соотношения подобия для такой модели при любом сложном напряженном состоянии будут автоматически выдерживаться, поскольку для модели и оригинала связь между напряжениями и деформациями тождественна в сходственных точках ( $\sigma_m = \sigma$ ,  $\varepsilon_m = \varepsilon$ ) и все параметры зависят лишь от масштабного коэффициента  $\zeta$  [Веников, 1976].

Чтобы исключить влияние формы модели на конечные результаты и достичь равномерного динамического воздействия, использовали цилиндрическую форму. Система слоев грунтов, слагающих толщу, малоустойчива, и чтобы придать модели определенную форму, модель составлялась в специальном цилиндрическом шаблоне. Основание шаблона находилось в жесткой связи с бетонным постаментом. Чтобы исключить влияние отраженных волн от боковых стенок шаблона, стенки покрывали тонким фигурным поролоном. Мощности слоев грунтов и величину динамического воздействия избирали, учитывая размеры шаблона и масштабный коэффициент. Датчики давления располагали на соответствующих слоях грунтов модели. Воздействие осуществляли с помощью специального ударного вибростенда (рис. 12).

Чтобы уменьшить местные пластические деформации, удар производили по металлическому диску (рис. 12). Грунты отбирали в местах проведения натуральных исследований. Схемы составления физических моделей производились с учетом масштабного коэффициента и реальных разрезов прототипов конкретных участков (рис. 13). Спектральные характеристики рассчитывали из полученных сейсмограмм (рис. 14). Анализом экспериментального материала установлено следующее:



Рис. 13. Исследование спектров колебаний на моделях:  
Схемы составления моделей толщи

- вид спектральной характеристики (рис. 14) находится в непосредственной зависимости от мощности рыхлого однородного слоя; чем больше мощность, тем больше подспектральная область;
- с увеличением силы воздействия спектр смещается в низкочастотную область;
- каждый вид грунта характеризуется определенной спектральной характеристикой колебаний;
- спектральная характеристика колебаний устойчива с глубиной;
- вид спектральных кривых колебаний модели аналогичен спектрам натуральных наблюдений на соответствующих прототипах моделей.

На основе приведенных данных можно сделать заключение о перспективности исследований на моделях. Вариация инженерно-геологического строения места приложения нагрузки и ее величины позволяет решать многие задачи динамики грунтов.

### 3.2. Использование численного метода для расчета спектра колебаний грунтовой толщи

Для исследования факторов, определяющих вид спектральной характеристики колебаний грунтов, вызванных мощным невзрывным источником, представляет интерес построить теоретическую сейсмограмму и получить ее спектральное разложение на основе инженерно-геологических и инструментальных данных (литологического разреза толщи; скоростей сейсмических волн и т. д.).



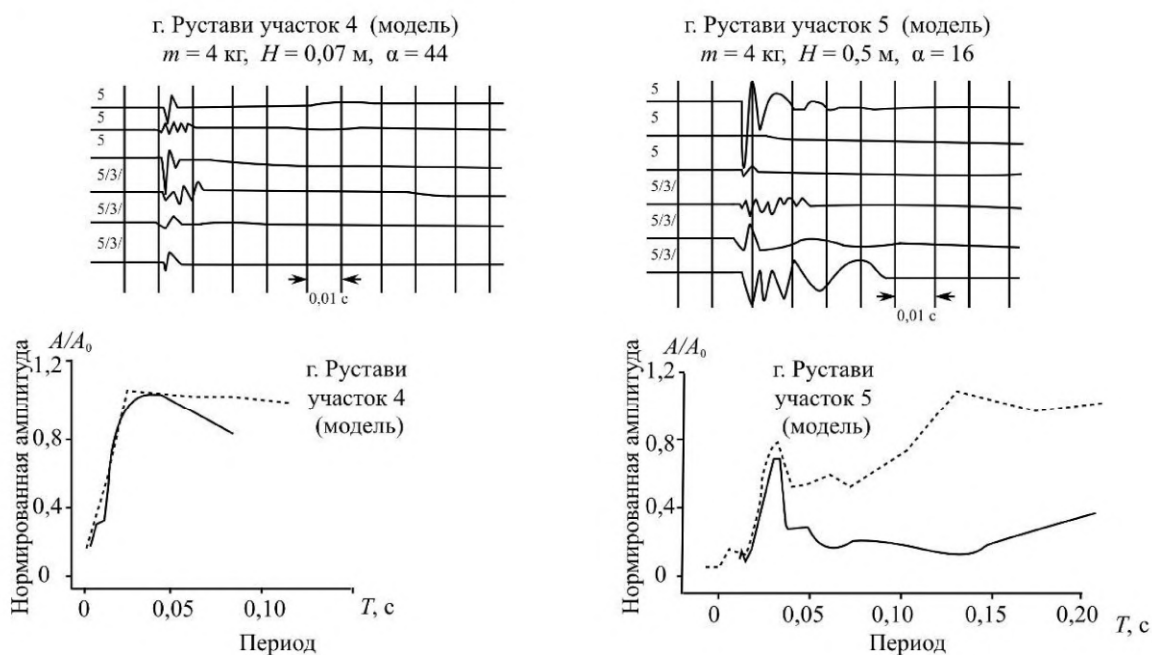


Рис. 14. Сейсмограммы колебаний грунтов и соответствующие спектральные характеристики

С этой целью с помощью программы численного решения прямой и обратной задачи инженерной сейсмологии, применяя многократно отраженные плоские волны [Напетваридзе, 1973; Напетваридзе, Одишария, 1976; Джабаури, 1979; Заалишвили, 2009], сейсмограмму колебаний грунта, зарегистрированную на поверхности типичного участка территории г. Рустави (рис. 15а) пересчитали на подстилающую коренную (скальную) породу.

Далее, вычисленную сейсмограмму для коренной породы пересчитывали на поверхность типичного участка территории г. Гори (рис. 15б). В качестве исходных данных задавали мощность слоев, плотности грунтов и скорости распространения поперечных волн, полученные экспериментально в данных конкретных грунтовых разрезах. Спектр вычисленной сейсмограммы практически аналогичен амплитудно-частотной характеристике разреза, полученной экспериментально (рис. 16). Отметим, что преобладающие инженерно-геологические условия с поверхности толщи для сопоставляемых участков (гг. Рустави, Гори) практически идентичны, а сами спектры колебаний существенно разнятся. Это, очевидно, обусловлено влиянием подстилающих видов грунтов. Соответствие расчетных и экспериментальных спектров колебаний наблюдалось и при вводе сейсмограмм колебаний скальных грунтов в основание толщи, сложенной галечниками ( $H = 14,2$  м).

Анализируя полученный материал, можно сделать следующие выводы. Установлено соответствие расчетного спектра и амплитудно-частотной характеристики грунтовой толщи. Это подтверждает обоснованность исходных данных, в частности, составления скоростного разреза толщи. Несмотря на то, что результаты расчетов практически аналогичны экспериментальным данным, тем не менее, ценность экспериментального наблюдения на конкретном участке в условиях естественного залегания грунтов несомненна. Для сложно составленных толщ наблюдаются значительные различия.

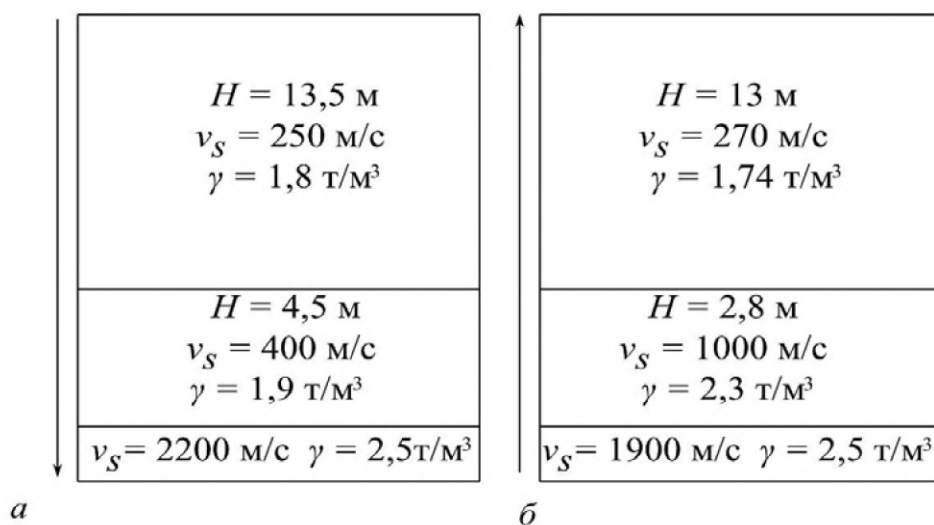


Рис. 15. Построение расчетного спектра колебаний: а – инженерно-геологический и скоростной разрезы толщи сейсмограммы; б – инженерно-геологический и скоростной разрезы толщи расчетной сейсмограммы

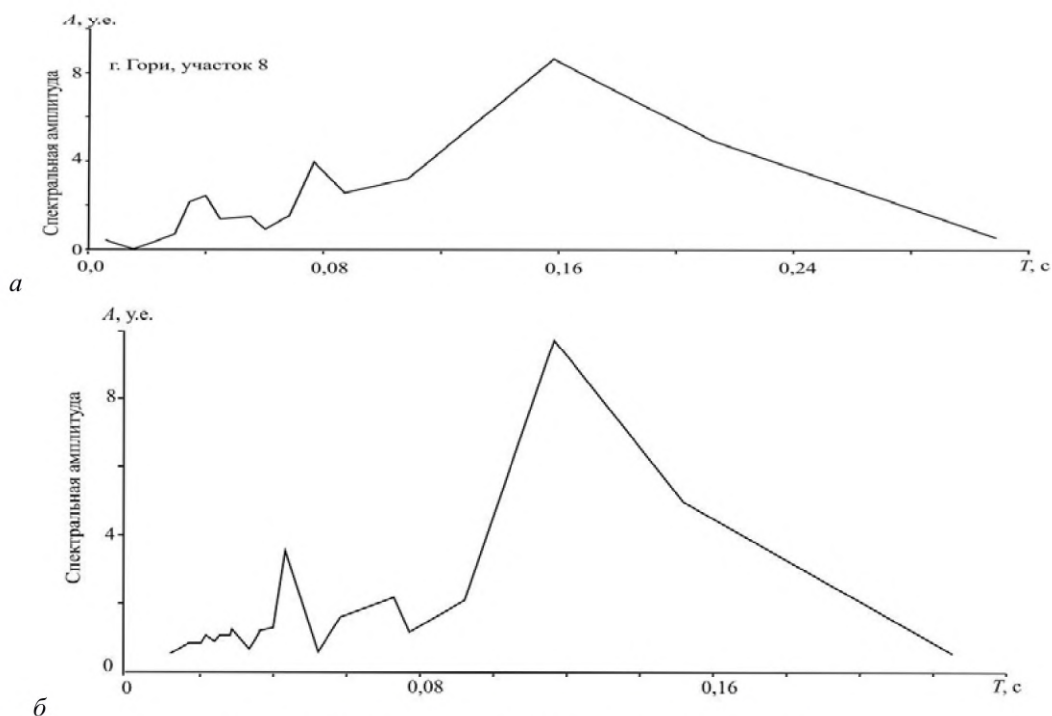


Рис. 16. Спектры колебаний на поверхности толщи: а – экспериментальный спектр; б – расчетный спектр

При анализе экспериментальных данных появляется возможность учитывать не только свойства разреза толщи, но и различные включения, осложнения грунтовых условий, негоризонтальность границ, уточнение вида грунта, его основные сейсмические характеристики и т. д. Но самое главное – исходные данные расчетного метода определяются именно экспериментально. Желательно, очевидно, сравнивать спектры, возбужденные мощным невзрывным источником, с расчетным спектром землетрясения. В зависимости от эпицентрального расстояния, угла подхода волн,

их затухания полученные экспериментальные спектры могут быть использованы для изучения свойств реального сейсмического излучателя, его очага и т. д.

#### 4. Энергия сейсмических волн, возбуждаемых невзрывным источником. Поглощение сейсмических волн

Значительная часть энергии невзрывного источника выделяется в виде сейсмических волн. Оценим полную энергию воздействия мощного импульсного источника [Гурвич, Боганик, 1980; Коган, 1967], которая составит удвоенную величину кинетической энергии:

$$E = E_k + E_n = 2E_k \quad (10)$$

Учитывая, что масса активной части импульсного источника (СИ-32)  $m=553$  кг и скорость воздействия  $v \approx 13$  м/с, рассчитаем кинетическую энергию источника:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \approx 50 \text{ кДж.} \quad (11)$$

Энергия источника, излучаемая в виде сейсмических волн, может быть оценена через спектр возбуждаемых колебаний. Общее количество энергии, протекшее за единицу времени, т. е. плотность энергии, составляет:

$$\varepsilon = 2\pi^2 \rho \int_0^t v_s \left( \frac{A}{T} \right)^2 dt, \quad (12)$$

где:  $\rho$  – плотность среды;  $v_s$  – скорость поперечной волны;  $A$  – амплитуда волны;  $T$  – период колебаний.

В связи с тем, что смещение – сложная функция времени, заменим для упрощения интегрирование суммированием, разбивая запись на группы. В пределах группы имеем синусоидальное колебание с постоянными амплитудой и периодом. Тогда получим:

$$\varepsilon = 2\pi\rho v_s \sum (A_i / T_i) A t_i. \quad (13)$$

Полный вектор амплитуды  $A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$ .

Если представим источник в виде сферы, то энергию источника можно рассчитать по формуле:

$$E = 2\pi R^2 \varepsilon, \quad (14)$$

где  $R$  – расстояние от источника.

Рассчитаем энергию волны по полному спектру колебаний на участке, сложенном мощными рыхлыми грунтами ( $H = 14$  м) на расстоянии  $R = 2,5$  м от источника. Фрагмент спектра представлен на рис. 17а. Полная длительность колебаний достигает  $t = 0,63$  с (кривая 1). Вся энергия достигает значения  $E = 27300$  Дж, что составляет 55% от возбуждаемой энергии в точке воздействия. Для скальной породы (фрагмент спектра на рис. 16в) энергия достигает  $E = 35400$  Дж, т. е. до 70% всей энергии переходит на скальной породе в энергию сейсмической волны.

#### 4.1. Поглощение сейсмической энергии

Определение коэффициентов поглощения – достаточно сложная задача [Берзон и др., 1963; Васильев, 1951; Горяинов, Ляховицкий, 1979; Максимов, Николаев, 1965; Николаев, 1963; Ризниченко, 1956; Заалишвили, 1990]. При этом, как прави-

ло, большинство данных получено для высокочастотного диапазона (50-100 Гц). При определении коэффициентов поглощения наличие мощных источников многократного действия позволило снизить диапазон частоты в сторону реальных частот землетрясений (рис. 17).

Коэффициенты поглощения определяли по амплитудным спектрам зависимости разности коэффициентов от частоты [Берзон и др., 1963]:

$$\alpha_{f_1} - \alpha_{f_2} = \frac{\ln(\varphi_{x_1} / \varphi_{x_2})}{x_2 - x_1}, \quad (15)$$

где:  $\varphi_{x_1}$  – отношение амплитуд составляющих спектра, полученных на базе  $x_1$ ;  $\varphi_{x_2}$  – отношение амплитуд составляющих спектра на базе  $x_2$ .

Коэффициент поглощения  $\alpha$  значительно зависит от частоты. Так, для рыхлых суглинков на частоте  $f_1 = 50$  Гц,  $\alpha_1 = 0,3$ , тогда как для частоты  $f_2 = 10$  Гц,  $\alpha_2 = 0,08$ . Для скальных грунтов при тех же частотах имеем  $\alpha_1 = 0,07$ ,  $\alpha_2 = 0,003$ , соответственно. На рис. 18 приведены примеры расчета коэффициентов поглощения в глинистых грунтах. Для скальных грунтов зависимость  $\alpha$  ( $f$ ) имеет сложный вид (рис. 19б)

Отметим, что коэффициенты поглощения для ближней и дальней зон источника различны. Это объясняется высоким показателем поглощения энергии из-за пластических деформаций вблизи зоны воздействия.

Коэффициент поглощения можно рассчитать и другим способом. Пусть к поверхности однородной грунтовой толщи мощностью  $H$  прилагается вертикально ориентированное динамическое воздействие  $F(t)$  невзрывного источника. При падении волны на кровлю коренной породы будут наблюдаться явления отражения и преломления волны.

Рассмотрим характер многократного отражения сейсмической волны в поверхностной толще грунта [Напетваридзе, 1973; Kanai, 1952]. Учитывая, что акустическая жесткость поверхностной грунтовой толщи намного меньше жесткости коренной породы  $\rho_1 v_1 \ll \rho_2 v_2$ , допускаем, что коэффициент преломления волны через кровлю коренной породы  $\alpha_0 \approx 2$ , а коэффициент отражения на поверхности границы с воздухом  $\beta \approx 1$ . Тогда волна, достигающая кровли  $F_0(t)$  отражаясь и преломляясь, возвращается на поверхность в виде  $F_1(t)$ . После многократных повторений процесса получаем рекуррентные соотношения:

$$F_0^1 = e^{-kH} F \left( t - \frac{H}{v_s} \right), \quad (16)$$

$$F_0^2 = 2 e^{-2kH} \beta_0 F \left( t - \frac{2H}{v_s} \right), \quad (17)$$

$$F_0^3 = 3 e^{-3kH} \beta_0 F \left( t - \frac{3H}{v_s} \right), \quad (18)$$

$$F_0^4 = 4 e^{-4kH} \beta_0^2 F \left( t - \frac{4H}{v_s} \right), \quad (19)$$

$$F_0^5 = 4 e^{-5kH} \beta_0^2 F \left( t - \frac{5H}{v_s} \right), \quad (20)$$

$$F_0^6 = 8 e^{-6kH} \beta_0^3 F \left( t - \frac{6H}{v_s} \right), \quad (21)$$

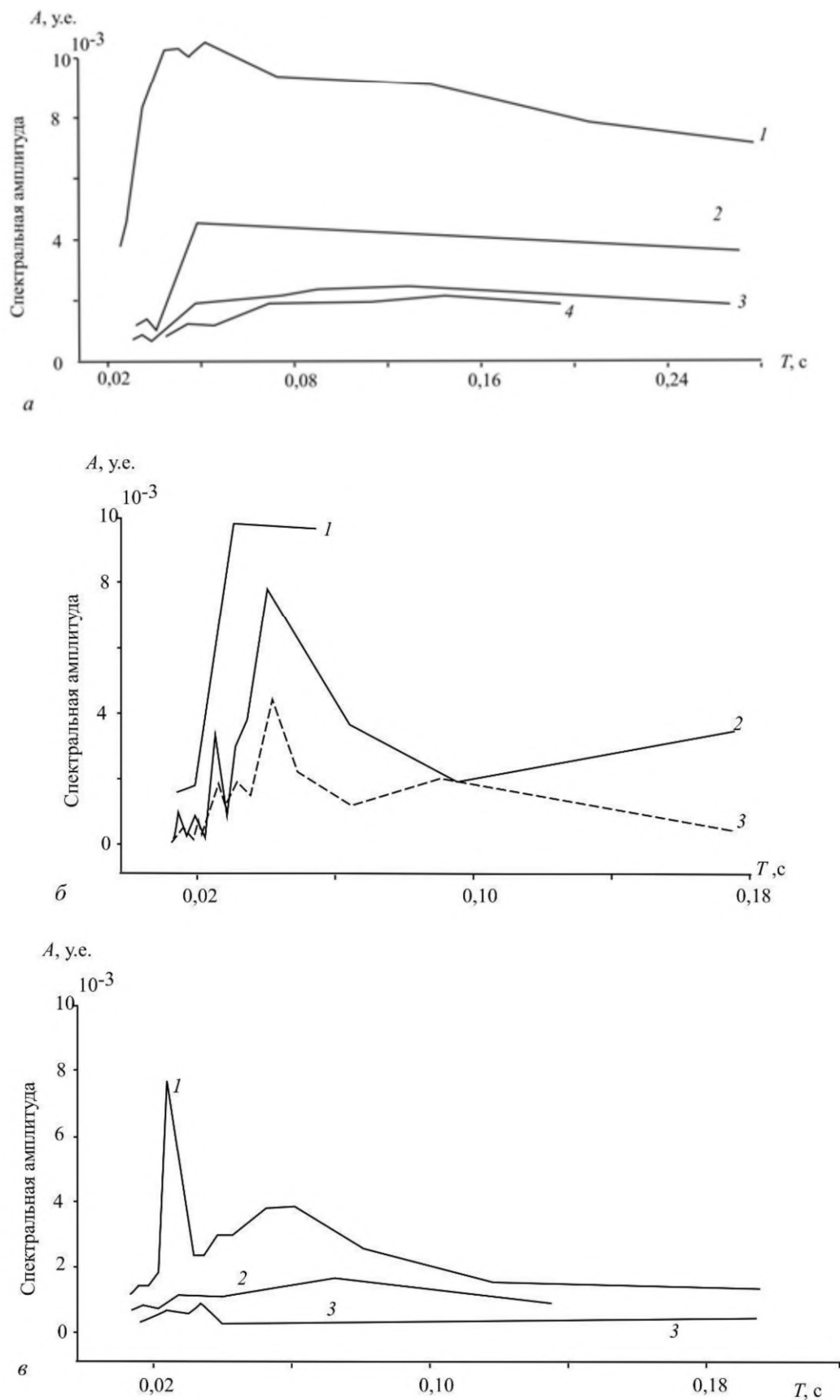


Рис. 17. Изменение амплитудного уровня спектра колебаний с расстоянием: а – суглинки; б – галечники; в – скальные грунты с поверхности выветрелые

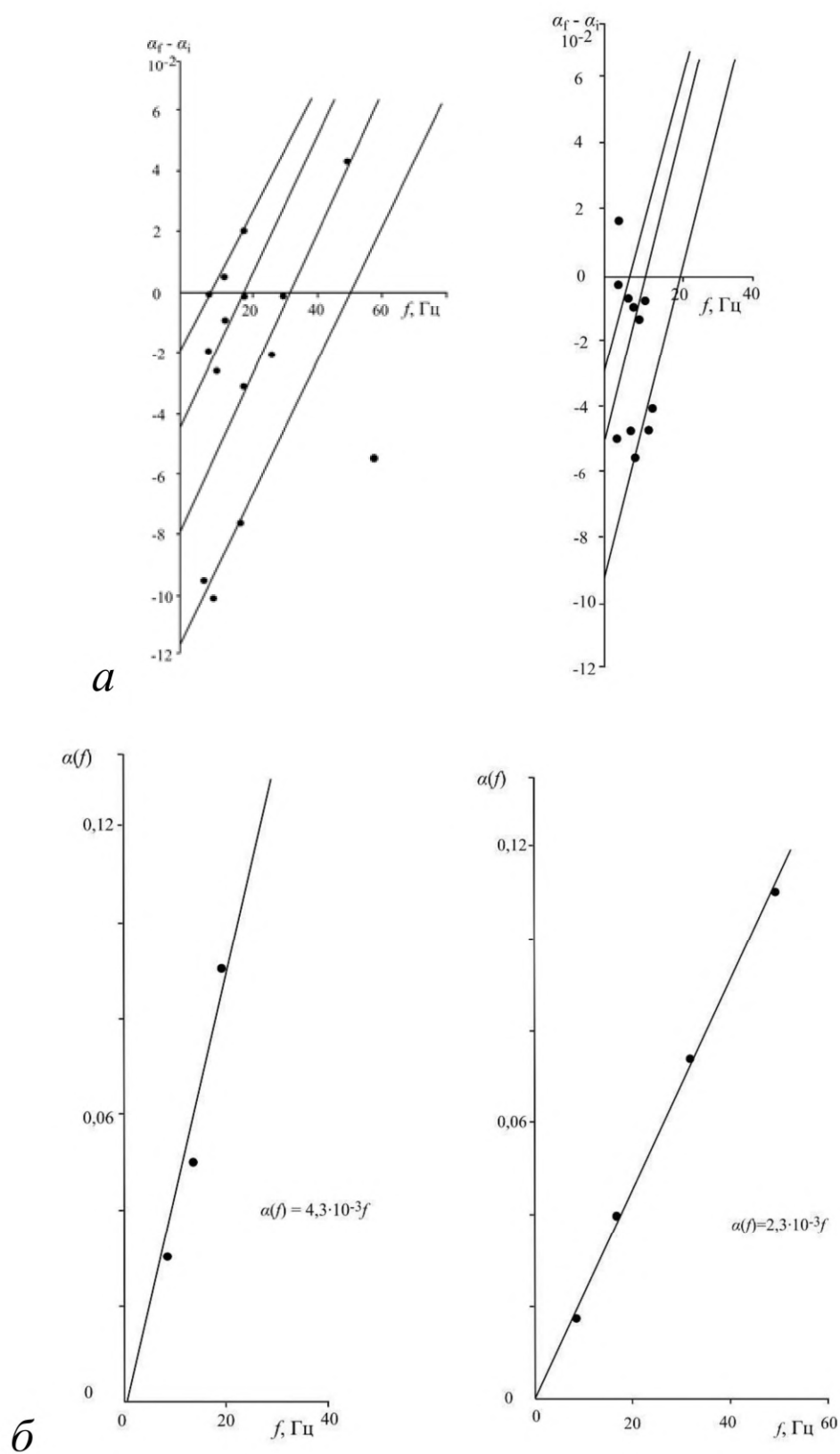


Рис. 18. Поглощение энергии сейсмических волн в глинах  
 а – зависимость  $(\alpha_{f_1} - \alpha_{f_2})$  от частоты  $f$ ;  
 б – зависимость коэффициента поглощения от частоты (для ближней и дальней зоны)

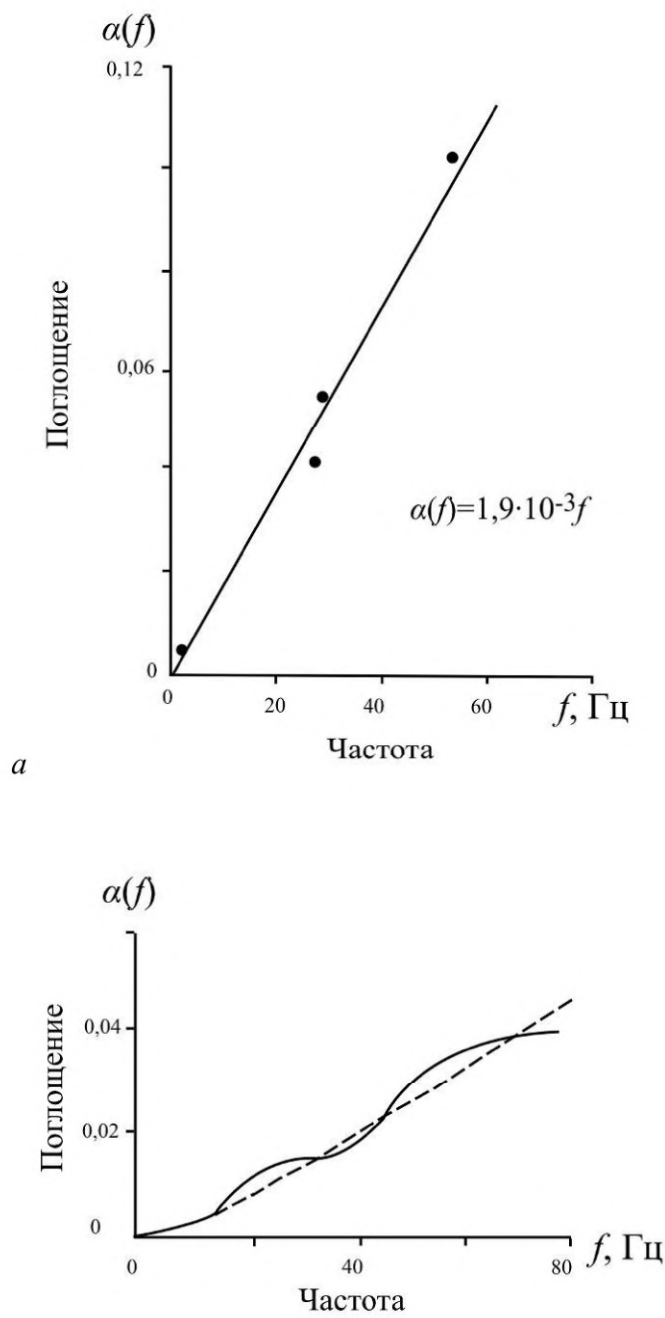


Рис. 19. Зависимость коэффициента поглощения от частоты:  
 а – крупнообломочные грунты; б – скальные грунты

$$F_0^7 = 4e^{-7kH} \beta_0^3 F \left( t - \frac{7H}{v_s} \right). \quad (22)$$

Запишем отдельно выражение для волны, многократно падающей вниз и многократно выходящей на поверхность:

$$F_0(t) = e^{-kH} \left[ F \left( t - \frac{H}{v_s} \right) + 2e^{-2kH} \beta_0 F \left( t - \frac{3H}{v_s} \right) + \right. \\ \left. + 4e^{-4kH} \beta_0^2 F \left( t - \frac{5H}{v_s} \right) + 8e^{-4kH} \beta_0^3 F \left( t - \frac{7H}{v_s} \right) + \dots \right] \quad (23)$$

$$F(t) = 2e^{-2kH} \left[ F\left(t - 2\frac{H}{v_s}\right) + 2e^{-2kH} \beta_0 F\left(t - \frac{4H}{v_s}\right) + 4e^{-4kH} \beta_0^2 F\left(t - \frac{6H}{v_s}\right) + \dots \right]. \quad (24)$$

Учитывая, что  $|\beta_0| < 1$ ,  $e^{-2kH}$ , ряд (24) – сходящийся и тогда можно написать с достаточной точностью:

$$F(t) \approx 2e^{-2kH} \beta_0 F\left(t - \frac{2H}{v_s}\right), \quad (25)$$

$$F\left(t + \frac{2H}{v_s}\right) \approx 2e^{-2kH} \beta_0 F(t), \quad (26)$$

$$\frac{F(t)}{F\left(t + \frac{2H}{v_s}\right)} = \frac{1}{2\beta_0} e^{2kH}, \quad (27)$$

$$k = \frac{1}{2H} \ln \left[ 2\beta_0 \frac{F(t)}{F\left(t + \frac{2H}{v_s}\right)} \right]. \quad (28)$$

Таким образом, получена формула для расчета коэффициента поглощения ( $k$ ).

Рассчитаем коэффициент поглощения для грунтов участка, сложенного с поверхности мощной толщей суглинков ( $H = 13,5$  м) с показателями  $v_s = 250$  м/с,  $\rho = 1,8$  т/м<sup>3</sup>; для подстилающей коренной породы  $v_s = 2200$  м/с,  $\rho = 2,5$  т/м<sup>3</sup>, шаг расстановки  $x = 15$  м ( $h \approx x$ ). Сопоставляя максимальные амплитуды для  $T = 0,06$  с и  $A(t) = 11$ ;  $A\left(t + 2x/v_s\right) = 4$  (рис. 17) и, рассчитывая  $\beta_0 = 0,849$ , получим, что показатель поглощения сейсмической энергии составит  $k = 0,057$  м<sup>-1</sup>.

Рассчитаем коэффициент поглощения сейсмической энергии толщи по полученным зависимостям коэффициента поглощения от частоты (рис. 17б) для  $T = 0,06$  с ( $f = 17$  Гц):

$$\begin{cases} \alpha_1(f) = 4,3 \cdot 10^{-3} f & (\text{ближняя зона}), \\ \alpha_2(f) = 2,3 \cdot 10^{-3} f & (\text{дальняя зона}). \end{cases}$$

Подставляя частоту 17 Гц, получим  $\alpha_1(f) = 0,071$  м<sup>-1</sup> и  $\alpha_2(f) = 0,038$  м<sup>-1</sup>, причем, их среднее значение составит  $\overline{\alpha(f)} = 0,056$  м<sup>-1</sup>. Сопоставляя полученные данные для  $k$  и  $\overline{\alpha(f)}$ , видим их соответствие. Рассчитывая поглощения для совокупности спектров колебаний грунтов можно также составить зависимость  $k(f)$ . В работе не ставилась задача специально изучать коэффициенты поглощения в различных видах грунтов. В то же время показана возможность непосредственно определять коэффициенты поглощения в относительно низкочастотной области измерений.

Отметим, что при использовании в качестве источников колебаний грунтов вибрационных установок, данные будут более обоснованными. При этом получить данные будет проще. Так, последовательно посылая монохроматический сигнал



различной частоты в грунтовую толщу, при регистрации его на различных расстояниях от источника можно по изменению амплитудного уровня получать зависимость поглощения энергии от частоты в различных видах грунтов. Чтобы повысить достоверность данных, можно использовать встречные системы наблюдений.

В связи с этим интересно рассмотреть изменение площади нормализованного спектра колебаний при изменении величины динамического воздействия. Если возбуждать колебания грунтовой толщи одновременно четырьмя источниками СИ-32, то спектр колебаний толщи суглинков значительно изменяется (рис. 20), причем, область огибающей спектра увеличивается почти в 4 раза:

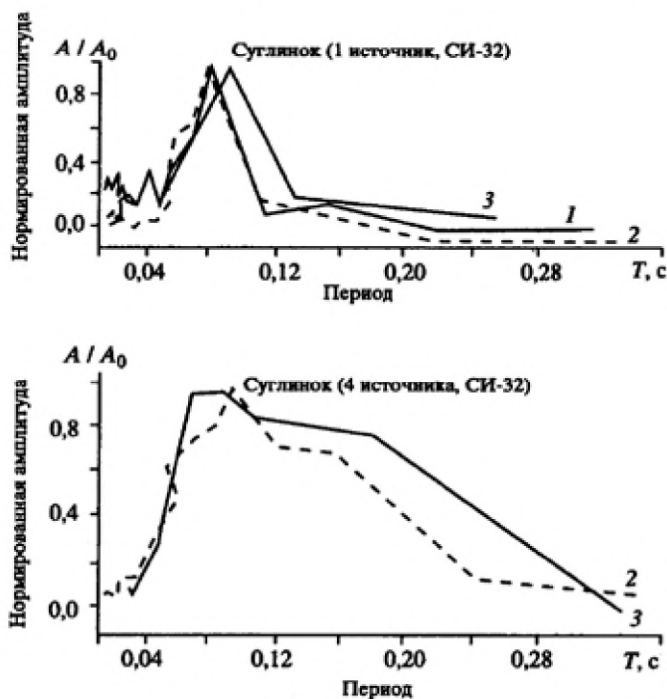


Рис. 20. Спектры колебаний, возбуждаемых источником СИ-32  
а – один источник; б – четыре источника

Отметим, что источники достаточно большие и в связи с этим не могут располагаться достаточно близко, поэтому практически исключено появление больших пластических деформаций. С другой стороны, очевидно, вполне может иметь место локальная упругая нелинейность реакции грунтов для каждого конкретного источника.

Обводнение глинистых и крупнообломочных грунтов вызывает сужение спектра колебаний. Тем не менее, изменение воздействия вызывает аналогичное приращение площади спектра колебаний грунта.

## 5. Установление инженерно-геологического разреза грунтовой толщи и ее гидрогеологических условий

При проведении СМР даже при наличии инженерно-геологической карты районизируемой территории для инструментальных наблюдений необходимо уточнять мощность слоев грунтовой толщи и их литологический состав.

Дело в том, что площадное инженерно-геологическое картирование не в состоянии дать все микрорусловия даже одного какого-либо типичного участка. Как пра-

вило, это – обобщающие изыскания и увеличение детальности исследования влечет большие материальные затраты. Инженерно-геологический разрез представляется наиболее реальным для различного рода исследований непосредственно вблизи скважины (шурфа). С удалением от нее можно ожидать как изменения мощности грунтовой толщи, так и литологического состава слоев. Аналогичное положение наблюдается и при установлении уровня стояния грунтовых вод. Кроме того, изменения этого уровня (в зависимости, например, от времени года) могут быть подвержены весьма заметным перепадам и это тогда, когда величина глубины стояния грунтовых вод значительно влияет на результаты расчетов.

Мощность слоев, как показано ранее, достаточно точно рассчитывается по известным формулам. Использование встречных систем наблюдения повышает достоверность данных. Учитывая, что скорость продольной волны скачкообразно увеличивается на глубине стояния грунтовых вод, при постоянной или даже уменьшающейся скорости поперечной волны, установление инструментальными способами глубины стояния грунтовых вод (или уточнения) решается также более или менее достоверно. Тем не менее, чтобы уточнить инженерно-геологические и гидрогеологические условия местности не лишне, а иногда, может быть, и необходимо (особенно при уточнении литологического состава слоев толщи) использовать дополнительные косвенные признаки.

Каждый вид грунта характеризуется конкретным отношением значений скоростей распространения поперечных волн к скоростям продольных  $\gamma = v_s/v_p$ , а также соответствующим распределением скоростных характеристик.

Таблица 1

**Отношение  $\gamma$  для ряда грунтов**

Вид грунта	Галечники	Пески	Суглинки	Глины
Неводонасыщенный	0,6-0,7	0,5-0,7	0,3-0,55	0,1-0,35
Водонасыщенный	0,1-0,2	0,07-0,2	0,05-0,15	0,05-0,12

В табл. 1 приведены значения  $\gamma$  для наиболее распространенных видов грунтов [Горяинов, Ляховицкий, 1979]. Учитывая полученные в настоящей работе распределения скоростей в различных видах грунтов, эту градацию можно сделать еще более детальной. Тем более, что в одном ряду табл. 1 находятся, например, пластичные и твердые глины, или галечники с песчаным заполнителем в количестве более и менее 30%.

Дополнительно к этому в качестве показателя литологического состава грунта можно использовать изменение средневзвешенных значений периодов колебаний от стандартного источника. Учитывая расстояния, на которых проявляются указанные изменения, можно непосредственно исследовать влияние подстилающего (преломляющего слоя) и мощность толщи также на спектральный состав колебаний (рис. 20).

Как отмечал еще [Левшин, 1961], разделение галечников и песков возможно лишь «путем исследования их видимых частот». Дело в том, что при нахождении в водонасыщенном состоянии галечники (с песчаным заполнителем более 30%) и пески характеризуются близкими по величине скоростями распространения в них продольной и поперечной волн. Кроме того, отношение  $\gamma$  также не позволяет однозначно разделить их. С другой стороны, по данным спектрального анализа ширина

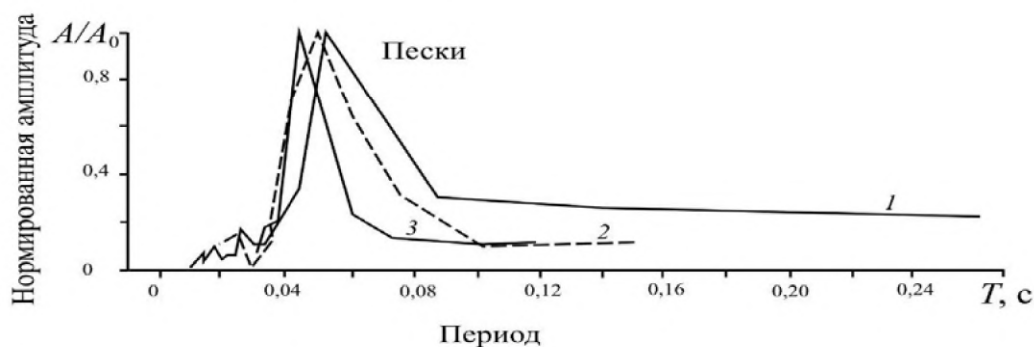


Рис. 21. Спектральная характеристика песков:  
1, 2, 3 – номера каналов

спектра песков больше ширины спектров галечников в 1,5-2 раза (рис. 8 и рис. 21), при этом вид спектральной кривой – вполне устойчивая характеристика.

Перекрывая подстилающий слой насыпным, рыхлым грунтом, возможно, однозначно выделять литологический состав подстилающего грунта при однотипных, стандартных измерениях (рис. 8 и рис. 10).

Наличие большого количества признаков того или иного состояния исследуемого объекта [Гольцман, 1976, 1980, Онофраш, 1981], т.е. косвенных признаков ( $v_s$ ,  $v_p$ ,  $\gamma$ ,  $T_{св}$ ,  $\alpha$  ( $f$ )), позволяет, пронумеровывая возможные состояния объекта (суглинки пластичные, галечники с песчаным заполнителем более 30%, и т.д.), составить вероятностные таблицы с формализованными исходными данными ( $v_s$ ,  $v_p$  и т.д.). Это даст возможность с высокой достоверностью решать задачи установления инженерно-геологического разреза малоисследованной территории. Основная сложность здесь в дискретизации признаков, их весового состава в вероятностной таблице. Исследования в данном направлении необходимо продолжить.

Таким образом, применение мощных невзрывных источников и увеличение количества косвенных признаков существенно повышает достоверность и надежность оценок инженерно-геологических и гидрогеологических условий районируемой территории.

## Выводы

- Каждый вид грунта независимо от энергии воздействия при стандартных наблюдениях характеризуется определенного вида спектральной кривой. С ухудшением сейсмических свойств подспектральная область увеличивается. При уменьшении уровня стояния грунтовых вод максимальные значения амплитуд спектральной кривой смещаются в высокочастотную область, и амплитуды колебаний увеличиваются. Наблюдается хорошая устойчивость спектральных характеристик колебаний грунта при перемещении источника.

- Маломощные источники не позволяют использовать спектральные характеристики возбуждаемых ими колебаний для оценки влияния изменения мощности грунтовой толщи. В то же время с удалением от источника подобного вида спектральная кривая несет информацию о свойствах подстилающих грунтов. Так, если подстилающие грунты плотные, то спектр смещается в высокочастотную область и наоборот. Спектр имеет простую треугольную форму в области максимальных значений амплитуд. Отметим, что ширина и вид спектра сохраняются даже при трехме-

тровом перекрытии рассматриваемых грунтов насыпью. Получены корреляционные зависимости между скоростью поперечной волны и средневзвешенным значением периода колебаний соответствующих грунтов и приращением балльности.

▪ Мощные источники имеют свои присущие им особенности применения. Средневзвешенные значения периодов практически близки к значениям преобладающих периодов для соответствующих толщ грунта. Источники позволяют без специальных усилительных устройств исследовать свойства толщи до глубины 15-20 м. При увеличении мощности рыхлой толщи площадь спектра соответственно увеличивается и может служить показателем сейсмических свойств грунта. Спектр колебаний грунта, возбуждаемый импульсным источником, аналогичен спектру колебаний грунтов, вызванных землетрясением в высокочастотной части спектра. Анализ спектров виброграмм показывает картину, аналогичную результатам использования импульсных источников, причем появляются побочные максимумы в более низкочастотной области ( $T \sim 1-1,5$  с).

▪ Исследования на моделях подтвердили зависимость спектральной характеристики от физико-механических свойств и мощности грунтовой толщи, и показали устойчивость спектральной кривой с глубиной.

▪ Применение численного метода позволяет получать расчетные спектры колебаний, аналогичные экспериментальным спектрам. Это доказывает обоснованность составления скоростного разреза. Показана возможность оценивать поглощающие свойства грунтов в низкочастотном диапазоне. Исследован вопрос уточнения инженерно-геологических и гидрогеологических условий. Увеличение дополнительных косвенных признаков существенно повышает достоверность конечных результатов.

▪ С помощью маломощных источников существует возможность детально исследовать, (без использования усилительных устройств) свойства грунтовой среды до глубины пять-десять метров. В то же время, мощные невзрывные источники позволяют изучать свойства, практически, всей грунтовой толщи, представляющей практический интерес для целей сейсмического микрорайонирования.

▪ Совокупность всех видов (по мощности) источников позволяет получать во всей полноте необходимую информацию о сейсмических свойствах исследуемой среды.

## Литература

1. Аракелян А.Р., Заалишвили В.Б., Макиев В.Д., Мельков Д.А. К вопросу сейсмического районирования территории республики Северная Осетия-Алания // Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и РСО-А, Заалишвили В.Б. (редактор), Владикавказский научный центр РАН и РСО-А. 2008. С. 263-278.

2. Берзон И.С., Епинатьева А.М., Парийская Г.Н., Стародубская С.П. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. Изд-во. М.: АН СССР, 1963. 511 с.

3. Васильев Ю.И. Об определении коэффициента поглощения сейсмических волн // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1951. №4. С. 31-42.

4. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1976. 479 с.

5. Гольцман Ф.М. Комплексирование наблюдений при распознавании геофизических объектов // Физика Земли. 1976. №7. 1976. С. 40-54.

6. Гольцман Ф.М. Информационная содержательность эксперимента и учет корреляции нечисловых признаков при распознавании геофизических объектов. // Физика Земли. 1980. № 10. С. 71-85.
7. Горяинов Н.И., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 144 с.
8. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1980. 551 с.
9. Джабаури Г.Г. Прямая и обратная задачи инженерной сейсмологии для грунтовой толщи с произвольным числом плоско параллельных слоев // Сообщ. АН ГССР. Тб.: Мецниереба. т.93. № 2. 1979. С. 405-409.
10. Дженкинс Г., Ватс Д. Спектральный анализ и его приложение. Т.1. М.: Мир, 1971. 316 с.
11. Ершов И.А. Сопоставление инструментальных данных о скоростях распространения волн в грунте, амплитудах и периодах для сейсмического микрорайонирования // Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1965. С. 46-60.
12. Заалишвили В.Б. Применение мощного газодинамического источника для исследования колебаний грунтовой толщи // Сообщ. АН ГССР, 1983. Т. 109. № 2. С. 345-348.
13. Заалишвили В.Б., Рогожин Е.А. Оценка сейсмической опасности территории на основе современных методов детального районирования и сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 3. С. 31-43.
14. Заалишвили В.Б. Зависимость поглощения волнового поля от вида грунтов и частоты воздействия // Материалы Междунар. конф. «Качество и надежность строительных материалов и констр. в сейсмостойком строительстве». Батуми, 2-6 мая 1990. С. 38.
15. Заалишвили В.Б., Невская Н.И. Взаимосвязь различных факторов, в том числе, сейсмических событий со сходом ледника Колка 20 сентября 2002 г. // Вестник Владикавказского научного центра. 2004 Т. 4. № 3. С. 51-56.
16. Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Макиев В.Д., Мельков Д.А. Интерпретация инструментальных данных процесса схода ледника Колка 20 сентября 2002 года // Вестник Владикавказского научного центра. 2005. Т. 5. № 3. С. 43-54.
17. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М.: – Наука, 2009. 350 с.
18. Коган Л.А. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука, 1967. 152 с.
19. Левшин А.Л. Определение уровня грунтовых вод сейсмическими методами // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 9. С. 1314-1338.
20. Максимов А.Б., Николаев А.В. Способ оценки декремента поглощения сейсмических волн // Там же. 1965. № 5.
21. Максимов А.Б. Методика микрорайонирования на основе детального изучения сейсмических свойств грунтов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1969.
22. Миндель И.Г., Мешков М.М., Трифонов Б.А. Применимость при микрорайонировании расчетных и экспериментальных частотных характеристик толщи грунтов в условиях резонанса // Сейсмическое микрорайонирование. Кишинев: Штиинца, 1979. С. 184-190.
23. Напетваридзе Ш.Г. Некоторые задачи инженерной сейсмологии. Тбилиси: Мецниереба, 1973. 164 с.

24. Напетваридзе Ш.Г., Одишария А.В. Исходные данные для применения расчетных способов в сейсмическом микрорайонировании // Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1976. с. 151-157.

25. Николаев А.В. Вопросы детального изучения сейсмических характеристик грунтов в естественном залегании // Труды Ин-та физики Земли Ан СССР. 1963. М 25 (192).

26. Онофраш Н.И. Статистические методы картирования сейсмической опасности. Кишинев: Штиинца, 1981. 86 с.

27. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. М.: Госстрой СССР, 1985. 72 с.

28. Ризниченко Ю.В. О расхождении и поглощении сейсмических волн // Труды геофиз. ин-та. 1956 №35 (162).

29. Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная сейсморазведка с невзрывными источниками колебаний. М.: Недра. 1980. 205 с.

30. Kanai K. Relation between the nature of surface layer and the amplitudes of earthquake motions // Bul. Earthquake Res. Inst. No 30. Tokyo Univ. 1952. Pp. 31-37.

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55475

## **DEPENDENCE OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SEISMIC WAVES ON THE STRUCTURE OF THE UPPER PART OF THE SECTION**

**© 2014 V.B. Zaalishvili, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.**

Center of Geophysical Investigations VSC RAS & RNO-A, 93a, Markov st.,  
Vladikavkaz, 363002, Russia, E-mail: vzaal@mail.ru

In the article were examine the dependence of the spectral characteristics of seismic waves on the structure of the upper part of the section. It is shown that the introduction of the value of the weighted mean period of oscillations of soils considerably increases the quality of the differentiation of the soils of different form. The results of the analysis of field data in the form of relationships for the calculations of terrain densities of different forms are given. The dependence of the spectral composition of seismic waves on the power, the physicommechanical conditions of the ground, component ground thickness, and hydrogeological conditions is examined.

The conclusion about the high expediency of use with seismic city planning of powerful pulse and vibration artificial nonexplosive sources is made on the basis of data analysis. In the work there were used the complex of the methods: field and numerical (on the physico-mathematical models) experiments, and also conducting experiments according to the analysis of the spectral characteristics of soils on the laboratory models

Special attention was given to a study of the absorption coefficients of seismic energy in different forms of soils. It is shown that use of the extended type of the indices of soils, in particular, due to the start of standard spectral characteristics makes it possible to considerably increase authenticity and reliability of the establishment of the geological engineering section of ground thickness and its hydrogeological conditions.

**Key words:** soils, spectra, analysis, seismogram, active region, the weighted mean oscillatory period, terrain density, the absorption.