

Государственный комитет РФ по высшему  
образованию  
Нижегородский научно-исследовательский  
радиофизический институт

---

П р е п р и н т N 395

ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО  
ИМПУЛЬСА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ПОВЕРХНОСТНОМ  
СЛОЕ ГРУНТА

Гущин В. В. , Заславский Ю. М. , Рубцов С. Н.

Н. Новгород  
1994.

Гущин В. В., Заславский Ю. М., Рубцов С. Н

Трансформация спектра высокочастотного импульса при распространении в поверхностном слое грунта. //Препринт N 395.

-Нижний Новгород:НИРФИ, -1994. -20с.

УДК 550.834

Излагаются результаты экспериментального исследования нелинейного эффекта трансформации спектра и формы интенсивного сейсмического импульса в диапазоне килогерцовых частот (3 кГц) при распространении в поверхностном слое грунта. Представлены данные прецизионных измерений, характеризующих генерацию субгармонических спектральных компонент на трассе распространения как основной особенности, отличающей её от аналогичных нелинейно-акустических явлений, наблюдаемых в гомогенных средах.

---

Подписано к печати 11.05.94г. Формат 60x84/16  
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1,13у. п. л.  
Заказ 5405. Тираж 50. Бесплатно

---

Отпечатано на ротапинтере НИРФИ

Повышение разрешения по глубине сейсмического геолокатора требует расширения полосы зондирующего сигнала. При этом возникают трудности с сохранением ширины полосы сигнала по трассе его распространения связанные с более высоким затуханием верхних частот. Казалось бы, потери высокочастотной части сигнала, вызванные высоким затуханием на этих частотах могут быть скомпенсированы увеличением энергетики на высоких частотах и совершенствованием системы приёма и обработки. Однако распространение зондирующего сигнала в пористой флюидонасыщенной среде, какой являются большинство реальных грунтов, накладывают свои условия на характер сигнала. При этом может наблюдаться перераспределение энергии в спектре сигнала, необъяснимые линейной теорией, а также возможно появление объёмных волны второго рода [1].

Для изучения явлений, возникающих при распространении высокочастотного сигнала в пористой влагонасыщенной среде был проведен эксперимент, заключающийся в "прозвучивании" грунта импульсными сейсмическими сигналами, распространяющимися поперёк слоёв и имеющими несущую частоту 2,9 кГц. Контроль уровня и остальных параметров сейсмоимпульсов осуществлялся в процессе их регистрации миниатюрными сейсмоприёмниками, размещёнными соосно под центром

вибратора на разных глубинах. В качестве них использовались акселерометры типа ПАМТ 4БШ (чувствительность 4 мВс/м, полоса рабочих частот 10Гц–5кГц).

Эксперимент был проведён на реальном грунте (влагонасыщенный суглинок) и продублирован в насыпном увлажнённом грунте геобассейна.

Блок-схема эксперимента приведена на рис. 1.

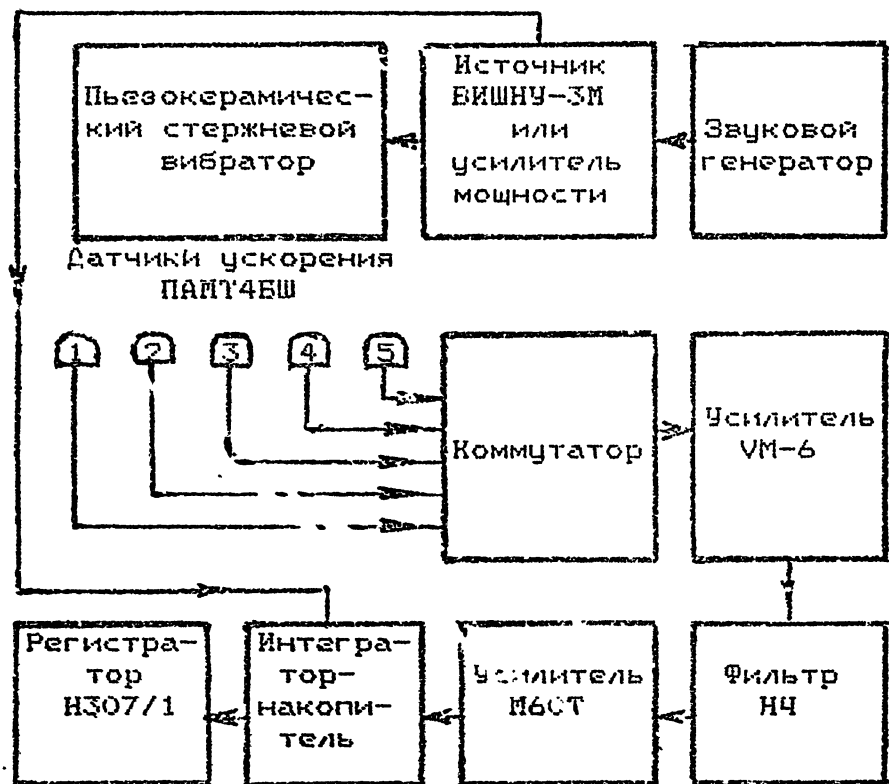


Рис. 1  
Блок-схема эксперимента.

Расположенный на грунте пьезокерамический стержневой вибратор, подгруженный весом около

50кГ, запитывался электрическим импульсом с несущей частотой 2,9 кГц, длительностью 6,89 мс (два периода колебания) и мощностью в импульсе около 1кВт. Максимальная амплитуда переменного давления на грунт, создаваемая излучателем при этом равнялась 10 Па.

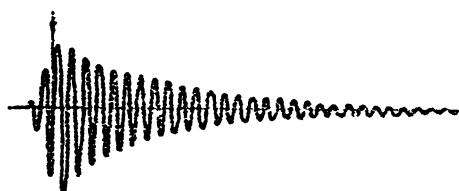
Сейсмический сигнал, генерируемый излучателем, принимался расположенными под ним на глубинах 0; 30; 47; 60 и 75 см акселерометрами типа ПАМТ4БШ. Сигналы, принятые акселерометрами, подавались через коммутатор на усилитель УМ-6, фильтр высоких частот с частотой среза 1,25кГц и суммировались на цифровом накопителе. Вид сигналов контролировался осциллографом до накопителя и регистрировался на двухкоординатном самописце с выхода накопителя.

Условия эксперимента в геобассейне практически повторяют условия натурального эксперимента за исключением несколько изменённых глубин, на которых размещены датчики и отсутствия датчика на глубине 75 см. В схеме измерений в геобассейне отсутствует фильтр высоких частот, который ранее использовался для подавления сетевых гармоник и, как показал натуральный эксперимент, срезал часть полезного сигнала. Наиболее существенное отличие заключается в том, что грунт геобассейна был менее влагонасыщен, чем натуральный суглинок.

На рис. 2 приведён вид сигналов, полученных с датчиков расположенных на разной глубине под излучателем, в эксперименте проводимом на реальном грунте. Для каждой глубины указан коэффициент усиления приёмного тракта. Усиление приёмного тракта для сигнала на рис. 2, а принято за единицу.

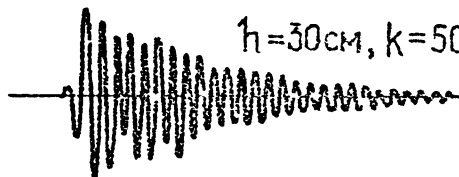
На рис. 2а изображён сигнал с датчика, расположенного на поверхности грунта непосредственно под рабочей площадкой вибратора. Сигнал, сформированный усилителем мощности, "растягивает-

$$h = 0, k = 1$$



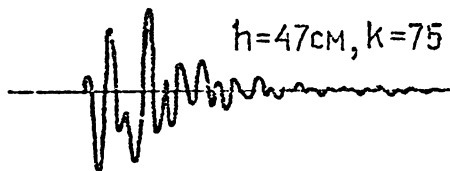
а)

$$h = 30 \text{ см}, k = 50$$



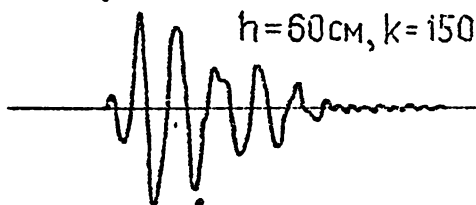
б)

$$h = 47 \text{ см}, k = 75$$



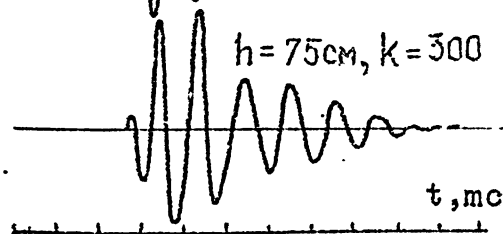
в)

$$h = 60 \text{ см}, k = 150$$



г)

$$h = 75 \text{ см}, k = 300$$



д)

Рис. 2

Вид сигналов полученных с датчиков ускорения, расположенных на глубинах 0 см (а), 30 см (б), 47 см (в), 60 см (г), 75 см (д).

ся" узкополосным излучателем и, поэтому, имеет значительно большую длительность, чем возбуждающий электрический сигнал. В то же время, в нём нет низких частот, присутствующих на рис. 2г, д. Следует обратить внимание на то, что рост амплитуды сигнала на рис. 2а продолжается после окончания электрического воздействия на вибратор (на рис. 2а момент окончания электрического импульса отмечен стрелкой). Это означает, что на мембрану излучателя, кроме прямого импульса от электрического воздействия, поступают импульсы, отражённые от тыльной стороны вибратора, которые продолжают раскачивать механическую конструкцию.

С помощью ПЭВМ был проведён спектральный анализ зарегистрированных сигналов. Его результаты, соответствующие натурному эксперименту, даются серией спектрограмм на рис. 3, а лабораторному, в геобассейне - на рис. 4.

Излучаемый сигнал (рис. 3а, рис. 4а) имеет кроме составляющей на частоте излучения 2,9кГц ряд спадающих с увеличением частоты спектральных составляющих с интервалом между ними около 450Гц. Объяснить это, повидимому, можно как наличием затухающей последовательности импульсных сигналов, образованной прямым и отраженными сигналами в вибраторе, что должно привести к изрезанности спектра сигнала, так и динамической характеристикой узкополосного излучателя при воздействии широкополосного сигнала [2].

Как видно из представленных спектрограмм, по мере распространения сейсмических импульсов в их частотном составе возникают компоненты на более низких частотах, чем несущая.

На рис. 5 приведена оценка относительной энергии низкочастотных составляющих, находящихся вне полосы излучаемого сигнала (за полосу частот излучаемого сигнала по рис. 3а, 4а принята полоса в интервале частот 2220 - 4500 Гц).

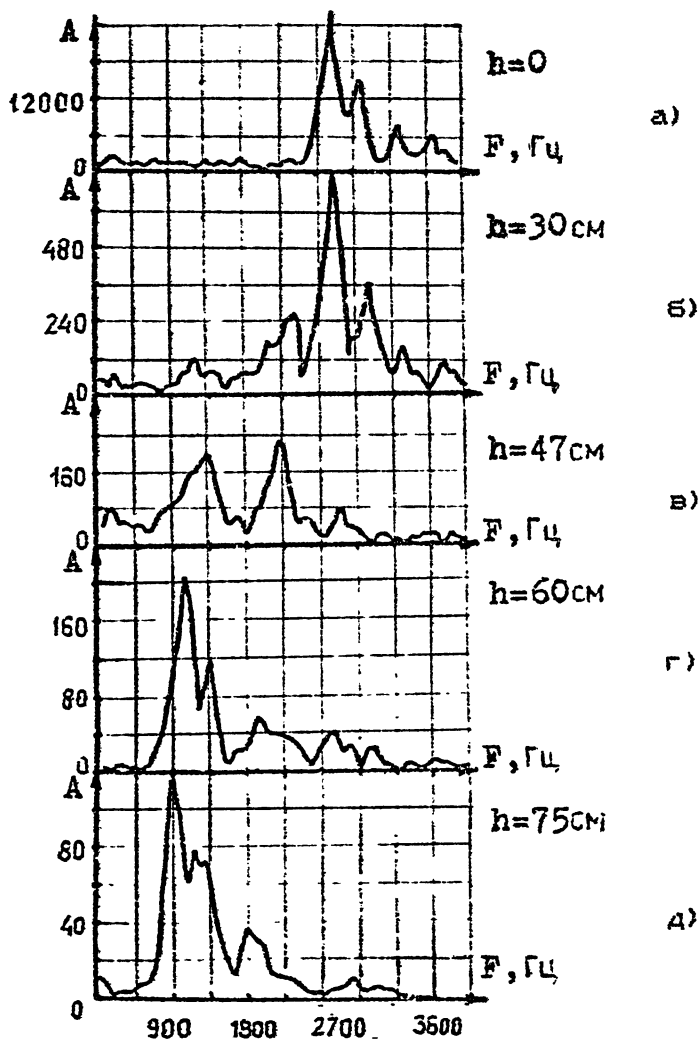


Рис. 3

Спектры сигналов датчиков, размещённых на глубинах 0 см (а), 30 см (б), 47 см (в), 60 см (г), 75 см (д).  
 Натурный эксперимент.



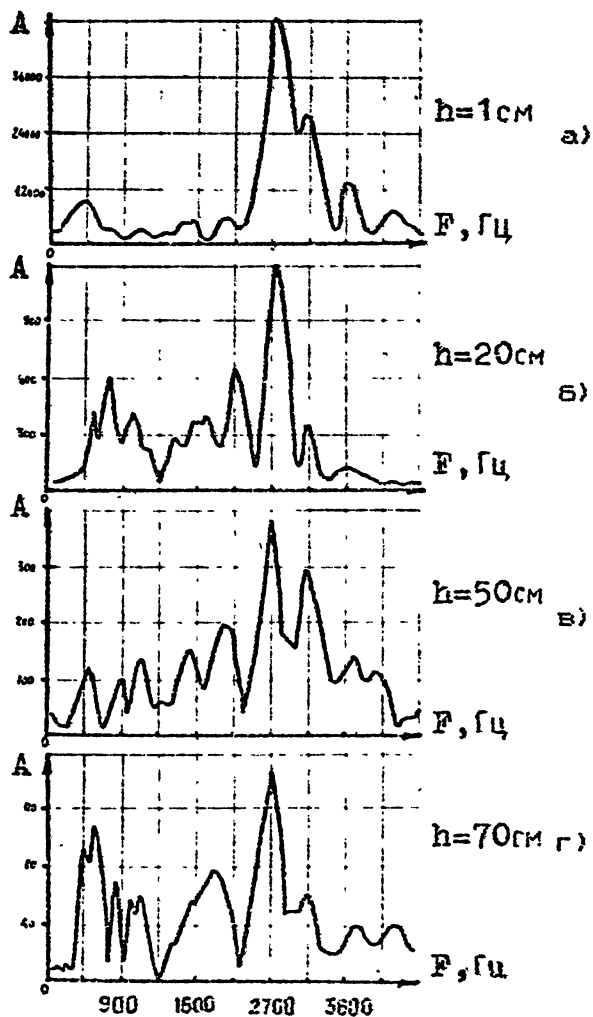


Рис. 4

Спектры сигналов датчиков, размещённых на глубинах 1см (а), 20см (б), 50см (в), 70см (г).

Эксперимент в геобассейне.

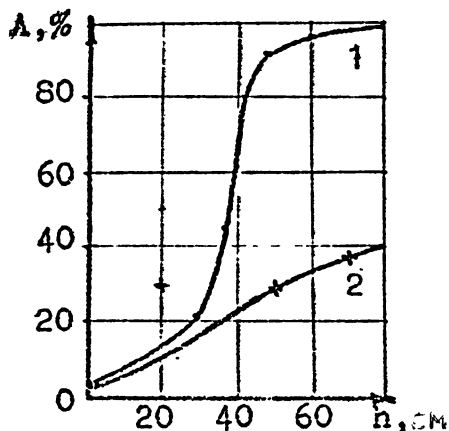


Рис. 5  
Изменение с глубиной относительного уровня энергии низкочастотных составляющих, находящихся вне полосы излучаемого сигнала.

Из графика видно, что если у сеймосигналов, принятых вблизи поверхности, вне полосы сигнала находится около 4% энергии — энергия шумов квантования, возникающих при вычислении спектра то для сеймосигналов в реальном грунте резко возрастает доля энергии в низкочастотной области спектра и на глубинах больше 60 см на низкочастотную область приходится более 90% энергии сигнала. В насыпном грунте геобассейна этот эффект менее выражен, но также заметен.

В спектрах сигналов с заглублённых датчиков наблюдается появление спектральных линий с частотами ( $F_{нес} - n \cdot 450 \text{ Гц}$ ) ( $F=2430 \text{ Гц}$ ,  $F=1980 \text{ Гц}$ ) и спектральных линий кратных разностной частоте 450 Гц (900 Гц, 1350 Гц, 2250 Гц). Линия на частоте 450 Гц не наблюдается, т. к. она срезается входным фильтром (см. рис. 1). В опытах, проведённых в геобассейне (см. рис. 4), составляющая с частотой около 450 Гц в ряде сигналов присутствует.

С глубиной идёт постепенный спад уровня высокочастотных составляющих в спектре сигнала и

перекачка энергии сигнала в низкие частоты. Рис. 3д, где приведён спектр сигнала с глубины 75 см, показывает, что в сигнале на этой глубине преобладают частоты 900 и 1350 Гц.

В опытах, проведённых в геобассейне, подобный эффект также наблюдается, хотя и менее ярко выражен.

В таблице 1 приведены в относительных единицах изменения уровней спектральных составляющих сигнала с глубиной для эксперимента на реальном грунте.

Таблица 1.

Глубина см	0	30	47	60	75
_____	А дел.	А дел.	А дел.	А дел.	А дел.
_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____
4230	6000	105	20	10	ур. шума
3780	7500	165	25	10	- " -
3330	16500	360	25	30	7,5
2880	25875	720	80	40	5
2430	2400	270	60	15	2
2250	ур. шума	195	220	40	9
1980	- " -	105	90	55	27,5
1800	- " -	75	60	40	32,5
1350	- " -	90	190	135	72,5
900	- " -	30	90	210	132,5

На рис. 6 приведены изменения с глубиной уровня составляющих сигнала (2880 Гц и 3330 Гц) и двух линий из ряда (Фнес - п\*450 Гц): 2430 Гц и 1980 Гц. Затухание определяется относительно уровня составляющей на глубине 30 см. Эта глубина выбрана из тех соображений, что она находится на границе ближнего поля (расстояние до излучателя около трёх длин волн) и затухание для этих составляющих определяется в основном поглощением, а не расходимостью. Сплошной линией

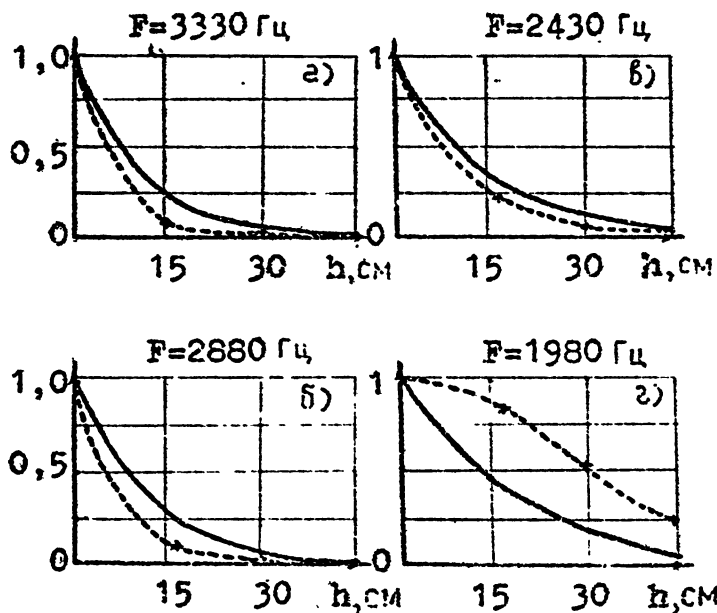


Рис. 6

Изменение с глубиной уровня спектральных составляющих сигнала на частотах 1980 Гц, 2430 Гц, 2880 Гц и 3330 Гц.

на графике показано расчётное изменение уровня спектральной составляющей при учёте поглощения в среде с декрементом затухания 0,27, который был определён для данной среды опытным путём по непрерывному сигналу. Штриховая линия показывает реальное изменение уровня спектральных составляющих. Из графика видно, что спадание сигнала с глубиной идёт для его высокочастотных составляющих быстрее, чем расчётное. Исключением является поведение составляющей на частоте 1980 Гц, которая спадает значительно медленнее, чем в расчётном случае.

Графики изменения с глубиной составляющих,

кратных 450Гц, приведены на рис. 7. За исходный

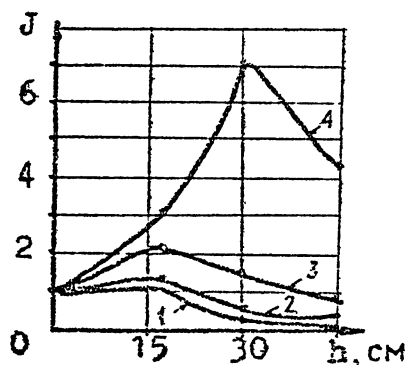


Рис. 7  
Изменение с глубиной  
уровня составляющих,  
кратных 450Гц.

$$\begin{aligned} F_1 &= 2250 \text{ Гц} \\ F_2 &= 1800 \text{ Гц} \\ F_3 &= 1350 \text{ Гц} \\ F_4 &= 900 \text{ Гц} \end{aligned}$$

уровень при этом также взят уровень спектральных составляющих на глубине 30 см. Из графиков видно, что в процессе распространения идёт подкачка энергии в эти составляющие и эта подкачка тем значительнее, чем ниже частота составляющей сигнала. Повидимому, этим и объясняется повышенный уровень затухания высокочастотных составляющих.

Такое изменение сигнала с глубиной может быть объяснено только тем, что при распространении в грунте он подвергается нелинейным преобразованиям. Подтверждением этому может быть также зависимость величины затухания от уровня сигнала. Для участка 0-30см было оценено ослабление высокочастотных составляющих сигнала. На этом участке при оценке ослабления необходимо учитывать не только поглощение сигнала в среде, но и его уменьшение, связанное с расходимостью, поэтому, величина, вычисленная по формуле декремента затухания:

$$\Theta = \frac{C \ln n}{nf(z_1 - z_2)}, \text{ где } n = \frac{A_{z_1}}{A_{z_2}}, A_{z_2} \text{ амплитуда сигнала на соответствующем уровне}$$

не является истинным декрементом затухания для данной среды, а только несет информацию об изменении сигнала с учётом частотной зависимости.

Результаты вычислений сведены в таблице 2.

Таблица 2.

Ф Гц	Уровень составляющей	Декремент затухания
4230	6000	0,305
3780	7500	0,320
3330	16500	0,366
2880	26250	0,396
2430	2400	0,286

Спектральные составляющие более высокого уровня затухают быстрее, чем менее интенсивные. Подобная закономерность наблюдается и для сигналов в геобассейне.

Нелинейные преобразования высокочастотного сейсмического сигнала в грунте при малой мощности излучаемого сигнала наблюдались авторами и раньше [3]. В этой работе, кроме наличия нелинейности в преобразовании сигнала, отмечалось также, что на глубинах около 50 см наблюдаются низкочастотные сигналы, распространяющиеся в грунте со скоростями, меньшими, чем основной сигнал.

Проблема обнаружения в рыхлых грунтах медленно распространяющихся Р-волн (волн переупаковки), поднятая в указанной работе, связана с проблемой укорочения длительности зондирующего волнового цуга до величин порядка одной - двух миллисекунд. В свою очередь, сложность в реализации короткого зондирующего сигнала связана с затягиванием во времени излучаемого акустичес-

кого цуга добротной механической системой вибратора, из-за чего волновой цуг получается значительно более длительный, чем импульс электрической запитки. В результате такого затягивания отражённые от глубинных слоёв сейсмические сигналы, как правило, попадают на "хвостовую" часть прямого (зондирующего) сигнала и маскируются им. Для укорочения зондирующей посылки был использован известный приём синхронного накопления [4]. Последний состоит в том, что в память накопителя заносится ряд реализаций, отличающихся дискретно перестраиваемой несущей частотой зондирующего волнового цуга. Полоса перестройки полностью перекрывает полосу частот вибратора -2, 5-3, 5кГц, причём начальная фаза в каждом цуге строго фиксирована. Принятые сигналы с дискретно перестроенной несущей частотой, будучи просуммированными в накопителе, на его выходе образуют "синтезированный" цуг, значительно более короткий во времени, чем каждая из исходных реализаций. Это связано с наличием когерентности в самой начальной их части, где фаза фиксирована.

Изображённая на рис. 8 группа реализаций сигнала аналогична реализациям, приведённым на рис. 2 и отличается от последних тем, что представляет синтезированные цуги. Рис. 8а, б наглядно демонстрируют значительное укорочение сигнала. На более глубоких точках (рис. 8г, д) такого укорочения уже нет, что свидетельствует об ухудшающейся "синтезируемости" сигнала, распространяющегося внутри земной среды, нарушением в нем фазовых соотношений. Наблюдается расчленение исходного зондирующего цуга на два, относительно высокочастотного, поддающегося синтезу и несинтезируемого низкочастотного, идущих с разной групповой скоростью. Если линия годографа, проведённая по точкам первого вступления, т. е. первого волнового цуга характеризуется накло-

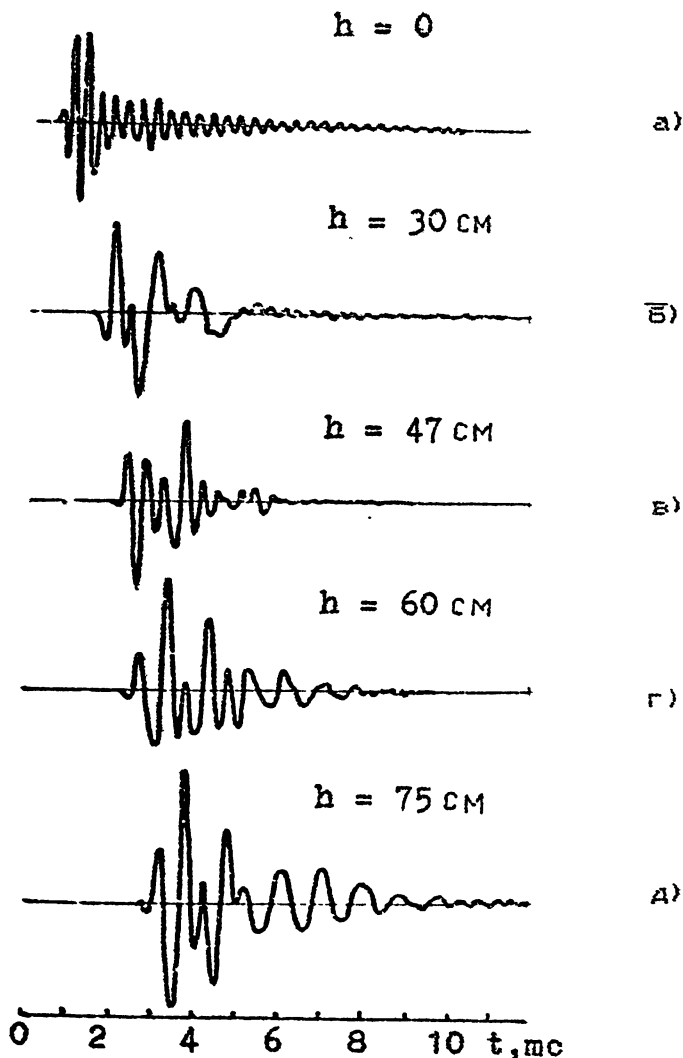


Рис. 8

Синтезированные реализации сигналов датчиков, расположенных на глубинах 0см(а), 30см(б), 47см(в), 60см(г), 75см(д). Натурный эксперимент.



ном, соответствующим скорости распространения порядка 300 м/с, то для второго цуга скорость, определённая таким же образом, получается близкой к значению 150 м/с. Из рисунка видно, что медленный цуг зарождается не на поверхности, как быстрый, а где-то на глубине около 40 – 50 см. Так как точка его зарождения не определена, построить годограф для него не представляется возможным и реальная его скорость в действительности может быть меньше 150 м/с.

Второй волновой цуг, как видно из рис. 2 и рис. 8, более низкочастотный, чем первый. Поскольку цепочка измерительных датчиков размещена вдоль оси излучателя, следует полагать наличие волнового процесса, идущего поперёк земных слоёв, что исключает присутствие многомодовых поверхностных интерференционных волн в регистрируемом сигнале. Следовательно, простейшие соображения подсказывают, что в данном эксперименте могут быть задействованы либо Р, либо S-объемные типы упругих волн. Однако, однопроцентная развязка акселерометров ПАМТ 4БШ по поперечному паразитному отклику служат аргументом в пользу Р-волны, как наиболее вероятнейшей, вызывающей реакцию акселерометра на вертикально поляризованные колебания. В таком случае, наличие двух задержанных во времени цугов волн – прямое доказательство присутствия Р-волн двух типов, т. е. Р-волн первого и второго рода.

Однако, возможно и более простое объяснение появлению низкочастотного "хвоста" у синтезированного импульса. Возможно это просто выделенная нелинейностью составляющая, частота и фаза которой не зависит от возбуждающего сигнала, а определяется конструкцией вибратора. Такой составляющей может быть, например, дискрет в исходном сигнале, появляющийся из-за переотражения сигнала в вибраторе.

Подводя итог изложенным экспериментальным

данным, авторы работы приходят к заключению о существенном отличии свойств влагонасыщенного грунта от тех, которые присущи линейно-упругим средам. Последнее обнаруживается наиболее отчетливо по крайней мере в диапазоне килогерцовых частот, когда длина волны упругих колебаний начинает по порядку величины сравниться с характерными размерами фрагментов — слипшихся или сцементированных кусков почвы. Несовершенство и значительное снижение упругих параметров среды на границах фрагментов, а также в области взаимного контакта зёрен проявляется в возникновении специфически нелинейного механизма передачи упругих колебаний по двух и даже трёхкомпонентной среде. Именно на этих частотах вероятно наступают нелинейно-гистерезисные, либо переупаковочные явления. Благодаря появлению микровращений частиц (зёрен), либо разномодульности области их контактов, волновое распространение сопровождается понижением спектрального состава акустических импульсов, бежущих по такой квазиустойчивой, квазиупругой среде. При таком подходе становится интуитивно понятной возможность обмена поляризаций колебаний в процессе распространения, что должно повлечь и смену скорости распространения, обнаруженную в экспериментах. В заключение коснемся количественной характеристики нелинейности. Так, оценка нелинейного параметра грунта, сделанная с учетом реализованных фактически уровней амплитуды и значений частоты и длительности зондирующих посылок, даёт величину порядка  $10^{-10}$ , что согласуется с литературными данными [5]. Столь высоким его значением и объясняется проявление нелинейных эффектов даже при амплитуде первичной волны, составляющей в нашем случае только 10 Па.

Полученные в экспериментах результаты имеют несомненное значения как для уточнения теории

распространения волн в пористых влагонасыщенных средах, так и для прикладных вопросов, возникающих при разработке геолокаторов высокого разрешения.

В заключение авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку по Гранту N 94-01-01208-а.

## Литература.

1. Николаевский В. Н. Упругие волны в насыщенных пористых средах. М. Наука, 1984.
2. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М. Гос. издат. технико-теоретич. литературы, 1967, с. 137-148.
3. Гуцин В. В., Заславский Ю. М., Новиков Б. В., Рубцов С. Н. Эффекты детектирования Р-волн в грунте на килогерцовых частотах. Тезисы доклада XI Всесоюзной акустической конференции. М. 1991.
4. Бубнов Е. Я., Гуцин В. В., Заславский Ю. М., Новиков Б. В., Рубцов С. Н. Использование метода частотного синтеза сигнала при геолокации тональными источниками. Препринт НИРФИ N394. Н. Новгород, 1994.
5. Беляева И. Ю., Зайцев В. Ю., Островский Л. А. Нелинейные акусто-упругие свойства зернистых сред. Акуст. ж., 1993, т. 39, вып. 1, с. 25-32.