

**Нижегородский научно-исследовательский радиотехнический институт  
Министерства науки, высшей школы и технической политики  
Российской Федерации**

---

**П р е п р и н т   №   360**

**ФУНКЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ЗВУКА  
ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА**

**Ю.М. Заславский**

**Нижегород 1993**

З а с л а в с к и й Д. М.

ФУНКЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ЗВУКА ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА//  
Препринт № 36Q - Нижний Новгород: НИРФИ, 1993. - 18 с.

УДК 534.222.1: 551.463.256: 551.596.1

В настоящей работе изложены результаты расчета на ЭМ амплитудно-частотной и фазо-частотной зависимостей для высокочастотного звукового сигнала, возбуждаемого в стратифицированной приземной атмосфере стандартным, нормализованным по амплитуде источником гармонических акустических колебаний и регистрируемого микрофоном, установленным на земной поверхности. Функция передачи рассчитана и алгоритмизирована для случая волноводного распространения, т.е. при совпадении направления распространения звука с направлением ветрового потока. Влияние подстилающей земной поверхности на характер распространения учтено с помощью импедансных условий на границе раздела сред. Алгоритм расчета базируется на методе лучевого описания волновых полей. Исследованы случаи ветровой и температурной стратификации, обуславливающей монотонную дистанционно-угловую зависимость лучевой картины. Полученные расчетом амплитудная и фазовая зависимости имеют в среднем значение, так и флуктуационную составляющую, причем как так, так и другая заметно отличаются при вариациях степени жесткости подстилающей поверхности, но во всех случаях первая из них обнаруживает минимум на некоторой характерной частоте.

Теоретический расчет звукового поля, распространяющегося вдоль приземного атмосферного волновода, образованного различными видами профилей скорости звука, плотности воздуха и скорости ветра, проведен рядом авторов и изложен в работах /1-12/. В литературе к настоящему времени представлены общепринятые функциональные зависимости и численные данные, аппроксимирующие параметры приземной атмосферы, которые необходимы для вышеуказанных расчетов /7/. В некоторых работах предложен способ учета влияния подстилающей земной поверхности на распространение звука, основанный на введении комплексного частотно-зависимого импеданса, описывающего как относительную жесткость, так и ее поглощающую способность /14/. Вместе с тем, обзор публикаций на данную тему показывает, что при значительной теоретической проработке методов атмосферной акустики в целом в них очень незначительно представлены конкретные расчетные данные о характеристиках звуковых полей в приземной атмосфере со стратификацией, обусловленной профилем ветра.

Так, типичной прикладной задачей атмосферной звукометрии является прогноз предельной дальности слышимости и степени разборчивости речи, т.е. дальности действия канала акустической связи при различных метеусловиях на дистанциях в несколько километров. Для ее решения необходимо вычислить амплитудно-частотный и фазо-частотный спектры звуковых волн в атмосфере и проанализировать их трансформацию по мере удаления приемника от точки излучения, в которой размещается источник с произвольным спектральным составом. Однако сведения о проведенных по указанной тематике расчетах достаточно скудны, что позволяет только качественно судить об изменениях в спектре широкополосного сигнала по мере удаления приемника от источника, помещенных в движущуюся атмосферу. Такое положение затрудняет возможность сравнения полученных в многочисленных натурных измерениях экспериментальных результатов с выво-

дами теории, ввиду чего вопрос о прогнозе предельной дальности слышимости считать полностью закрытым, вероятно, нельзя. Представленная работа посвящена краткому изложению результатов численного расчета спектральных характеристик функции передачи приземного атмосферного звукового канала на нескольких удалениях от источника (в пределах 1-3 км). Перемножение этой функции с исходной частотно-зависимой функцией возбуждения источника даст требуемый спектр звукового сигнала в произвольной точке приема.

Проведенный в настоящей работе численный расчет соответствует случаю приподнятого над землей на высоту  $H = 10$  м военнаправленного гармонического источника, работающего на произвольной частоте  $\omega$ . При этом исследуется реализуемый на практике волноводный вариант распространения, когда линия источник - приемник размещена точно по ветру, а сам приемник установлен непосредственно на границе раздела земля - воздух. Используемые в вычислениях распределения с высотой скорости звука и ветрового потока, имеющие только горизонтальную компоненту скорости, описываются выражениями /12-14/

$$c(z) = c_0 \sqrt{1 + \frac{T_1}{T(z_0)} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \quad (1)$$

$$W(z) = W_{\phi} \sqrt[4]{\frac{z}{10}}, \quad (2)$$

где  $c_0 = 330$  м/с,  $T_1 = 0,3^{\circ}\text{К}$ ,  $T(z_0) = 273^{\circ}\text{К}$ ,  $z_0 = 0,1$  м,  $W_{\phi} = W(10) = 5$  м/с. При решении данной проблемы, как известно, возможны два подхода - лучевой и модовый. Далее применяется первый из указанных методов, поскольку при использовании модового потребовалось бы оперировать с собственными функциями рефракционного волновода, выражаемыми через специальные функции Эйри, плохо приспособленными для вычислений на ЭВМ. Заметим также, что в этом случае более прост и естественен учет импедансных условий на земной поверхности. Формально он сводится к введению коэффициента от-

ражения  $V$  луча, совпадающего с коэффициентом отражения плоской волны, падающей под некоторым углом на границу раздела двух сред. В свою очередь, коэффициент  $V$  выражается через соотношение комплексных импедансов грунта и атмосферы  $Z_1, Z_2$ :

$$V = \frac{Z \cos \psi_0 - 1}{Z \cos \psi_0 + 1}, \quad (3)$$

где  $Z = Z_1 + i Z_2$  - есть отношение вышеупомянутых импедансов,  $\psi_0$  - угол падения луча на границу, отсчитываемый от вертикали. Этот последний легко определяется через угол выхода луча из источника  $\theta$ . Частотные зависимости  $Z_1(\omega)$  и  $Z_2(\omega)$  даются формулами [14]

$$\begin{aligned} Z_1 &= 1 + 9,1 \left( \frac{\omega}{2\pi\sigma} \right)^{-3/4}, \\ Z_2 &= -11,9 \left( \frac{\omega}{2\pi\sigma} \right)^{-3/4}. \end{aligned} \quad (4)$$

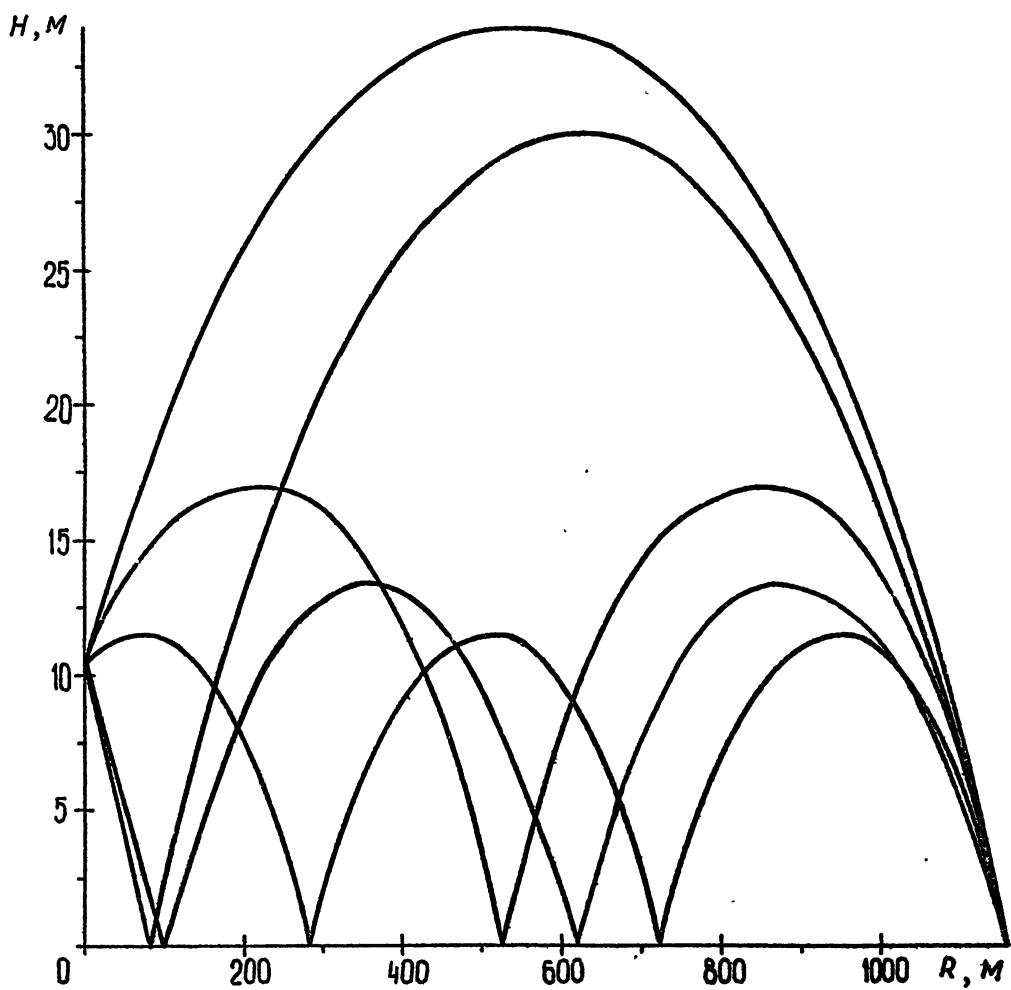
В выражениях (4) параметр  $\sigma$  - эмпирически устанавливаемая характеристическая частота, которая выбирается в соответствии со степенью жесткости грунта:  $\sigma \approx 50$  - в случае наиболее мягкого из всех типов поверхностей, а  $\sigma \approx 400$  - для наиболее жестких типов.

Лучевой метод расчета включает в себя несколько этапов, которые условно можно определить так: 1 - решение задачи нацеливания, 2 - подсчет времени пробега по лучу и интенсивности поля на каждом луче, 3 - расчет амплитуды и фазы акустического поля на интересующей частоте посредством суммирования сигналов, создаваемых каждым лучом, приходящим в точку приема с учетом их взаимной интерференции, и амплитудно-фазовой трансформации при отражении от грунта. Следует также обратить внимание на то, что расчет функции передачи с использованием выбранного лучевого метода имеет свои сложности, связанные с быстрым нарастанием числа лучей, приходящих в точку приема при увеличении дистанции источник - приемник. Оценки показывают, что уже при умеренной скорости ветра у

поверхности земля ( $W(10) = 5$  м/с) через каждые 200 м вдоль по трассе происходит увеличение количества лучей, приходящих в точку приема, на единицу. В частности, для трех рассчитанных в работе горизонтальных расстояний число лучей нарастает следующим образом:  $r_1 = 1170$  м - оно составляет  $n_1 = 5$ ,  $r_2 = 2160$  м -  $n_2 = 9$ , а для  $r_3 = 3160$  м -  $n_3 = 15$ . Поэтому на дистанции 5 км число лучей уже 25, а на 50 км оно достигает 250. Это обстоятельство и ограничало диапазон исследуемых расстояний тремя километрами. Лучевая картина, соответствующая удалению  $r_1$ , при распространении и звука вдоль по ветру, представлен на рис.1. При ранее отмеченных условиях и характере нарастания скорости звука и ветра с высотой (1) и (2), как видно из рис.1, имеет место монотонная дистанционно-угловая зависимость горизонтальной дальности прихода луча на уровень  $Z = 0$  от величины угла выхода  $\theta$ . Это обстоятельство весьма существенно, поскольку его учет позволяет сузить набор возможных комбинаций приходящих лучей при решении задачи нацеливания. Не менее важно отметить, что следствием монотонности дистанционно-угловой зависимости является отсутствие каустик в лучевой картине, характеризующей распространение звука вдоль по ветру. При тех же метеоусловиях, но в случае распространения против ветра, каустика существует, беря свое начало при  $Z = 0$  с точки  $r = 150$  м и круто уходя вверх по кривой  $z = z(r)$ , близкой к параболе (см. рис.2). Последнее из обстоятельств, на которое следует обратить внимание при рассмотрении лучевой картины звукового поля на дистанции  $r_1$ , состоит в том, что максимальная высота подъема одноциклового луча, характеризуемого наивысшей точкой поворота, не превышает 35 м над земной поверхностью. По этой причине при расчете интенсивности нет необходимости в учете изменения с высотой плотности атмосферы, входящей в произведение  $\rho c$  - определяющего его акустическое сопротивление. Спад последнего с высотой целиком задается функцией  $c(z)$ , представленной формулой (1). Такое утверждение остается в силе и для дистанций порядка 10 км, поскольку в этом случае максимальная высота точки поворота луча окажется равной  $Z = 350$  м, где изменения плотности весьма малы по сравнению с изменениями скорости звука  $C$ .

Поскольку в цитируемых выше работах лучевой метод и соответствующие выражения для полей подробно выводятся, здесь мы не будем детально останавливаться ни на одном из перечисленных ранее эта -

$v = 5 \text{ м/с}$  ( $H = 10 \text{ м}$ ) Звук по ветру

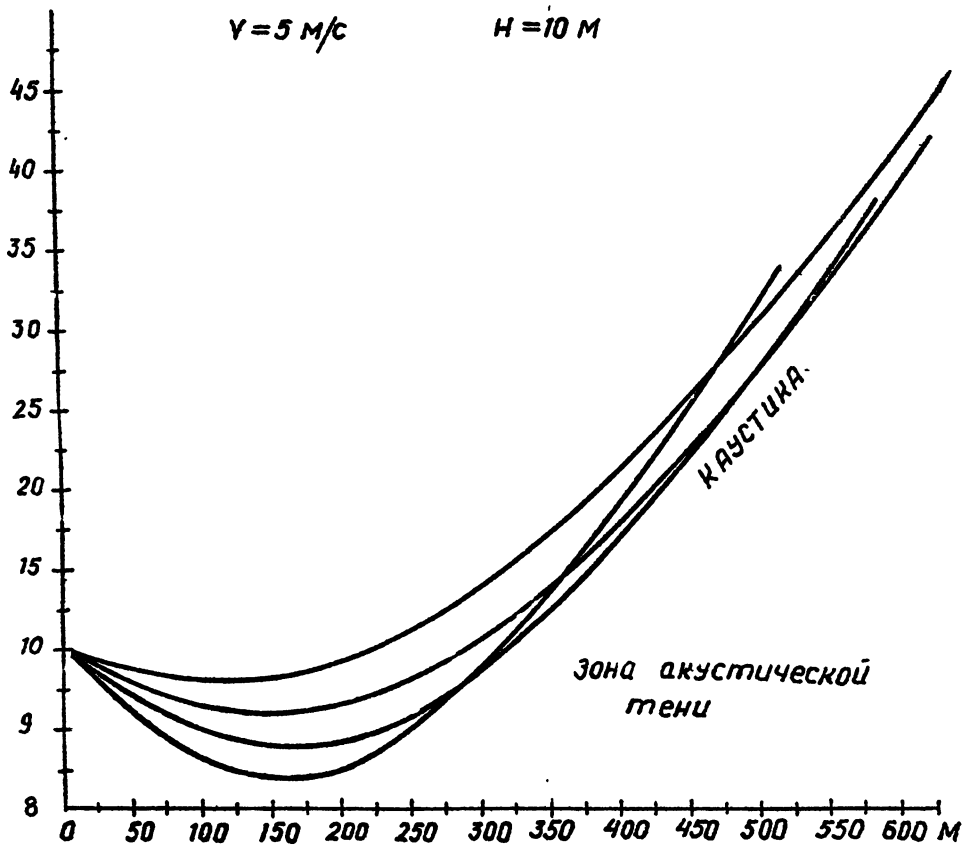


Р и с. I

Звук против ветра (Антиволновод)

$\leftarrow V$   
 $V = 5 \text{ м/с}$

$\rightarrow K$   
 $H = 10 \text{ м}$



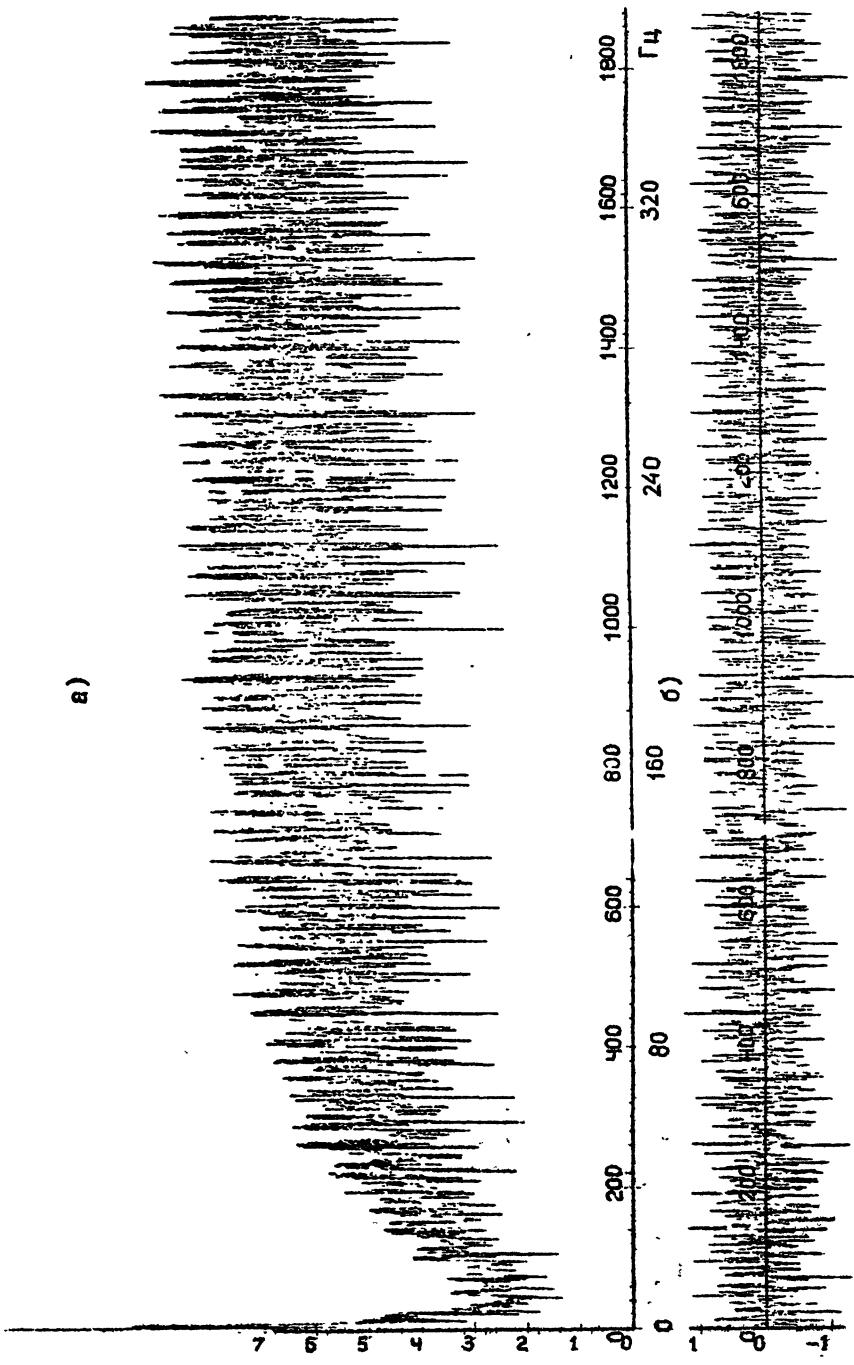
Р и с. 2



пов расчета.

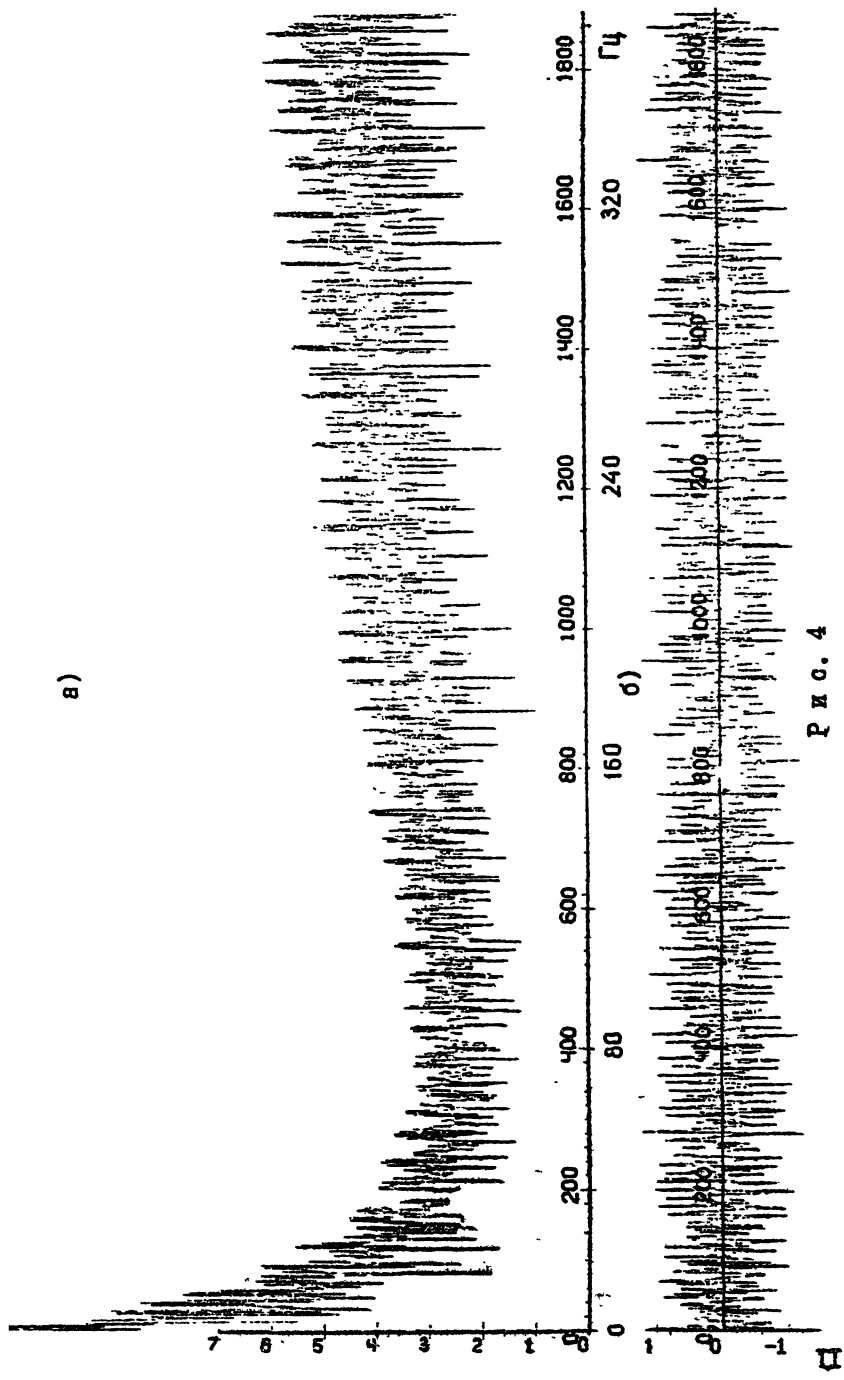
Далее рассмотрим результаты расчета спектральной функции передачи акустического сигнала для трех значений дистанции источник-приемник. Так, на рис.3а представлена амплитудно-частотная, а на рис.3б фазо-частотная характеристики передаточной функции, соответствующие расстоянию  $r_1$ , в случае мягкой подстилающей поверхности ( $\epsilon = 50$ ). Диапазон частот, для которого проведен расчет, составляет 0-376 Гц, при этом общее количество точек в спектре - 1880. Нетрудно видеть, что амплитудно-частотная и фазо-частотная зависимости отличаются сильной изрезанностью. Однако наряду с быстрыми изменениями амплитудной характеристики (флуктуативной ее частью) легко обнаружить и плавные изменения по частоте его среднего значения. То же можно видеть и на рис.4, на котором для более полного охвата возможных ситуаций представлена аналогичная функция передачи звука при его распространении над жестким грунтом ( $\epsilon = 400$ ). В частотном ходе среднего значения амплитудной характеристики при наличии мягкой границы раздела наблюдается минимум на частоте порядка  $f = 8-10$  Гц. В случае же жесткой границы указанный минимум приходится на частоты 70-80 Гц. В обоих случаях имеет место подъем амплитудной характеристики в области инфразвуковых частот и асимптотическое стремление снизу к некоторому уровню на высоких частотах. Обратим внимание на отличие в поведении флуктуативной части, характеризующей изрезанность на высоких частотах. Для жесткой подстилающей поверхности этот уровень на  $\sim 6$  дБ ниже, чем в случае мягкой. Такое же соотношение выполняется и для средних значений амплитудной характеристики. Кроме того, если в случае мягкой границы с ростом частоты имеет место заметное увеличение размаха флуктуативной компоненты функции передачи, то для жесткой - такое увеличение проявляется значительно слабее.

Для получения более полной картины изменения с расстоянием функции передачи рассмотрим ее вид на дистанциях, следующих по удаленности за первой, т.е. при  $r_2 = 2160$  м и  $r_3 = 3160$  м. Ее амплитудная и фазовая характеристики даны на рис.5 и рис.6 - для случаев мягкой и жесткой границ ( $r_2$ ) и на рис.7 и рис.8 - для тех же двух типов границ ( $r_3$ ). Характеристики передачи в этих случаях рассчитана для диапазона 0-94 Гц, в котором содержатся 470 отсчетных точек. Если сравнить амплитудные характерно-



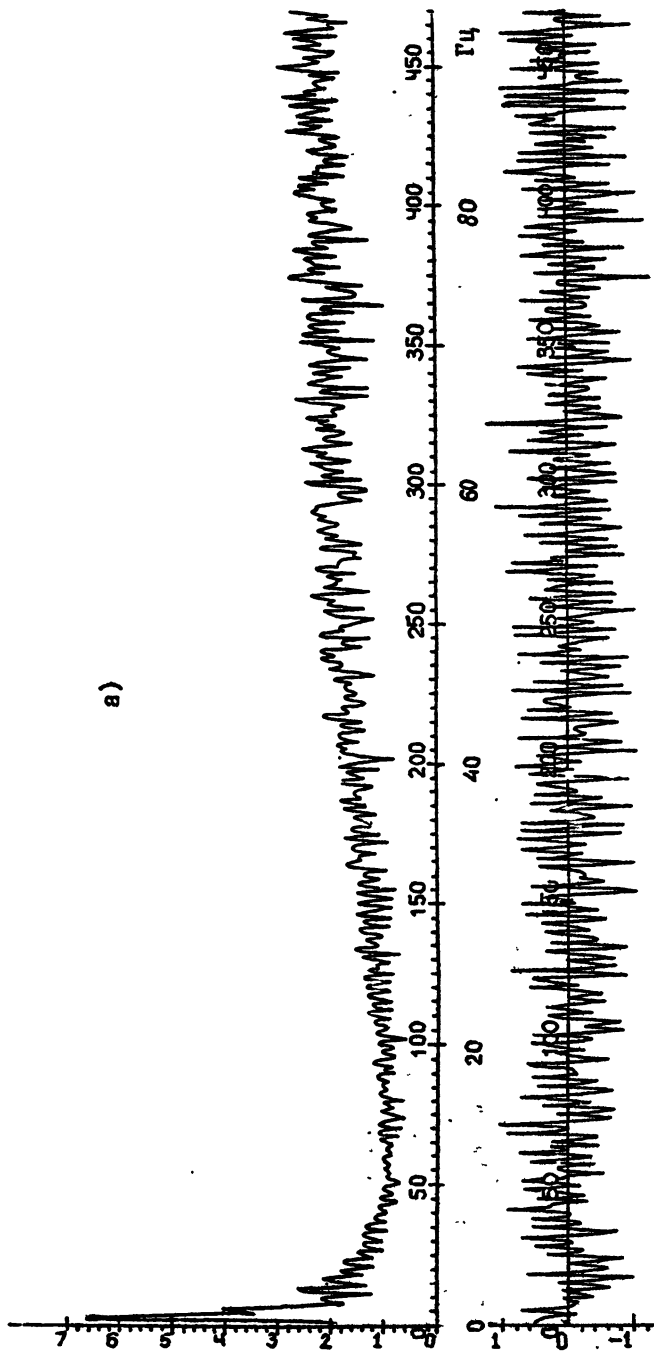
Р и о. 3

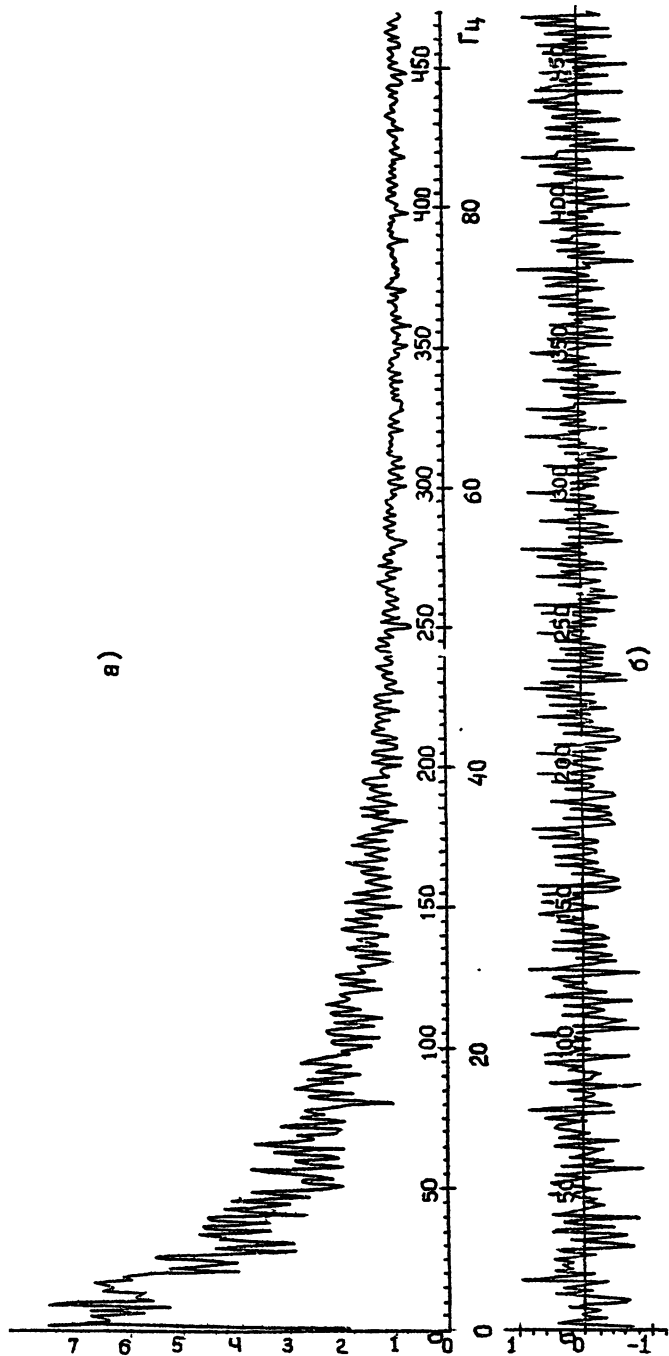
8)



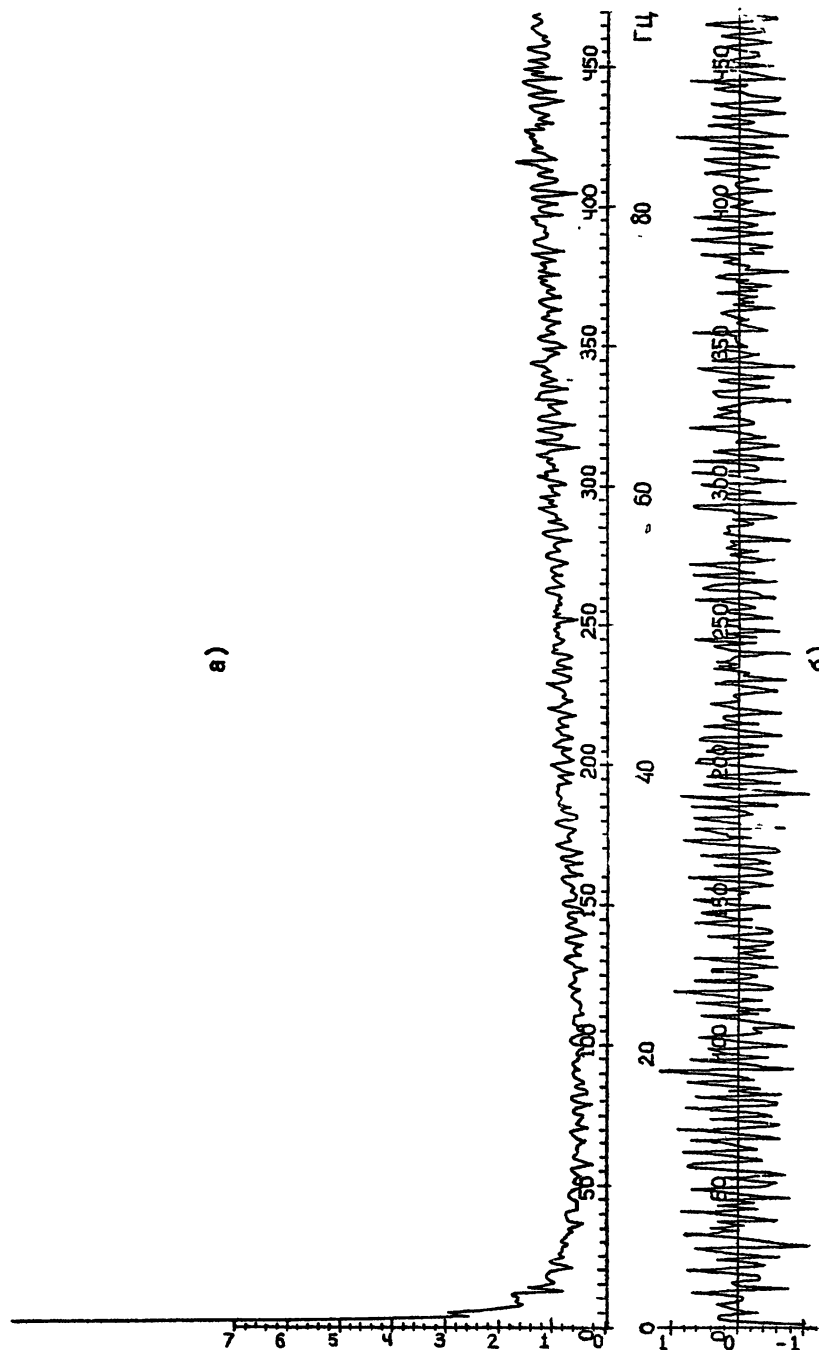
б)

Р и с. 4

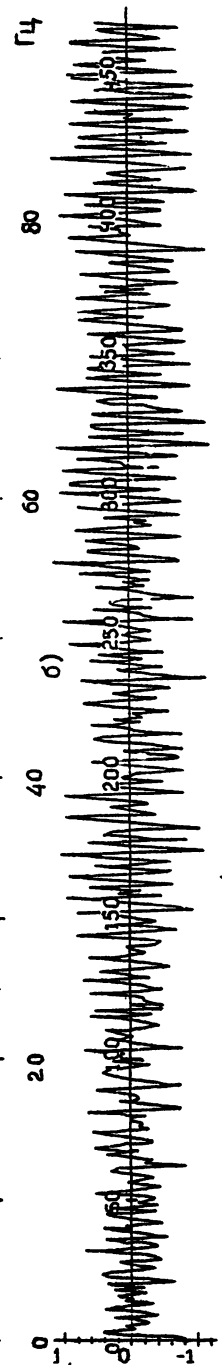
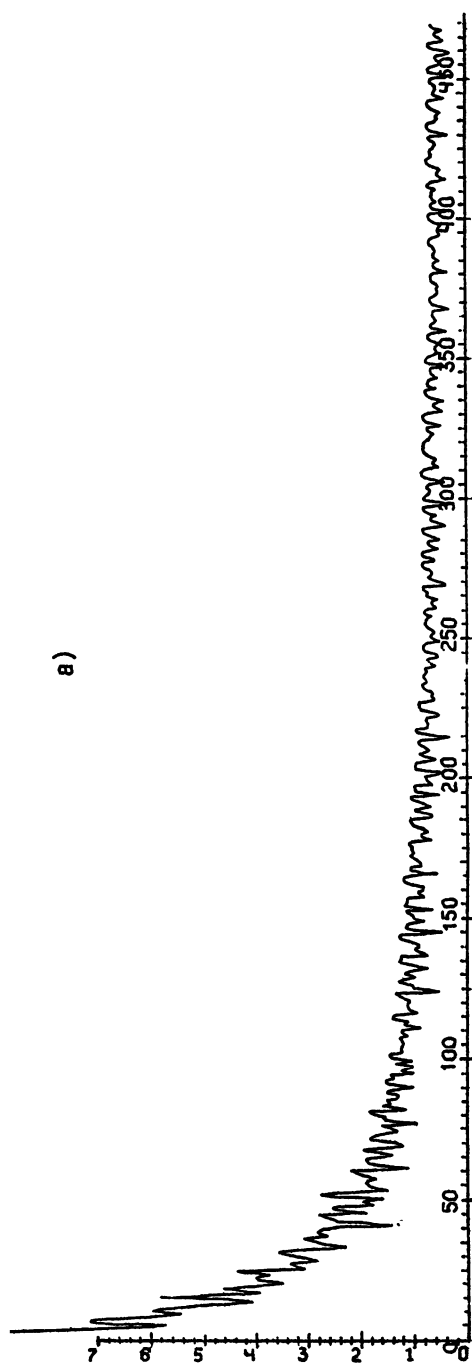




Р и с. 6



Р И С . 7



Р и с . 8

тики, относящиеся к разным дистанциям, то нетрудно увидеть, что для мягких подстилающих поверхностей минимум этой функции будет располагаться примерно в интервале 9–15 Гц, а для жестких – 70–90 Гц, причем сдвига частоты минимума с ростом дистанции практически не происходит. Такое сравнение свидетельствует о существенном влиянии отбора энергии у волны границей раздела при распространении звука в приземном атмосферном канале. Представление о механизме потерь легко получить, учитывая "просачивание" звука внутрь границы при многократном переотражении от нее лучей. Можно предположить, что флуктуативная часть амплитудной характеристики связана с проявлением "многолучевости" волнрвой структуры акустического поля, в то время как наблюдаемая на вышепредставленных рисунках вариация его среднего значения обязана наличию сравнительно плавных частотных изменений в коэффициенте отражения звука от границы раздела. Полученное расчетом среднее значение амплитудной характеристики как функцию частоты нетрудно интерпретировать, если учесть, что реальная часть коэффициента отражения (см. формулы (3) и (4)) имеет монотонную зависимость и обращается в нуль на частоте  $f = 6 \sqrt[3]{225^2 \cos^4 \psi_0}$  (где  $\psi_0 \approx \pi/2$ ), соответствующей той, на которой наблюдается минимум характеристики. Прогрессирующее с расстоянием убывание интенсивности многократно переотражающихся лучей, обусловленное прониканием звука через границу раздела, более всего сказывается вблизи вышеуказанного значения частоты, на которой и образуется минимум.

Характер зависимости флуктуативной компоненты, вероятно, определяется взаимными фазовыми задержками волн, идущих по разным лучам. Кроме того, из всей совокупности лучей, приходящих в точку приема, наибольшей интенсивностью обладают стелющиеся по поверхности и многократно переотражаемые землей лучи. Принимая во внимание нарастание с частотой флуктуативной компоненты, следует сделать вывод, что в случае мягкой границы на высоких частотах число лучей, преобладающих по уровню звукового давления и достигаящих приемника, составляет не более двух-трех. Интерференция этих лучей с примерно равной интенсивностью поля и приводит к значительным по уровню биениям. В подтверждение сказанного укажем также на некоторую периодичность появления на оси частот резких провалов и выбросов в амплитудной и фазовой характеристиках с масштабом порядка 5–6 Гц.



Подводя итог изложению результатов численного моделирования и можно сделать следующие выводы.

1. С помощью лучевого метода рассчитана и алгоритмизирована функция передачи звука в приземном атмосферном волноводе со стратификацией, вызванной профилем скорости ветра.
2. Выяснено, что амплитудная и фазовая характеристики функции передачи имеют сильно изрезанную зависимость от частоты.
3. Среднему значению амплитудной характеристики функции передачи соответствует характерный минимум, лежащий в диапазоне низких звуковых частот.
4. Обнаружено значительное влияние на частоту минимума и на разброс выбросов функции передачи звука параметров жесткости земной поверхности, описываемых импедансными условиями на границе раздела сред.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980. - 304 с.
2. Бреховских Л.М., Годиц О.А. Акустика слоистых сред. - М.: Главная ред. физ.-мат. лит., 1989. - 412 с.
3. Разин А.В. О распространении звука в неоднородной движущейся атмосфере//Изв.АН СССР. ФАО. - 1982. - Т.18, № 6. - С.674 - 676.
4. Осташев В.Е. Волновое описание распространения звука в стратифицированной движущейся атмосфере//Акуст.ж. - 1984. - Т.30, № 4. - С.521-526.
5. Чунчужов И.П. О поле точечного низкочастотного источника звука в атмосфере с неоднородным по высоте ветром//Акуст.ж. - 1984. - Т.30, № 4. - С.546-552.
6. Осташев В.Е. Теория распространения звука в неоднородной движущейся атмосфере (обзор)//Изв.АН СССР. ФАО. - 1985. - Т.21, № 4. - С.358-373.
7. Осташев В.Е. О звуковом поле точечного источника в стратифи-

- цированной движущейся двухкомпонентной среде//Изв.АН СССР .  
ФАО. - 1985. - Т.21, № 9. - С.949-955.
8. Чунгузов И.П. Поле точечного источника звука в приземном слое атмосферы//Акуст.ж. - 1985. - Т.31, № 1. - С.134-136.
9. Разин А.В. О расчете звуковых полей в атмосферном рефракционном волноводе//Изв.АН СССР. ФАО. - 1985. - Т.21, № 7. - С.707-713.
10. Осташев В.Е. Волноводное распространение высокочастотного звукового поля в стратифицированной движущейся среде вблизи импедансной поверхности //Изв.АН СССР. ФАО. - 1986. - Т.22, № 11. - С.1204-1212.
11. Осташев В.Е. Высокочастотное звуковое поле точечного источника, расположенного над импедансной поверхностью в стратифицированной движущейся среде//Изв.АН СССР. ФАО. - 1987. - Т.23, № 5. - С.493-503.
12. Заварина М.В. Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1971.- 164 с.
13. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 640 с.
14. Chessell C.I. Meteorological and ground effects on the propagation of aircraft noise close to the earth's surface // J. Sound Vib. - 1978. - V.60, №2. - P.251-266.

Дата поступления статьи  
29 марта 1993 г.