

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации
Научно-исследовательский радиофизический институт

ПРЕПРИНТ № 437

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВОЗБУЖДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ
АКУСТИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ.**

**Е.Я.Бубнов,
В.В.Гушин,
В.В.Кудрявцев,
С.Н.Рубцов,
В.В.Чернов.**

Н. Новгород, 1997

Экспериментальные исследования возбуждения сейсмического поля акустическим источником//

Е.Я.Бубнов, В.В.Гушин, В.В.Кудрявцев, С.Н.Рубцов, В.В.Чернов

Препринт № 437.

- Нижний Новгород: НИРФИ, - 1997. -16 с.

УДК 534.232

В работе проведены экспериментальные исследования сейсмического поля, возникающего при работе акустического источника, устанавливаемого при разных соотношениях высоты и длины волны акустического излучения. Измерен двумерный пространственно-временной спектр сейсмического сигнала и на основе этого проведен анализ волновой структуры поля. В зависимости от высоты расположения источника определены механизмы в акустическом излучении, ответственные за возбуждение объемной волны и мод поверхностной волны Рэлея и выявлен частотно-зависимый характер функции трансформации акустического сигнала в сейсмическую поверхностную волну.

Подписано в печать 9.12.97г.

Бумага писчая.

Заказ

5468 Тираж

Формат 60x84/16

Объем 1. п.л.

50.

Отпечатано в НИРФИ

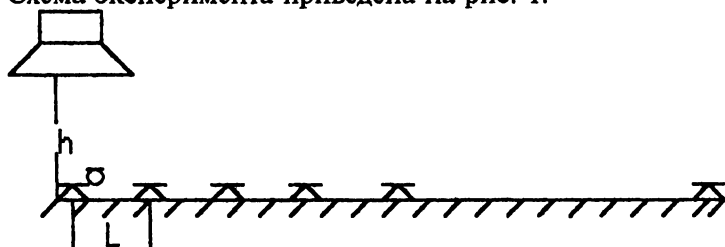
Задача трансформации акустических возмущений в сейсмические представляет одну из важных физических проблем сейсмоакустического взаимодействия волн. Несомненный прикладной аспект этой проблемы заключается в возможности использования легко управляемых акустических источников в качестве альтернативных излучателей сейсмических полей, имитаторов сейсмических источников в заданных точках, а также оценивания возможной экологической опасности, возникающей при взаимодействии упругих полей с подземными сооружениями, коммуникациями, нефте- и бензохранилищами, расположенными вблизи аэропортов и испытательных полигонов.

В настоящей экспериментальной работе ставятся вопросы изучения волновой структуры и характеристик сейсмических волн, возникающих при работе акустического источника, в зависимости от высоты его расположения. Заметим, что исследования возбуждения сейсмических полей воздушными источниками проводились и ранее /1-3/. Отличительной особенностью исследований в цитируемых работах является то, что в качестве источника возбуждения сейсмических волн используется ударная волна, возникающая при подрыве взрывчатого вещества на разных высотах. Именно за счет особенности спектра такого источника авторами получен результат, заключающийся в том, что при фиксированном расстоянии наблюдения в волновой зоне существует вполне определенная высота при которой подрыв заданной массы взрывчатого вещества обеспечивает максимум сейсмической энергии в поверхностной волне Рэлея. В нашем случае в качестве источника возбуждения рассматривается более экологический маломощный акустический излучатель и исследования сейсмических полей проводятся как в дальней так и ближней зонах. Из более поздних и близких исследований в этом направлении следует отметить работу /4/, в которой теоретически решается задача о генерации упругих волн точечным гармоническим звуковым источником, расположенным над поверхностью однородного упругого полупространства и определены параметры газообразной и твердой сред, влияющие на эффективность возбуждения сейсмических волн. Однако, реальный грунт является, как правило, многослойной гетерогенной структурой и возбуждение в нем сейсмического поля акустическим излучением предсказать

трудно даже качественно. Поэтому натурный эксперимент необходим для выяснения как качественной так и количественной картины трансформации акустического излучения в сейсмическое.

Предварительное оценивание характера трассы эксперимента методом выборочного бурения показывает, что грунт на месте работы представляет слоистую глино-мергелевую структуру с мощностью слоев от десятков сантиметров до нескольких метров. Независимо выполненное сейсмическое зондирование грунта на участке проведения эксперимента с помощью электрогидравлического вибрационного источника показывает сложную волновую структуру сейсмического поля, включающую в себя головную волну, имеющую скорость распространения 1500-1600 м/с и сформированную судя по значению скорости водоносным слоем, и две моды поверхностной волны с фазовыми скоростями распространения 240 м/с и 160 м/с соответственно.

Схема эксперимента приведена на рис. 1.



Z - сейсмический датчик

O - микрофон

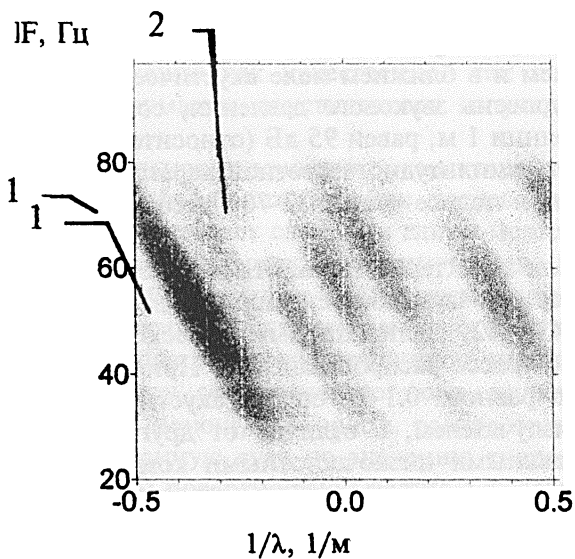
Рис.1

В качестве акустического источника в ходе проводимых исследований трансформации акустических волн в сейсмические используется звукоизлучающая установка фирмы "Роботрон". Режим работы источника непрерывный и импульсный. При непрерывном режиме частота излучения линейно изменяется в полосе частот 20-99 Гц. Характерная длительность задающего электрического сигнала при импульсном режиме возбуждения акустических колебаний составляет 5 мс. Высота источника h в отдельных опытах устанавливается равной 0,1, 0,6, 1,0 и 2,0 м, с тем,

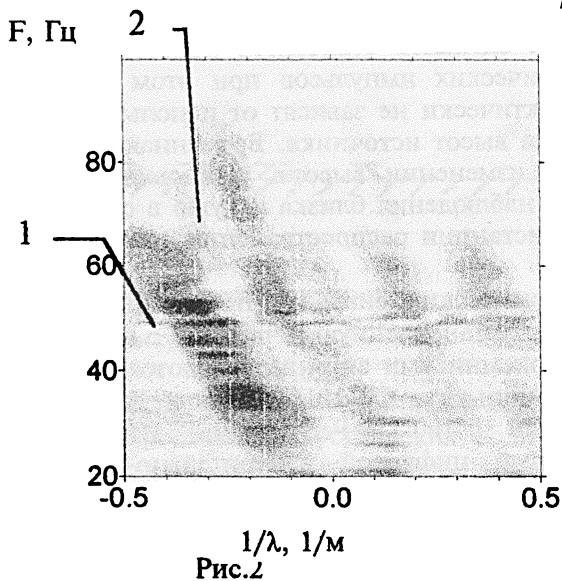
чтобы трансформация акустических полей в сейсмические происходила в дальнем и в ближнем поле акустического излучателя. Максимальный уровень звукового давления, создаваемого установкой на расстоянии 1 м, равен 95 дБ (относительно 2×10^{-5} Па), а неравномерность амплитудно-частотной характеристики источника по давлению в полосе частот 32-70 Гц составляет при этом 3 дБ.

Для контроля характеристик акустического поля излучателя осуществляется прием звукового сигнала конденсаторным микрофоном типа МК-102, располагаемым в нескольких фиксированных точках по трассе распространения. При высоте расположения источника равного 0.1 м, спектр акустического сигнала, принятого под излучателем, в отличие от других точек трассы обогащен интенсивными низкочастотными компонентами, обусловленными ближним полем (преобладающая частота в спектре сигнала составляет 50 Гц), а при увеличении высоты подъема источника максимум в спектре сигнала сдвигается к более высоким частотам и становится равным 65 Гц. В волновой зоне спектры акустических сигналов становятся подобными друг другу, амплитуды акустических импульсов при этом приблизительно одинаковы и практически не зависят от используемого в эксперименте интервала высот источника. Временная задержка между импульсами при изменении высоты установки источника для наклонных трасс наблюдения близка к нулю в силу малой величины разности дистанции распространения акустических сигналов.

Прием сейсмических сигналов производится на 16 элементную антенну, установленную в линейку с шагом L , равным 1 м. Базовыми приемниками антенны являются электродинамические сейсмодатчики типа СВ-10Ц, имеющие частотный диапазон приема, равный 10-100 Гц. Регистрация сигналов проводится на многоканальный цифровой измерительно-вычислительный комплекс и накопительную станцию на базе персональных ЭВМ типа 486 ДХ2. В ходе вторичной обработки сигналов с антенны формируется двумерный пространственно-временной спектр, который позволяет судить о характеристиках и волновой структуре сейсмического поля.



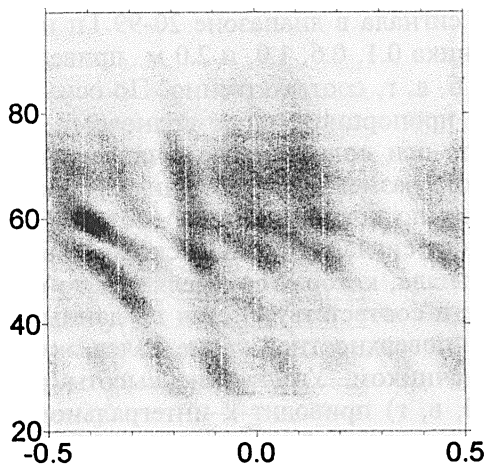
а



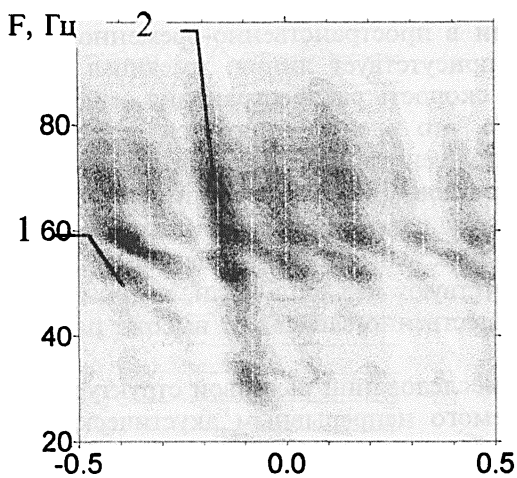
б

Рис. 2

Пространственно-временной спектр сейсмического поля при высотах акустического источника 0.1 м (а), 0.6 м (б).



В



Г

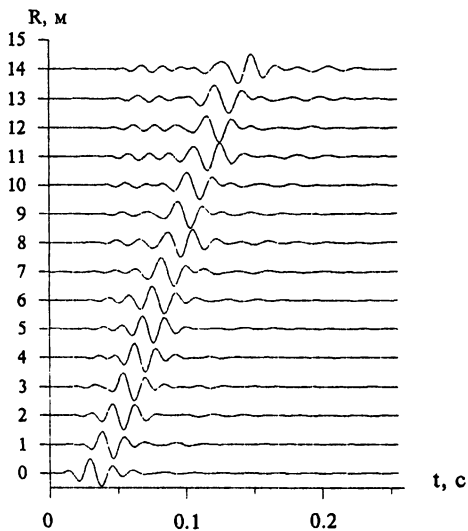
$1/\lambda, 1/\text{м}$

Пространственно-временной спектр сейсмического поля при высотах акустического источника 1 м (в), 2 м (г).

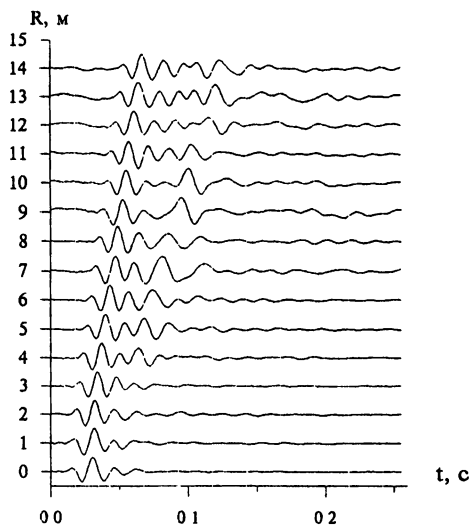
Пространственно-временной спектр сейсмического поля определяется в режиме линейной перестройки частоты гармони-

ки акустического сигнала в диапазоне 20-99 Гц и для высот расположения источника 0.1, 0.6, 1.0, и 2.0 м приведен в яркостном виде на рис. 2, а, б, в, г, соответственно. По оси абсцисс отложена величина $1/\lambda$, пропорциональная волновому числу K , где λ - длина волны, а по оси ординат отложена временная частота F . На рис. 2, а (высота размещения источника равна 0.1 м) присутствует интенсивная по яркости линия, соответствующая компоненте сейсмического сигнала. Фазовая скорость распространения сейсмического сигнала, которая определяется по формуле $c=F \times \lambda$, равна 140-150 м/с и соответствует, судя по данным сейсмического зондирования, поверхностной волне Рэлея, возбуждаемой под акустическим источником. Увеличение высоты размещения источника (рис. 2 б, в, г) приводит к интегральному уменьшению интенсивности линии с одной стороны и к появлению флюктуации яркости с другой стороны. Осциллирующий характер яркости линии объясняется, по всей видимости, биением двух мод поверхностной волны, которые не разделяются в спектре сигнала за счет малого количества отсчетных точек по пространству. Кроме этой линии в пространственно-временном спектре сейсмического поля присутствует линия, имеющая другой наклон. Соответствующая скорость распространения сейсмической волны равна 350-400 м/с, что идентифицируется с объемной волной, вызванной проникновением акустической волны в грунт в месте расположения датчиков. При увеличении высоты источника яркость рассматриваемой линии увеличивается (см. рис 2 б, в, г). Таким образом, в пространственно-временном спектре сейсмического поля присутствуют два типа волн, амплитуды которых на первый взгляд существенно зависят от высоты расположения источника.

Результаты исследований волновой структуры сейсмического поля, создаваемого непрерывным акустическим излучением, методом анализа двумерного спектра сигналов подтверждаются экспериментальными данными, зарегистрированными накопительной станцией в импульсном режиме работы источника. Так на рис. 3, а, б приведены нормированные осциллограммы сейс-



а



б

Рис.3

Продольный годограф сейсмических волн, возбуждаемых при двух высотах размещения источника.

а - высота источника 0.1 м,

б - высота источника 1 м.

мических сигналов в координатах время-расстояние, принятые с линейки сейсмодатчиков при работе акустического источника на высотах 0.1 и 1 м соответственно. Структура и кинематические характеристики полей, приведенных на рисунках 3, а и б совпадают с описанными на рис. 2 а и в волнами. Заметим, что по результатам зондирования, проведенного для данного типа грунта, в волновой структуре сейсмического поля должна присутствовать еще одна мода поверхностной волны, имеющая фазовую скорость распространения, равную 240 м/с и и головная волна. Одной из возможных причин отсутствия данной моды является то, что на данных коротких дистанциях она еще не выделилась из интерференционной структуры волн. Действительно, прием сейсмических сигналов на больших базах наблюдения с использованием накопительной станции позволяет кроме описанных выше типов волн локализовать высокоскоростную моду поверхностной волны, имеющую скорость распространения равную 240-250 м/с. Для головной волны характерна малая величина амплитуды по сравнению с амплитудами поверхностных волн, что не позволяет фиксировать ее при используемой в эксперименте акустической мощности источника.

Как отмечается выше, соотношение амплитуд между объемной и поверхностной сейсмическими волнами существенно меняется в зависимости от высоты источника. Определим влияние физических факторов, обуславливающих такой характер зависимости амплитуд двух сейсмических волн при изменении высоты установки акустического источника. На рис. 4 представлены кривые изменения отношения амплитуд сейсмических волн, измеренных при высотах расположения акустического источника равных 0.1 и 1.0 м в зависимости от расстояния, причем кривая 1 относится к поверхностной волне, а кривая 2 соответствует объемной волне. Видно, что амплитуда объемной сейсмической волны при наблюдении в волновой зоне практически не меняется при изменении высоты источника (отношение амплитуд приблизительно равно единице). В тоже время амплитуда поверхностной волны, принятой в волновой зоне меняется в зависимости от высоты расположения источника (кривая 1, рис. 4). Таким образом, динамика амплитуд волн, представленная на рис. 2 и 3 определяется изме-

V_{h1}/V_{h2}

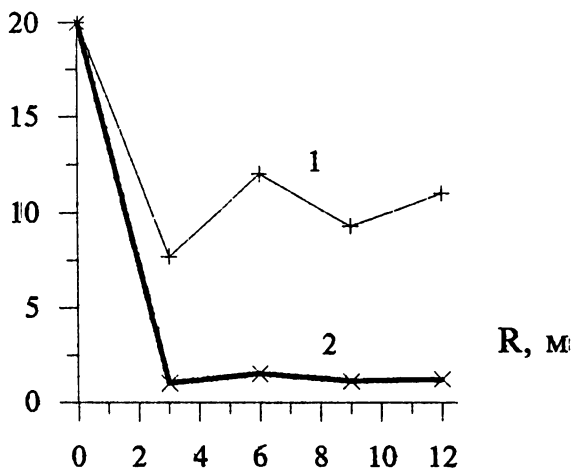


Рис.4

Кривые изменения отношения амплитуд сейсмических волн, измеренных при высотах расположения акустического источника равных 0.1 и 1.0 м в зависимости от расстояния.

Кривая 1 относится к поверхностной волне, кривая 2 к объемной волне.

нением амплитуды только поверхностной волны при вариации высоты акустического источника. Анализ зависимости фазовых соотношений между сейсмическими волнами от высоты работы источника показывает следующее. Для объемных сейсмических волн, принятых в волновой зоне, временная задержка между сигналами как и для звуковых волн, зарегистрированных в этой же точке, незначительная (см. рис. 5 а, 1). Сплошные кривые графика соответствует высоте источника, равной 0.1 м, а пунктирные линии отвечает высоте источника, равной 1 м. Временная задержка между поверхностными волнами, возникающая при указанных выше двух высотах расположения источника также приблизительно равна нулю (см. рис. 5 а, 2). Этот экспериментальный факт является неожиданным, так как за счет разной высоты установки источника должна существовать временная

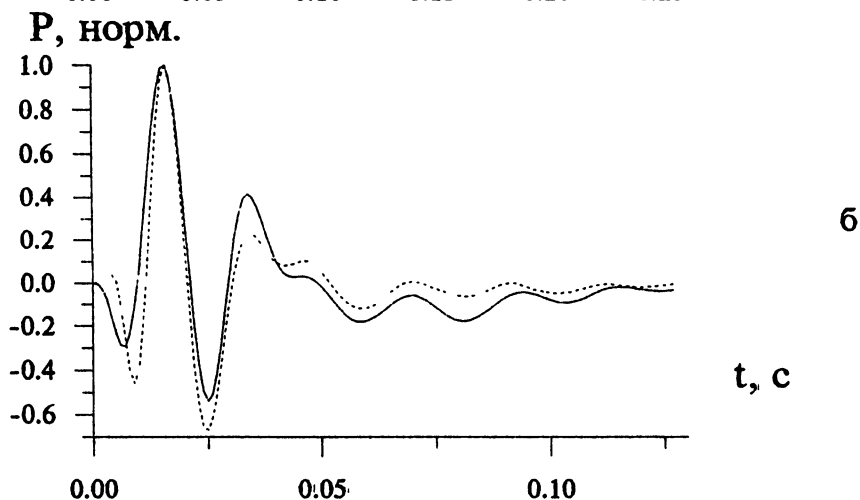
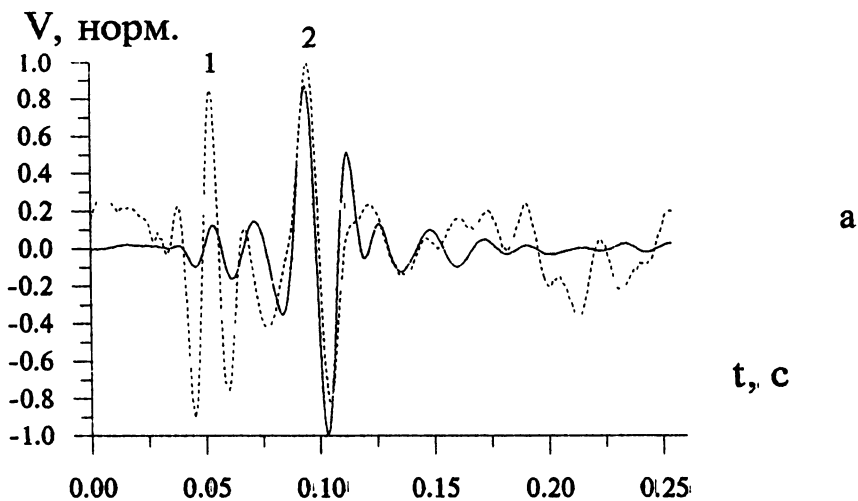


Рис.5

Осциллограммы сейсмических (а) и акустических (б) сигналов, возникающих при работе источника на высотах 0.1 м и 1 м.
 а- расстояние 12 м, б -расстояние 0 м.

задержка как между акустическими сигналами, принятыми на поверхности грунта под источником и являющимися исходными для генерации поверхностных волн так и соответственно между

сейсмическими волнами этой природы. Одно из возможных объяснений отсутствия задержки между поверхностными волнами при вариации высоты источника состоит в том, что при высотах размещения источника меньших длины акустической волны генерация поверхностных волн осуществляется ближним полем источника, а на высотах больших длины звуковой волны возбуждение поверхностных волн происходит волновым полем источника. В этом случае из теоретических оценок следует, что в акустическом поле звукового источника ближнее поле отстает по фазе от волнового на 90 градусов, что эквивалентно его фиксированной временной задержке. Величина этой задержки в нашем случае приблизительно равна времени распространения акустического импульса по трассе, равной разности высот размещения источника. Следовательно между акустическим сигналом, возникающим при высоте источника, равной 1 м и принятым на поверхности грунта и ближним полем источника, расположенного на высоте, равной 0.1 м задержка практически отсутствует. В качестве подтверждения на рис. 5, б приведены нормированные осциллограммы акустических импульсов, принятых на поверхности грунта под источником, работающим на высотах 0.1 (сплошная линия) и 1 м (пунктир). В энергонесущей части сигналов временная задержка отсутствует и присутствует только в начальной малоинтенсивной фазе импульсов.

В заключение проведем исследование временных спектров сейсмических полей для определения частотных диапазонов возбуждения сейсмических волн и характера зависимости формы спектров от дальности приема. Временные спектры сигналов можно в принципе получить из пространственно-временных спектров, приведенных на рис 2 но гораздо удобнее эти характеристики определить по эквивалентным импульсным сейсмограммам, представленным на рис. 3.

На рис. 6, а) приведены спектры сейсмической поверхностной волны Рэля (сплошная кривая), принятой на расстоянии 12 м от источника и акустической волны (пунктирная кривая) соответственно, принятой под источником. Полоса частот, занимающей поверхностной волной составляет 30-60 Гц, спектр характе-

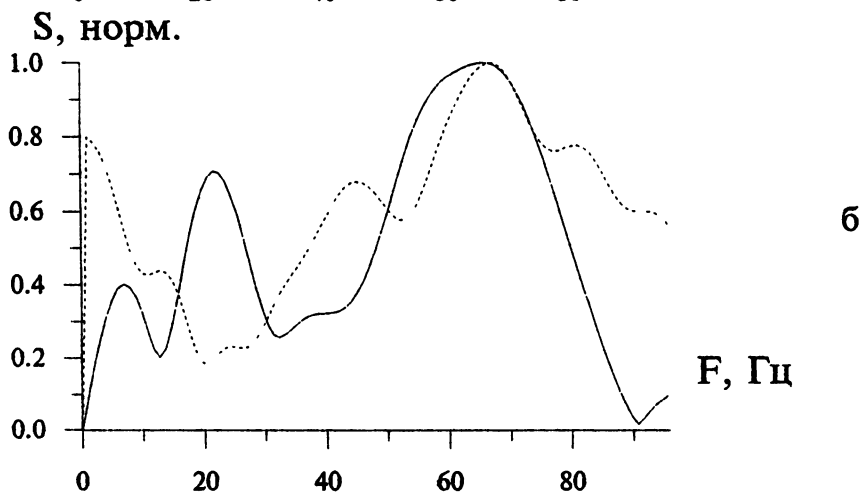
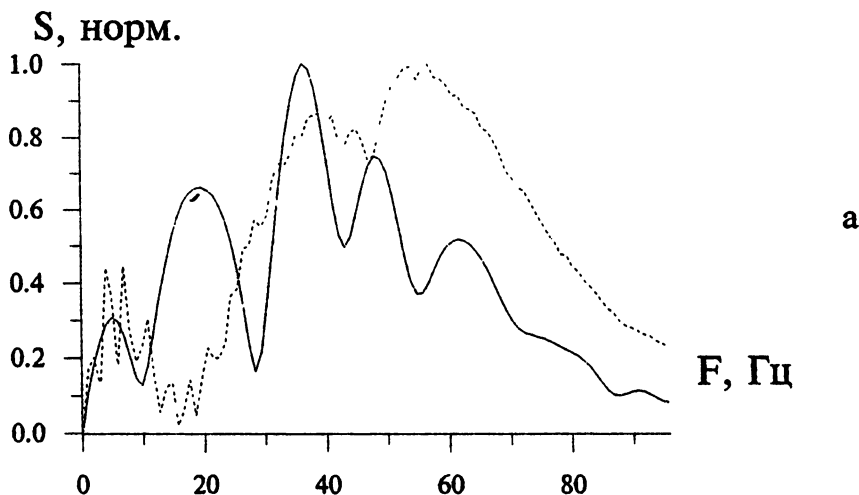


Рис.6

Спектры сейсмических и акустических сигналов.

- а) Спектры сейсмической поверхностной волны Рэлея (сплошная кривая), принятой на расстоянии 12 м от источника и акустической волны (пунктирная кривая) принятой под источником.
- б) спектры объемной сейсмической волны (сплошная кривая), зарегистрированной в точке 12 м и акустической волны (пунктирная кривая), принятой в той же точке.

ризуется несимметричным и изрезанным видом кривой. Осциллирующий вид кривой объясняется, как и выше, биением двух различных по амплитуде мод поверхностной волны. Отмечаются непохожие формы спектров исходного акустического сигнала и сейсмосигнала поверхностной волны, что можно объяснить частотно-зависимым характером функции возбуждения и распространения сейсмической волны. Для сравнения на рис. 6, б приведены спектры объемной сейсмической волны (сплошная кривая), зарегистрированной в точке 12 м и акустической волны (пунктирная кривая), принятой в той же точке и являющейся исходной при возбуждении данного типа волны. Для этих волн наблюдается большее совпадение кривых в энергонесущей части спектра. Диапазон частот, занимающей объемной сейсмической волной составляет 50-80 Гц. Наблюдающийся локальный максимум в спектрах поверхностной и объемной сейсмических волн в окрестности частоты 20 Гц и ниже обусловлен помеховыми сигналами. Акустический источник расположен на высоте 1 м.

Таким образом, проведенный модельный эксперимент показывает, что при работе воздушного источника происходит возбуждение мод поверхностной волны Рэлея под источником и преломление объемной волны в точке установки сейсмоприемника. Механизмом генерации поверхностной волны может быть волновое или ближнее поле акустического источника в зависимости от соотношения длины волны акустического сигнала и высоты источника. Функция трансформации акустической волны в поверхностную волну Рэлея имеет сложную зависимость от частоты. Прикладной и методический результат работы заключается в возможности возбуждения того или иного типа сейсмической волны, необходимого для выполнения задачи эксперимента, путем вариации отношения длины акустической волны к высоте расположения воздушного источника.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 97-05-65643.

Список использованных источников

1. Коган С.Я. О сейсмической энергии, возбуждаемой источником, находящимся на поверхности// Изв. АН СССР, сер. Геофиз. -1963. -№7 -с.41-52.
2. Коган С.Я. К вопросу о связи параметров воздушного взрыва с сейсмической энергией// Физика Земли -1965. -№ 4 - с.9-21.
3. Люкэ Е.И. Экспериментальное изучение зависимости энергии волн Рэля от мощности и высоты взрыва в воздухе// Физика Земли -1967. -№ 2. -с.32-40.
4. Ергакова Т.В., Разин А.В. Преломление сферической гармонической звуковой волны на плоской границе раздела газ-твердое тело// Препринт НИРФИ -1992. -№344. -25с.