

П р е п р и н т № 362

**ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ**

**Л.Л. Жестяников
Л.Ю. Соболев
В.Н. Товчатренко
А.Л. Фогель
В.Е. Фридман
В.В. Чернов**

Нижний Новгород, 1993

Жестяников Д. Д., Соболев Л. Ю.,
Товчигречко В. Н., Фогель А. Л.,
Фридман В. Е., Чернов В. В.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ
АКУСТИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ // Препринт № 362. - Нижний Новгород: НИРФИ, 1993. - 16 с.

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований акустического зондирования атмосферы. Приведено описание техники измерений, включая конструкцию и параметры генераторов мощных акустических импульсов, возбуждаемых детонационной волной. Описаны результаты приема акустических сигналов, отраженных от неоднородностей атмосферы на высотах 2...7 км.

Подписано в печать 30.03.93 г. Формат 60 x 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 0,97 усл.п.л.
Заказ 5320. Тираж 120.

В В Е Д Е Н И Е

Зондирование приземного слоя атмосферы до высот в несколько километров имеет принципиальное значение для инженерной деятельности человечества и экологии. Через этот слой происходит обмен тепловыми и ветровыми потоками и влагой между поверхностью и погоднообразующей тропосферой. Знание процессов обмена позволяет развивать реальные модели прогноза погоды и климата. Кроме решения указанных глобальных задач, зондирование параметров приземного пограничного слоя позволяет решать широкий спектр задач, имеющих важное прикладное значение. Перечислим некоторые из них. Это проблема вертикальной диффузии и горизонтального переноса атмосферных загрязнений в виде пылевых, газовых и жидкостных фаз в промышленных регионах и крупных городах. Сюда же относится проблема переноса радиоактивности. Другая крупная проблема связана с безопасностью в воздушной навигации, для решения которой необходима постоянная информация об аномалиях в погранслое атмосферы, способных создавать аварийные ситуации. Отметим также, что в отдельных регионах, например, над аэропортами и т.п. требуется непрерывный контроль ветровых условий. Еще одна крупная проблема связана с условиями распространения радиоволн в атмосфере. В связи с ней необходимо изучение тонкой структуры погранслоя атмосферы — крайне сложное для существующих методов зондирования, но крайне важное с точки зрения распространения радиосигналов.

В настоящее время достаточно хорошо известны активные методы дистанционного определения метеорологических параметров нижней части атмосферы /1/. Это аэрологическое зондирование, метеорологическая радиолокация, лазерная локация, акустическая локация с использованием сонаров и, наконец, радиоакустическое зондирование.

Каждый из перечисленных методов имеет ограниченные условия применения, связанные с наличием чистого неба, нормальных атмосферных условий, отсутствием сильного ветра и т.д.

Существующие методы акустического зондирования атмосферы позволяют исследовать ее параметры до высот в несколько сотен метров /1/. Такое ограничение связано с использованием высокочастотных тональных акустических сигналов, испытывающих сильное затухание в атмосфере. С уменьшением частоты можно достигнуть больших высот зондирования, однако имеются сложности по созданию достаточно мощных низкочастотных акустических полей. Использование взрывных источников звука позволяет захватить достаточно большие высоты, однако существуют определенные технические трудности в их применении. В последние несколько лет разрабатывается новый источник мощного акустического поля — детонационный генератор (ДГ), обладающий достоинствами взрывного источника, но не имеющий присущих взрывам недостатков /2-10/. Такие генераторы можно использовать в режиме повторения, они дешевы и просты в эксплуатации. Использование детонационного генератора для зондирования атмосферы может позволить исследовать значительно большие высоты, нежели это имеет место в существующих методах. Данная работа посвящена краткому описанию и экспериментальным результатам по зондированию атмосферы мощными короткими акустическими импульсами, формируемыми детонационным генератором. В начале работы приводится описание принципа работы ДГ и даются конструктивные решения ДГ, которые применялись в экспериментах. Затем дается описание акустических импульсов, возбуждаемых генератором, и приводится эмпирическая формула для пикового значения амплитуды ударной волны. В следующей части работы рассматриваются направленные свойства ДГ и приводятся диаграммы направленности по пиковому значению амплитуды. В последующих двух частях даются описания экспериментальных результатов по вертикальному зондированию атмосферы с приемом на два и три микрофона. Завершается работа простыми оценками коэффициента отражения.

1. ДЕТОНАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

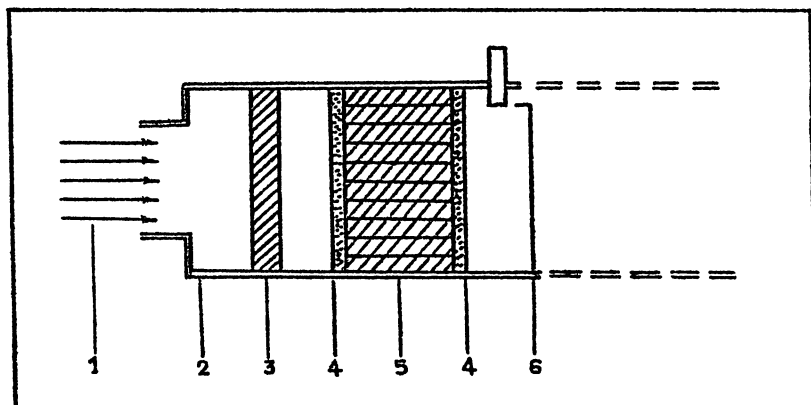
Детальное описание ДГ приведено в /2-4/; здесь ограничимся кратким описанием принципа работы ДГ, имея ввиду конкретную инженерную разработку, которая использовалась в проведенных экспери -

ментах. Детонационный генератор представляет собой открытую с одного торца цилиндрическую полость (рис.1). Вблизи закрытого торца расположены обратный клапан, запальная свеча и теплопоглощающий элемент. Камера, в которой расположены перечисленные элементы, имеет объем примерно 600 см^3 . Камера соединяется с разгонными трубами различных сечений и длины (рис.2). Геометрические размеры разгонных труб и их объемы для использованных ДГ приведены в табл.1.

Параметры разгонных труб

Т а б л и ц а 1

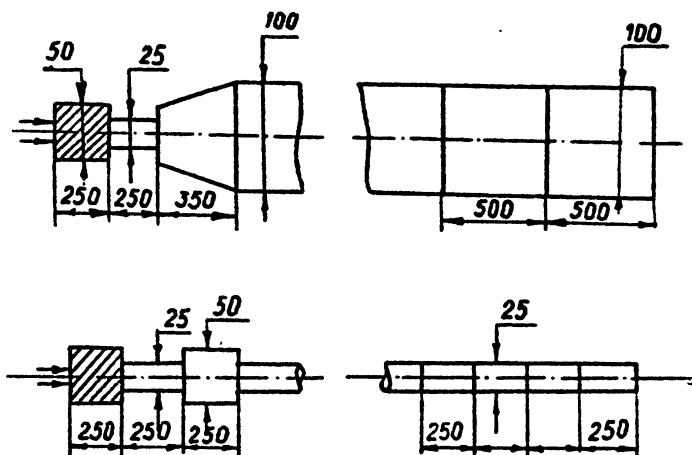
ДГ :	Длина, м	:	Выходной диаметр, см :	Объем, см^3
1 :	3,6	:	10	25500
2 :	3,48	:	2,5	1600



Р и с . 1

Камера детонационного генератора:

1 - бензовоздушная смесь, 2 - труба, 3 - обратный клапан (обеспечивает поступление новой порции смеси в камеру), 4 - решетка, 5 - теплопоглощающие элементы, предотвращающие преждевременное воспламенение новой порции смеси, 6 - запальная электрическая свеча



Р и с. 2

Конструкции ДГ в сборе с разгонной трубой.

Параметры ДГ приведены в табл. I.

Камера детонационного генератора заштрихована

Во время работы камера заполняется газом или смесью бензина и воздуха. При воспламенении смеси электроискровым разрядом образуется волна горения, которая в разгонной трубе переходит в волну детонации. Эта волна распространяется в сторону открытого торца трубы и в воздухе переходит в ударную волну. Вслед за волной детонации распространяется скоростной поток высокотемпературных продуктов детонации, после истечения которых камера снова заполняется смесью и процесс повторяется.

Для предотвращения воспламенения вновь подаваемой смеси остатками продуктов предыдущего цикла используется теплопоглощающий элемент, расположенный за клапаном.

Предельная частота инициирования процесса детонации определяется, очевидно, скоростью заполнения камеры и ее объемом. Чем меньше объем камеры, тем более высокочастотным может быть процесс повторения. В ряде экспериментов достигалась частота повторения 3-5 Гц, а для ДГ очень малого объема - выше 10 Гц. В экспериментах

по атмосферному зондированию проводилась генерация импульсов в режиме единичного возбуждения и в режиме генерации импульсов с частотой 1 Гц.

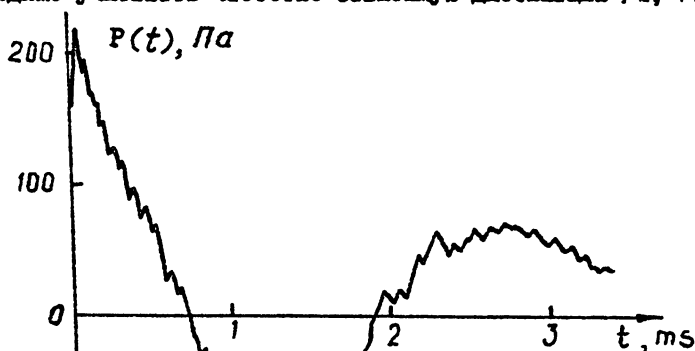
Как уже отмечалось, на выходе ДГ формируется ударная волна. Ее параметры меняются по мере распространения из-за нелинейных эффектов и диссипации (подробнее см./5-8/). Приведем здесь форму волны вблизи открытого торца ДГ (рис.3) и дадим эмпирическую формулу для амплитуды пикового давления ударной волны P ($Па$) в зависимости от объема ДГ W ($см^3$) и расстояния L (м), пройденного волной /2, 3/:

$$P \approx 400 \left\{ Q^{1/3} / L \right\}^{1,5}. \quad (1)$$

Здесь Q - вес бензо-воздушной смеси (г), связанный с объемом ДГ. Эта связь для бензо-воздушной смеси стехиометрического состава (93% воздуха, 7% бензина) есть:

$$Q (г) = 10^{-3} W (см^3). \quad (2)$$

Формула (1) получена в результате обработки большого массива экспериментальных данных, зарегистрированных при использовании ДГ различного объема. Она позволяет делать оценки амплитуды сигнала на различных расстояниях до нескольких сотен метров. На больших расстояниях необходимо учитывать частотно-зависимую диссипацию /1, 7, 8/.

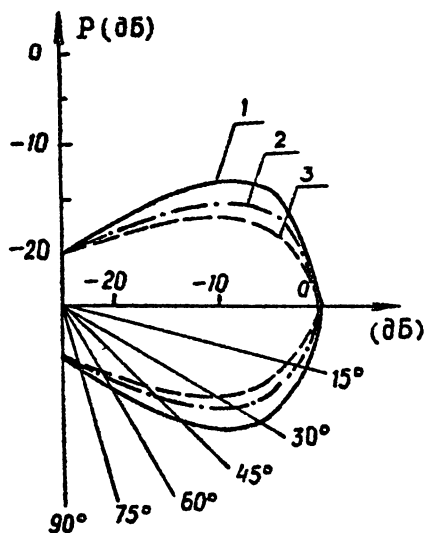


Р и с.3

Форма волны на расстоянии 5 м
от торца генератора
объемом $2,5 \cdot 10^4$ $см^3$

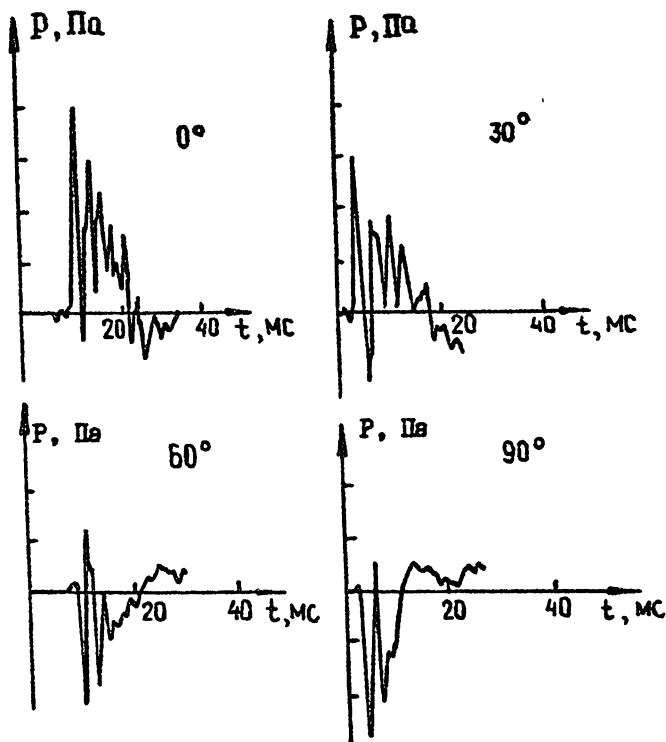
2. ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ

Для использования ДГ в задачах зондирования атмосферы необходимо знание направленных свойств сформированного сигнала. Поскольку ДГ генерирует импульсный сигнал, можно говорить о нескольких характеристиках направленных свойств, в том числе о диаграмме направленности по пиковому значению амплитуды ударной волны. Такая диаграмма имеет характер, близкий к дипольному, однако меняется при смене частоты генерации импульсов. На рис.4 приведены формы диаграммы направленности для трех режимов генерации импульсов, а на рис.5 даются формы импульсов в четырех направлениях: под углами 0, 30, 60 и 90 градусов к оси ДГ для детонационного генератора № I (см.табл.I), работающего в режиме повторения 1 Гц. Видно различие осциллограмм волновых возмущений, формируемых в разных направлениях. Общим свойством акустического поля ДГ является сужение диаграммы направленности при увеличении частоты.



Р и с.4

Диаграмма направленности ДГ для трех частот генерации. Измерения проведены на расстоянии 30 м от торца ДГ:
1 - одиночные импульсы,
2 - частота генерации импульсов 1 Гц,
3 - частота генерации импульсов 3 Гц



Р и с. 5

Форма ударных импульсов в разных направлениях на расстоянии 30 метров от торца ДГ, работающего в режиме повторения с частотой 1 Гц.

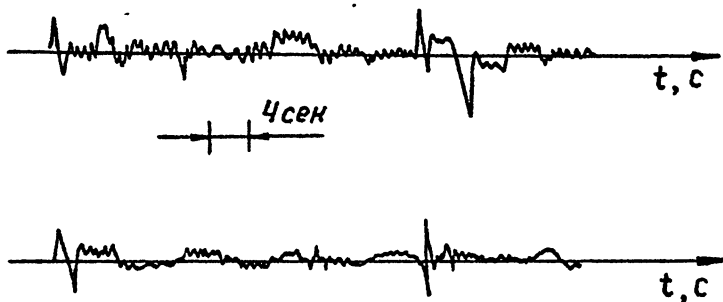
Переколебания за начальной ударной волной вызваны отражениями детонационной волны внутри ДГ

3. ДВУХТОЧЕЧНАЯ СХЕМА ЗОНДИРОВАНИЯ

Перейдем теперь к описанию результатов экспериментальных исследований по зондированию атмосферных неоднородностей с помощью мощных акустических импульсов, возбуждаемых ДГ. Эксперименты проводились на радиофизическом полигоне "Старая Пустынь" вблизи города Нижний Новгород (прежнее название - город Горький) в 1990 и

1991 гг. В ходе проведения экспериментов использовались генераторы, параметры которых приведены в табл. I. Генератор устанавливался вертикально на специальной подъемно-выдвижной лестнице, так что диаграмма направленности излучения являлась симметричной относительно вертикальной оси. Приемные микрофоны были удалены от ДГ на одинаковое расстояние. Обычно это расстояние составляло 200 метров. В первом эксперименте прием отраженных сигналов проводился на два микрофона Вгuel & Кязг 4I47, установленных в фокусах 10-метровых зеркальных радиотелескопов, ориентированных в з е н и т. Частота генерации импульсов составляла либо 1 Гц, либо генерировались единичные импульсы с периодичностью один импульс в несколько минут; после излучения акустического импульса для уменьшения уровня шумов проводилось глушение двигателя, питающего ДГ бензо-воздушной смесью, и увеличивалась чувствительность микрофонов на 20-30 дБ. Частотная полоса приемного тракта и микрофонов начиналась примерно с 10 Гц. Измерения проводились сериями по 10 импульсов каждый час в течение суток.

Акустический источник формировал сферическую волну с описанной выше диаграммой направленности. Поэтому интерес представляли отраженные сигналы, приходящие на оба микрофона одновременно в области пересечения диаграммы направленности приемных микрофонов. На рис. 6 представлены осциллограммы регистрации отраженного сигнала на два микрофона. Сигналы записывались на магнитофон Вгuel & Кязг 7005 и затем выводились на самописец со скоростью протяжки 15 см/мин. Самописец позволял фиксировать сигнал в полосе частот до 80 Гц. Как видно из осциллограммы, на 42-й секунде имел место одновременный приход сигнала на оба микрофона. В пересчете на шкалу высот это составляет примерно 7 километров. Следовательно, имеет место регистрация сигнала, отраженного от атмосферных образований на расстоянии около 7 км от ДГ. Естественно, что сигнал на оба микрофона может прийти одновременно только от плоскости, лежащей перпендикулярно оси, соединяющей микрофоны и проходящей через генератор, то есть через середину пути между антеннами. Однако такой сигнал не является отражением от стационарного объекта, в какой-либо точке этой плоскости, поскольку отраженный сигнал присутствовал только в некоторых сериях измерений, постепенно ослабляясь и исчезая. При каждой генерации одиночного акустического импульса имела место регистрация отраженных импульсов на оба микро-



Р и с. 6

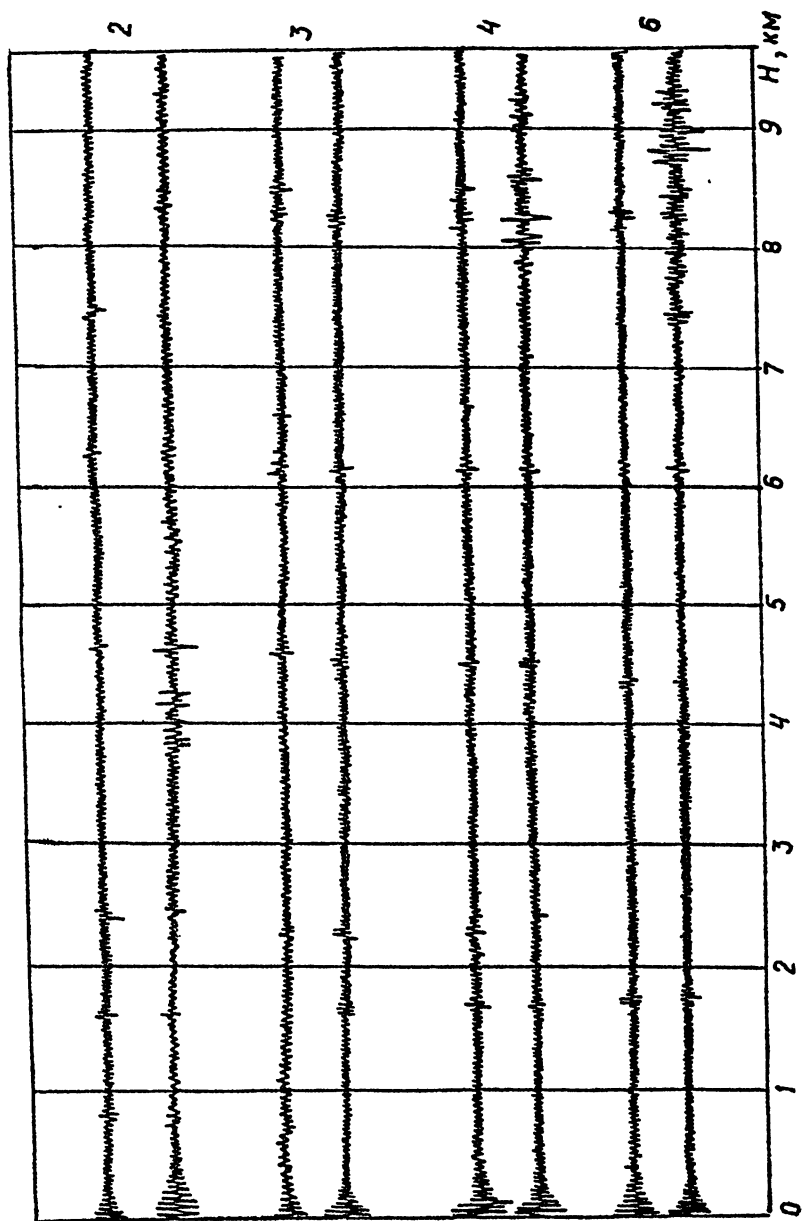
Осциллограммы двух каналов регистрации отраженного сигнала.

Отмечено отражение от атмосферных образований
на высоте около 7 км

фона в тот же момент времени с момента генерации зондирующего импульса. Вероятно, это означает отражение от атмосферных образований, расположенных в зените, над генератором. В ходе обработки и отраженных акустических сигналов записи располагались так, чтобы совместить время генерации (рис.7). Видно, что во многих случаях отражения повторяются с одних и тех же высот. Так, на осциллограммах отмечены приходы с высот в диапазоне от 2 до 7 км. Отметим еще одно обстоятельство: спектральный состав отраженных импульсов не превышает 20 Гц, что сходится с качественными представлениями о распространении и затухании звуковых сигналов в атмосфере при их распространении на расстояния порядка нескольких километров /1/.

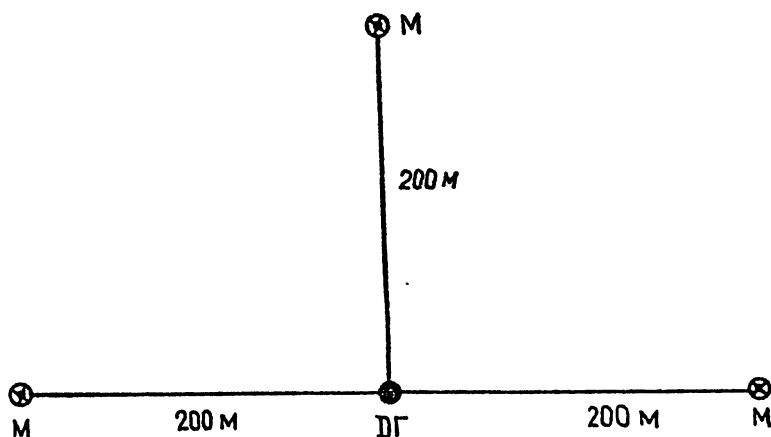
4. ТРЕХТОЧЕЧНАЯ СХЕМА ЗОНДИРОВАНИЯ

Чтобы не оставалось сомнений в характере отражений зондирующего импульса, был проведен второй эксперимент, в котором отражения фиксировались на три микрофона. В этом эксперименте применялся ДГ существенно меньшего объема (№ 2, табл. I), который генерировал импульсы меньшей амплитуды и длительности. Очевидно, что при этом энергонесущая часть спектра зондирующего импульса находилась в более высокочастотном диапазоне и испытывала большее за-



Р и с. 7. Повторяемость сигналов для серии зондирующих импульсов. Регистрация проводилась в вечернее время. Здесь выбраны 4 импульса из серии. Каждая серия содержит 10 зондирующих импульсов, следующих через 1 минуту. Номер импульса в серии отмечен справа. Масштаб амплитуды электрического сигнала для всех импульсов по обоим каналам одинаков.

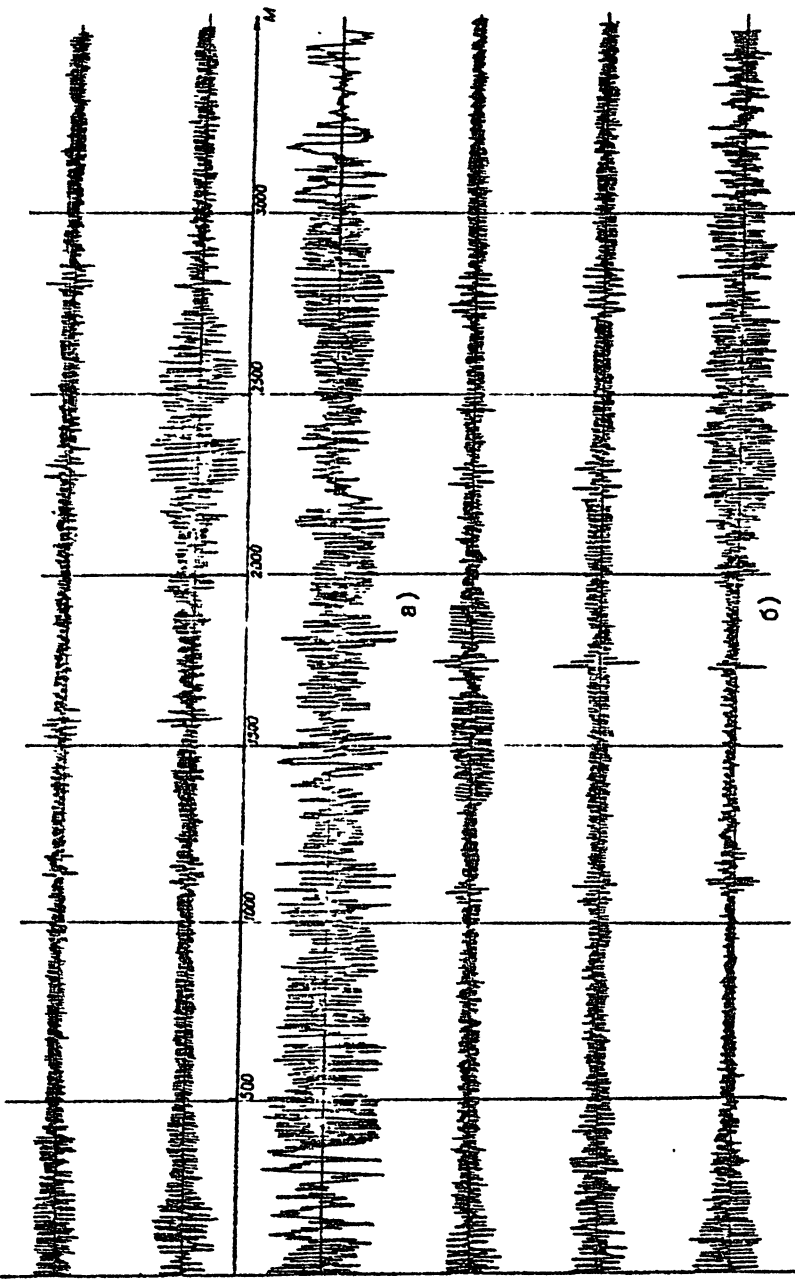
тухание, что должно было привести к уменьшению высоты зондирования. В эксперименте были использованы те же микрофоны, установленные на грунт по схеме, изображенной на рис. 8.



Р и с. 8

Схема эксперимента с тремя приемными микрофонами, расположенными на расстоянии 200 м от ДГ

Расстояние от ДГ до микрофонов составляло по-прежнему 200 метров. Запись электрических сигналов с усилителей осуществлялась с помощью многоканального магнитографа НО-68. Трехточечная схема регистрации позволяла выделять акустический сигнал, отраженный от неоднородностей атмосферы, на фоне акустических помех, поступающих на микрофоны от источников звука, находящихся на поверхности земли, имеющих как естественное (шум леса), так и искусственное происхождение. Как и в первом эксперименте, генерировались одиночные импульсы и устанавливалась пауза молчания около 1-2 минут. Запись эхо-сигнала проводилась на три приемных микрофона и имела вид, приведенный на рис.9. В этом случае, действительно, высоты отраженных импульсов оказались меньше, однако характер отражений остался прежним. По-прежнему, также удавалось проследить за динамикой атмосферных образований. Так, на рис.9а отмечается импульс, отраженный с высоты более 1,5 км. Этот отклик более отчетливо просматривается в осциллограмме следующего зондирующего импульса (рис.9б). Здесь отмечается несколько большая высота отражения (около 1800 м). Име-



Р и с. 9 Осциллограммы отраженного сигнала при трехкратном приеме. Выбрана два последовательных зондирующих импульса из серии импульсов. Отражения от первого импульса приняты и сь на один из микрофонов на фоне постороннего звукового шума (а). Однако и в этом случае прослеживается изменение уровня сигнала при приеме атмосферного отклика. Отражения фиксируются на всех импульсах серии, постепенно уменьшаясь до уровня шума. Зондирующий импульс, следующий через 1 минуту, показывает динамику отраженных сигналов (б)

ются еще несколько откликов с большей высоты (например с высоты около 2900 м). На предыдущих этапах зондирования отклики с этих высот не выделялись. Более позднее зондирование также не дало откликов в этом диапазоне высот. Отметим, что момент появления эхосигналов совпадал с появлением над полигоном дождевых облаков. Прекращению регистрации откликов соответствовало улучшение погоды и исчезновение облаков.

Выполним теперь простейшие оценки коэффициента отражения по данным проведенных экспериментов. Согласно формулам (1), (2) амплитуда зондирующего импульса на расстоянии $L = 100$ м для ДГ № 1 (табл. I) составляет примерно

$$P \approx 2 \text{ (Па)}. \quad (3)$$

Участок частотного диапазона в несколько десятков герц имеет амплитуду на порядок меньше, чем пиковое значение (см. подробнее /2/). Таким образом соответствующий спектральный участок зондирующего сигнала составляет величину около $P_s \approx 0,2$ Па на расстоянии 100 м. На высоте $H = 1,5$ км сферически расходящаяся волна имеет амплитуду

$$P = P_s L / H, \quad (4)$$

что составляет величину $p \approx 0,015$ Па. После отражения от атмосферных образований сигнал практически не расходитя. В точке приема регистрируется акустический импульс

$$P_r = K p, \quad (5)$$

где K - коэффициент отражения. Поскольку уровень акустического сигнала в точке приема не превышает $P_r = 0,005$ Па (это несколько выше уровня звукового шума в частотном диапазоне 10-50 Гц), то оценки дают весьма большое значение коэффициента отражения - около 30%. Позднее, после детальной обработки записей будут получены более точные оценки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом проведенных экспериментов является прием отражений зондирующего акустического импульса с высот в нес -

колько километров. Этот результат может являться основой разра - ботки нового класса приборов акустического зондирования атмосферы мощными короткими акустическими импульсами.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. - М.: Наука, 1985. - 197 с.
2. Балин Г.Г., Соболев Л.Ю., Фридман В.Е. и др. Экспериментальные и теоретические исследования мощных акустических импульсов в атмосфере //Акустический журнал. - 1988. - Т.34, № 2.- - С.232-236.
3. Fridman V.E. et. al. Investigation of powerful acoustic pulses in near-ground layer of the atmosphere. Proc.XI Symp. Nonlinear Acoust., Novosibirsk, 1987. - P.139-143.
4. Чунчuzов И.П., Соболев Л.Ю., Фридман В.Е. и др. Распространение акустического импульса в пограничном слое атмосферы // Препринт № 1. - Москва: ИФА, 1988.
5. Фридман В.Е. Уровень нелинейности при распространении ударных импульсов, возбуждаемых детонационным генератором. Тез. XI Всесоюз.Акуст.конф., Секц.В. - Москва, 1991. - С.27-30.
6. Fridman V.E. A radiator of powerful acoustic pulses//Acoustics Letters. - 1992. - V.15, N.15. - P.210-213.
7. Chunchuzov I.P., Fridman V.E. Splitting of the acoustic pulse wave form in near-ground layer of the atmosphere. // Acoust. Let., - 1992. - V.15, N.12. - P.245-250.
8. Chunchuzov I.P. et. al. On acoustical pulse propagation in a moving inhomogeneous atmospheric layer. // J. Acoust. Soc. Amer. - 1990. - V.88, N.1. - P.445-461.
9. Fridman V.E. Propagation of powerful acoustic pulses in the atmosphere. Proc. 6-th Intern. FASE-congress 1992, Swiss Acoust. Soc., Dubendorf, Switzerland, 1992. P.351-354.
10. Fridman V.E. et. al. Acoustic system "Detonation Generator-Helmholtz resonator". // Acoust. Let. - 1992 (in press).