

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 280

ЛУЧЕВАЯ СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ
В СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Ю.В.Новиков

В.Е.Фридман

Горький 1989

Новиков Д. В., Фридман В. Е.

ЛУЧЕВАЯ СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЕ. // Препринт № 280. - Горький: НИРФИ, 1989. - 29 с.

УДК 551.596.1

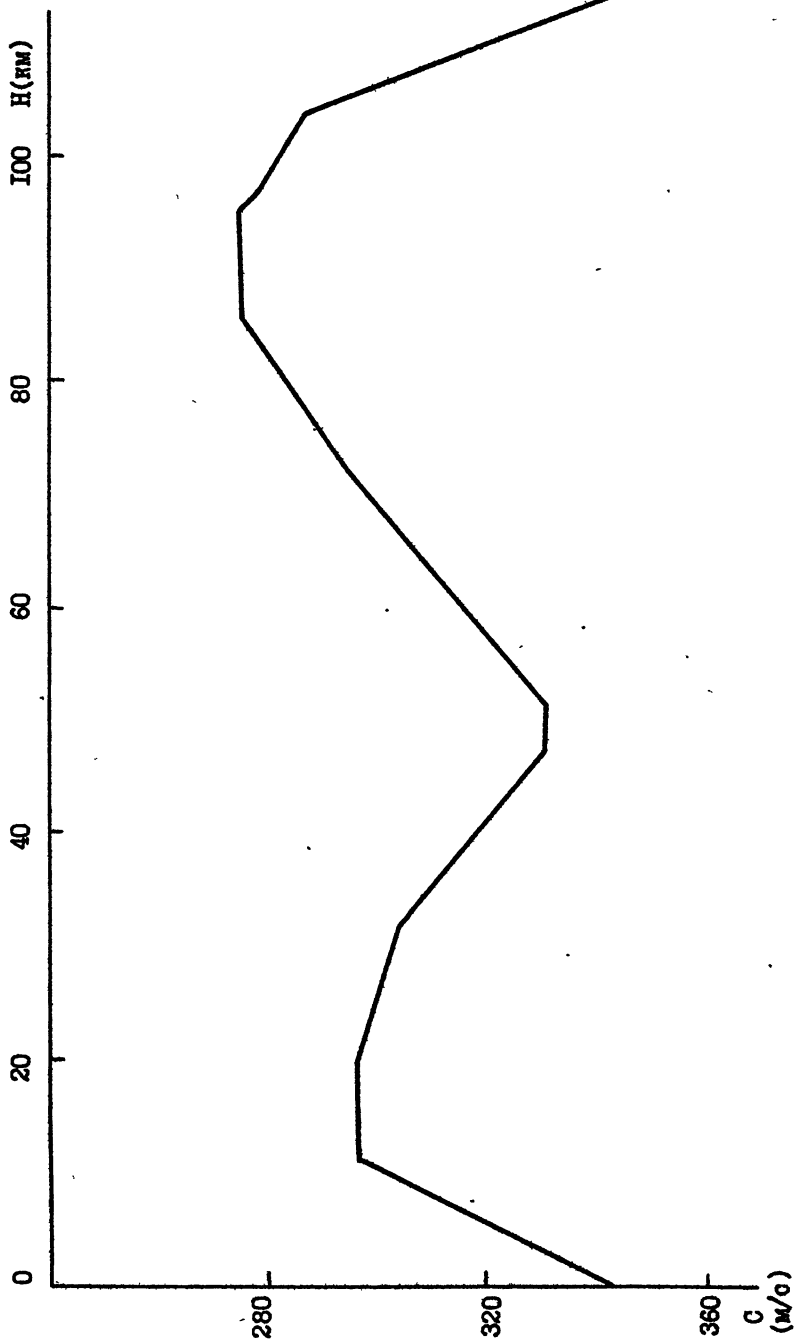
Приведены результаты расчета звуковых полей в земной атмосфере от источника, положение которого меняется от уровня моря до высоты 10 км с шагом 1 км. Для расчета лучевой структуры использована стандартная атмосфера. Лучевые траектории рассчитаны в диапазоне углов скольжения $+90^{\circ}$ + -90° с шагом 2° .

Земная атмосфера характеризуется быстрым уменьшением плотности с высотой и немонотонным профилем скорости звука. Хотя параметры атмосферы испытывают широтные и сезонные вариации, а также воздействие случайных возмущений, в среднем структура земной атмосферы остается весьма устойчивой. Для описания такой средней структуры используются "стандартные атмосферы", составленные по многолетним измерениям параметров различными инструментальными способами. Известны советский и американский стандарты средней атмосферы /1,2/. Профиль скорости звука в атмосфере формирует лучевую структуру звукового поля. Очевидно, что стандартная атмосфера дает некую усредненную и, вообще говоря, достаточно устойчивую лучевую структуру акустического поля, вид которой определяется высотой положения источника.

Целью данной работы является своего рода районирование звуковых полей в атмосфере. Здесь, пока без учета широтных и сезонных вариаций, приводятся результаты расчетов лучевой структуры акустического поля от источника, положение которого меняется по высоте от уровня моря до 10 километров. Расчеты лучевой структуры проводятся обычным методом, используя уравнение Снеллиуса и данные стандартной атмосферы /1/. Профиль скорости звука стандартной атмосферы приведен на рис.1. Траектория луча, выходящего из источника, расположенного на высоте H , описывается интегралом

$$r(z) = \int_H^z \operatorname{ctg} \theta(z) dz, \quad (1)$$

где θ - угол скольжения луча, z - вертикальная координата, r - горизонтальная координата. Закона Снеллиуса связывает текущий угол скольжения θ с его начальным значением $\theta_0 = \theta(z=H)$:



Р и с. 1. Профиль скорости звука в стандартной атмосфере

$$\frac{c(z)}{\cos \theta(z)} = \frac{c_0}{\cos \theta_0} \quad (2)$$

Используя (2) в интеграле (1), получаем окончательную формулу для определения лучевой траектории акустического поля:

$$r(z) = \int_H^z \frac{c(z) \cos \theta_0 / c_0}{[1 - c^2(z) \cos^2 \theta_0 / c_0^2]^{1/2}} dz \quad (3)$$

Здесь $c(z)$ – скорость звука, $c_0 = c(z=H)$ скорость звука на уровне положения источника. Таким образом, лучевая структура описывается двухпараметрическим выражением (3), которое определяется начальным углом скольжения и высотой источника. Расчеты лучевой структуры проводились для разных углов скольжения в диапазоне $90^\circ - -90^\circ$ с шагом выдачи по углу $\Delta \theta = 2^\circ$. Диапазон высот источника составлял 0 – 10 км с шагом 1 км. Результаты расчетов приводятся в диапазоне высот от 0 до 120 км и горизонтальных расстояний до 500 км. В тех случаях, когда лучевая траектория касается поверхности земли, ее дальнейшая трасса рассчитывается с учетом нормального отражения. Данные расчетов приведены на рис. 2–12. Детали лучевых траекторий, направленных от источника в сторону поверхности земли, приводятся на рис. 13–22. На этих рисунках вертикальный масштаб изменяется и остается равным высоте положения источника. Отражения лучей, направленных от источника к поверхности, не рассматриваются. Важным здесь является определение горизонтальной зоны засветки лучами, входящими на поверхность.

Кратко проанализируем полученные результаты. Средняя атмосфера формирует лучи наземного источника (рис. 2) таким образом, что поверхность не озвучивается: лучи уходят в тропосферу и далее в стратосферу, в которой имеется область (на высоте 45–50 км) малого значения углов скольжения (для лучей, выходящих при малых начальных углах скольжения). При этом имеет место сжатие лучевых трубок на высотах локального максимума скорости звука (подробнее это явление анализируется в /3/). Возврат лучей к поверхности происходит на расстоянии, превышающем 400 км, с которого начинается зона слышимости.

Неизменной остается лучевая картина при увеличении высоты источника до 1 км (рис. 3). Здесь, правда, за счет включения лучей,

$H_S(\text{KM}) = 0.0$

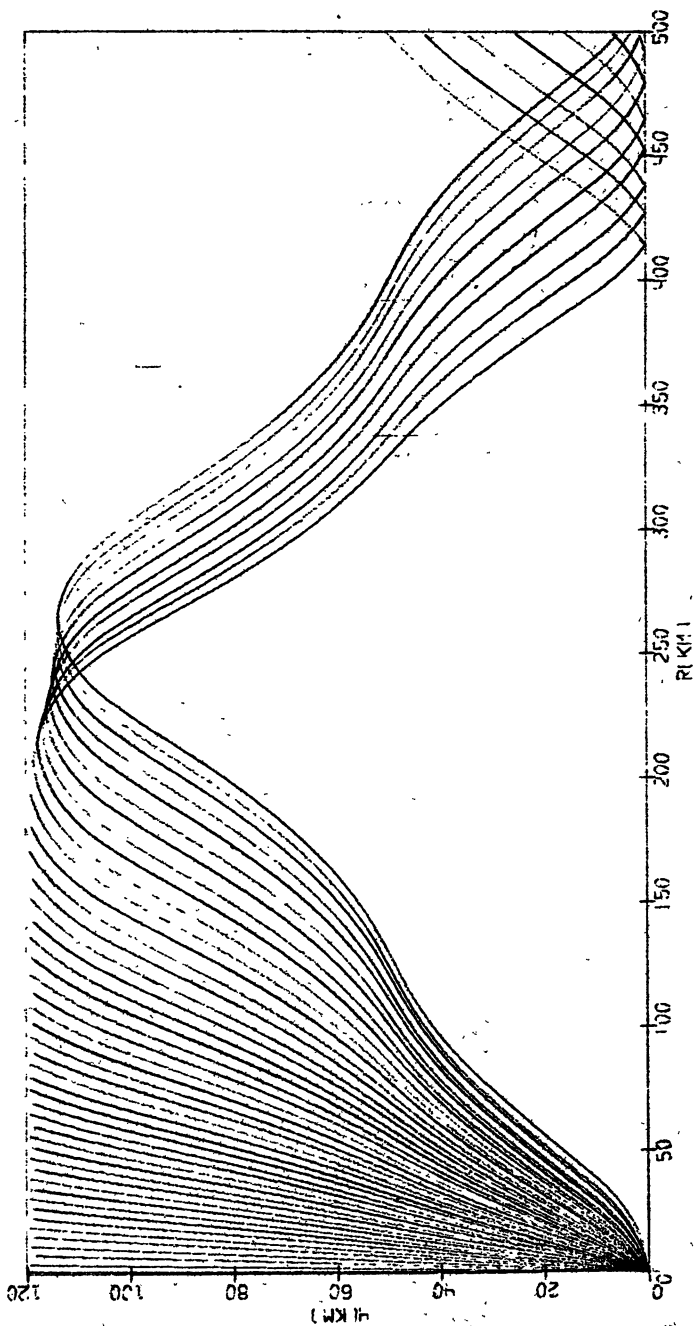


Рис. 2. Лучевая картина наземного источника.

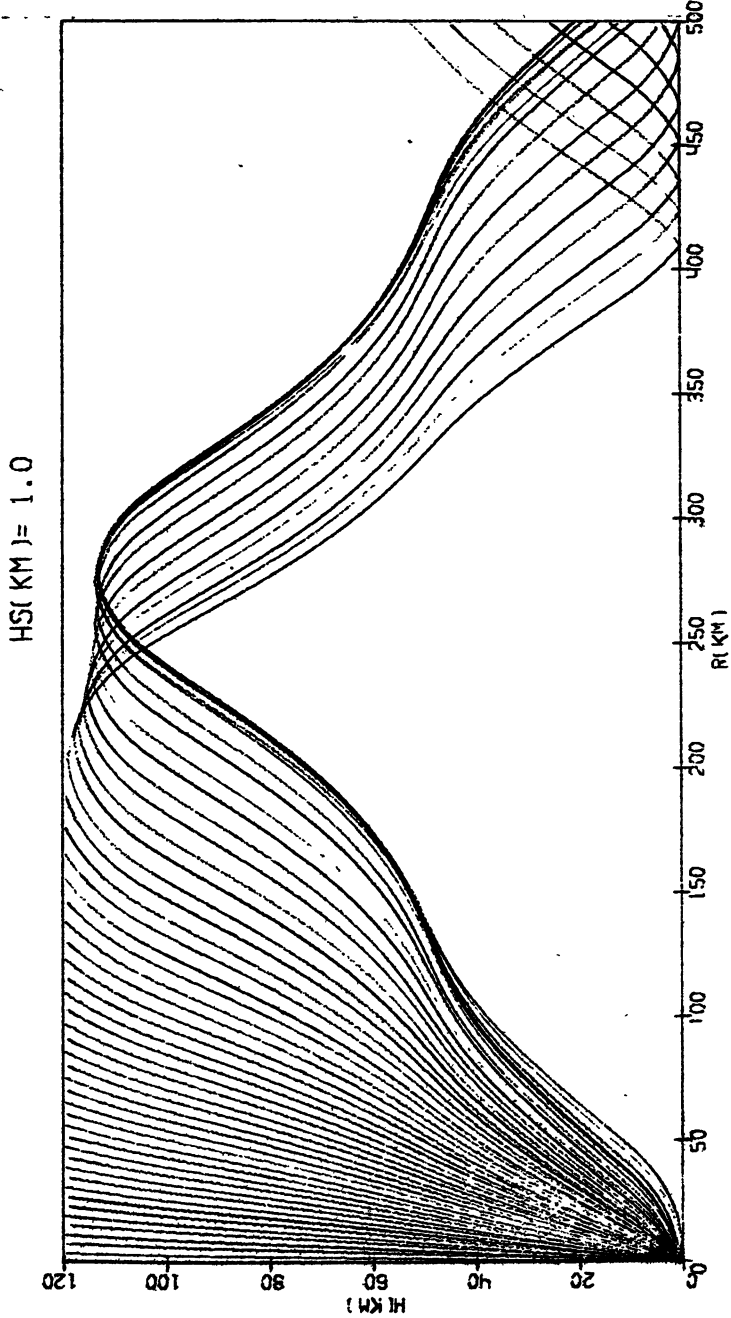


Рис. 3. Образование каустики лучами, выходящими под малыми углами скольжения. Высота положения источника $H=1$ км.

$H_S(KM) = 2.0$

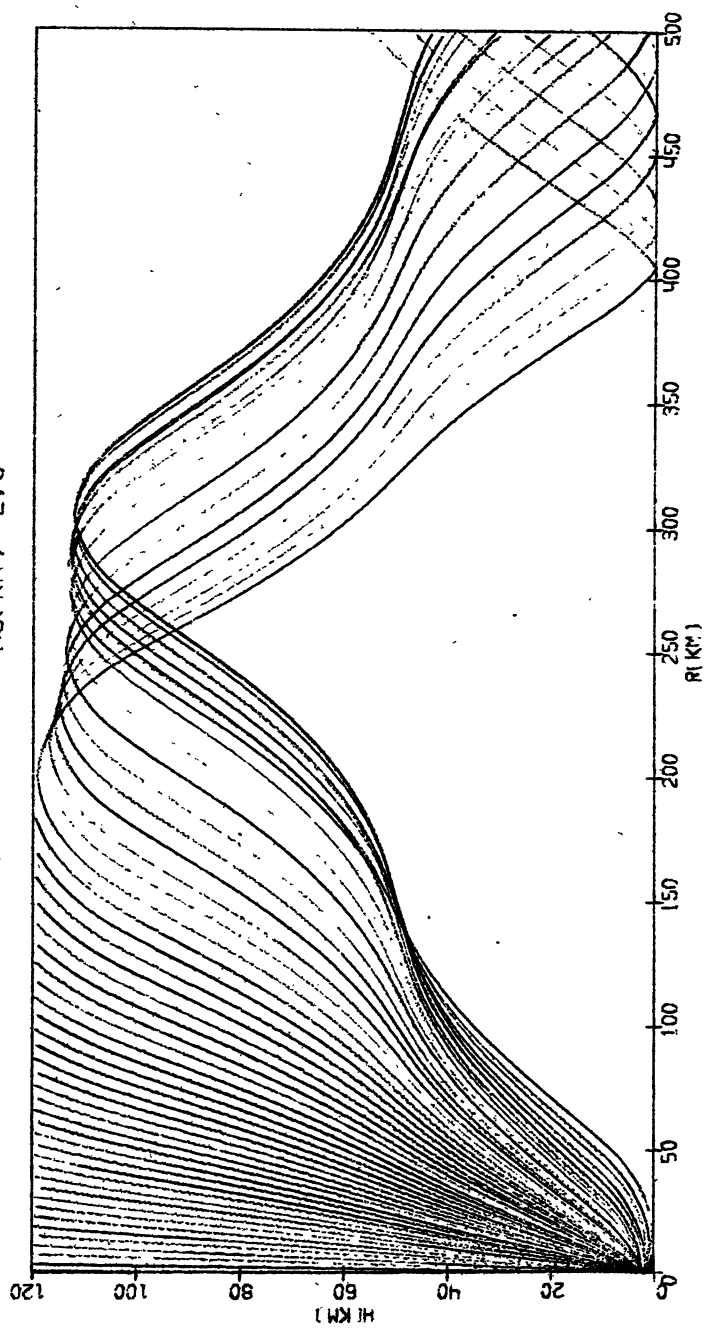


Рис. 4. Лучевая картина при $H = 2$ км.

$H_s(KM) = 3.0$

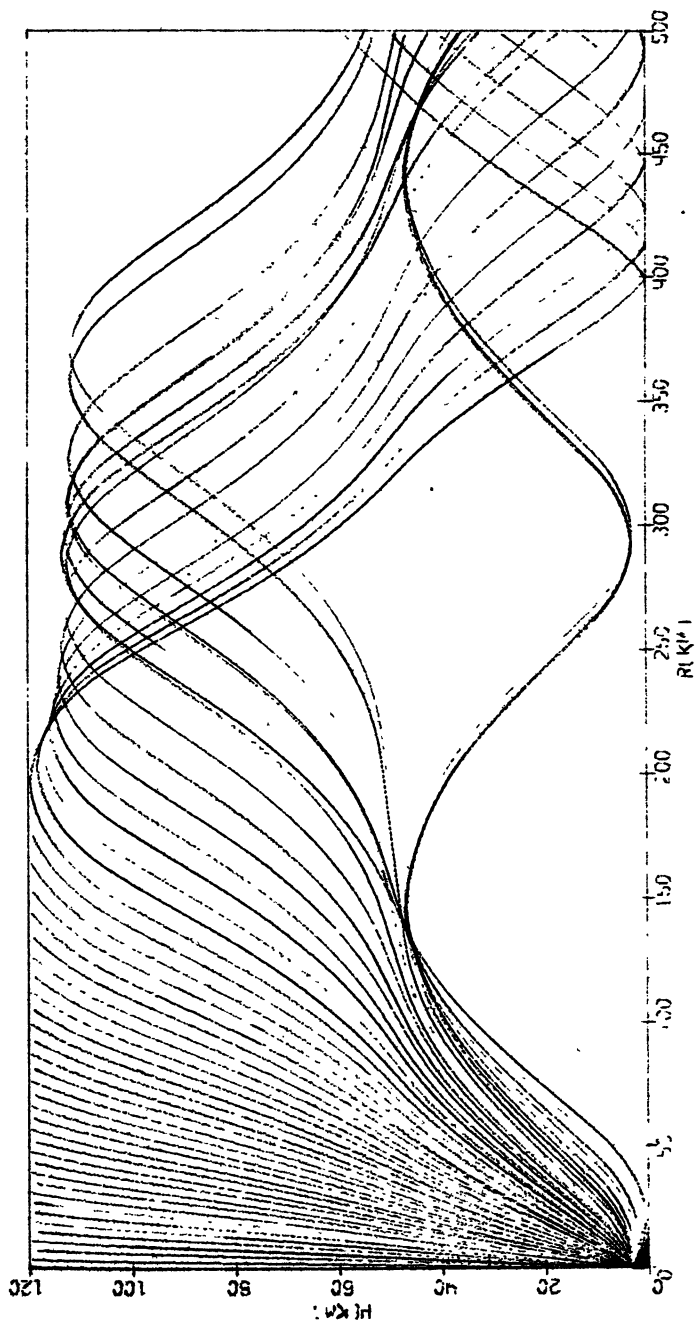


Рис. 5. Формирование волнового и фокальной зоны при $H = 3$ км.

HSI (KM) = 4.0

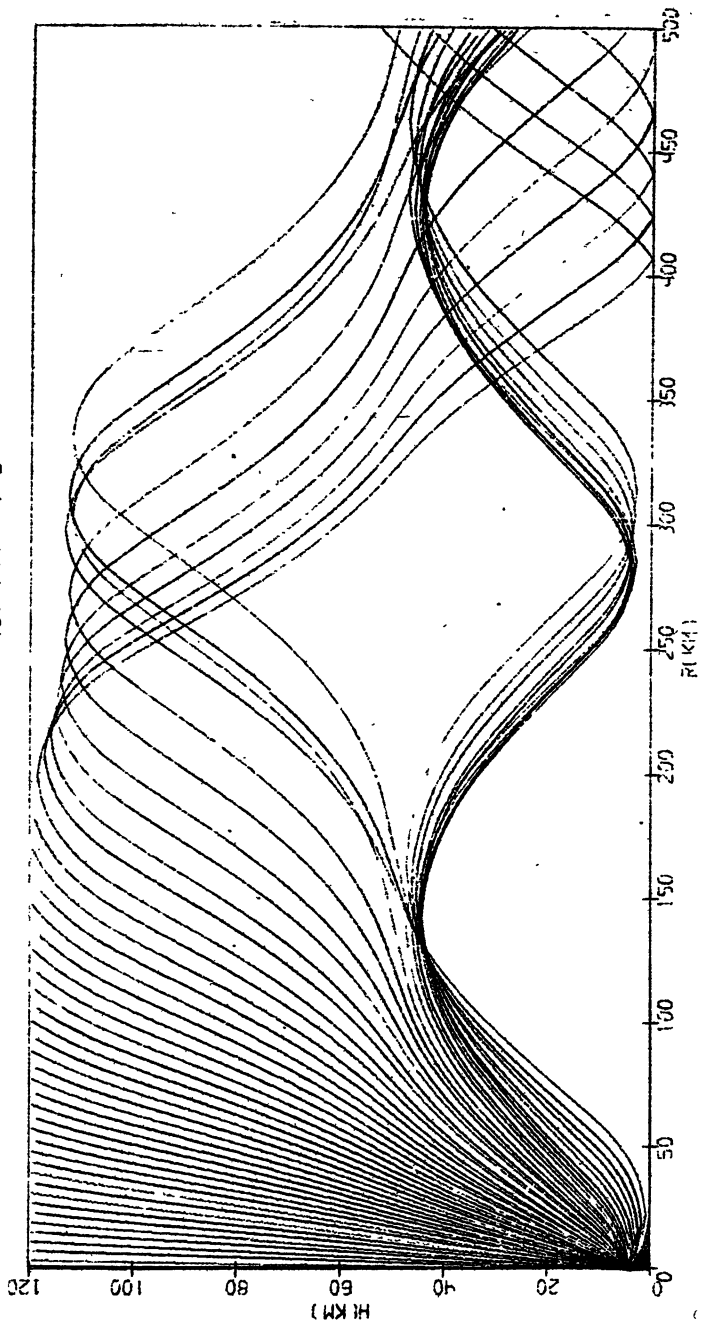


Рис. 6. Лучевая картина при $H = 4$ км.

$H_S(KM) = 5.0$

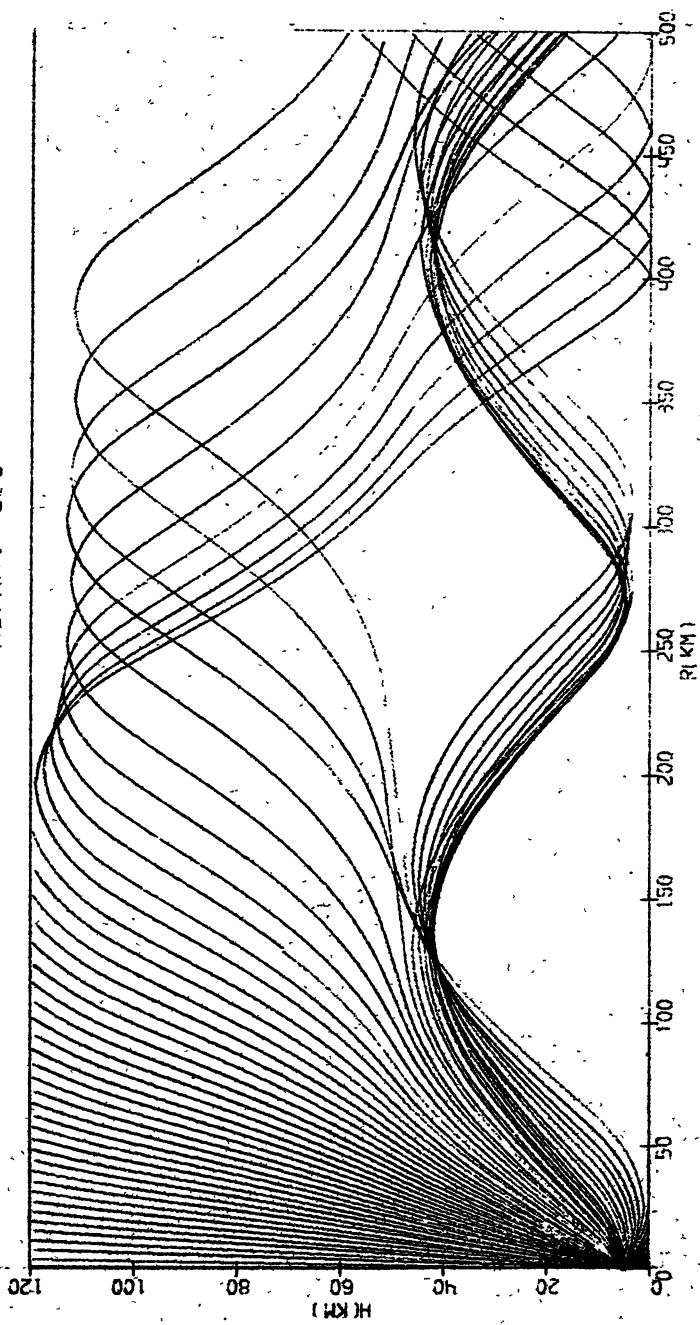


Рис.7. Лучевая картина при $H = 5$ км. Медленный дрейф фокуса.

$HS(KM) = 6.0$

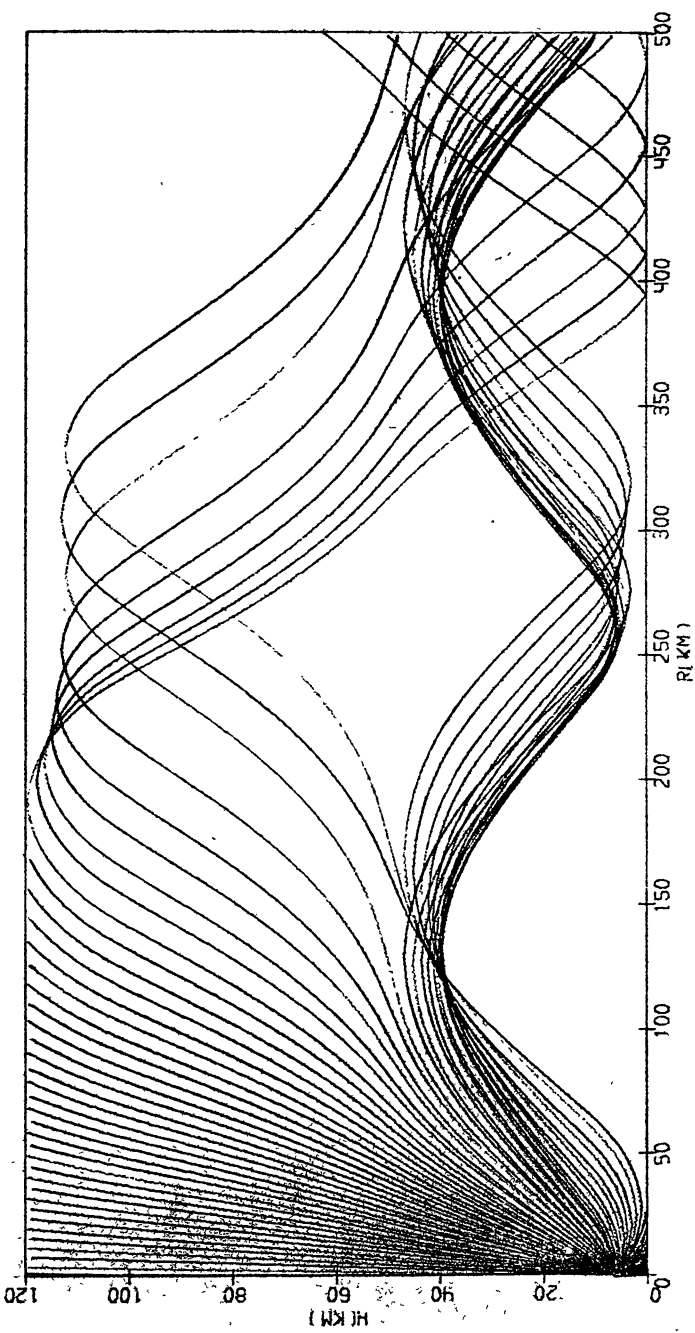


Рис.8. Начало трансформации фокуса. Высота $H = 6$ км.

$HS(KM) = 7.0$

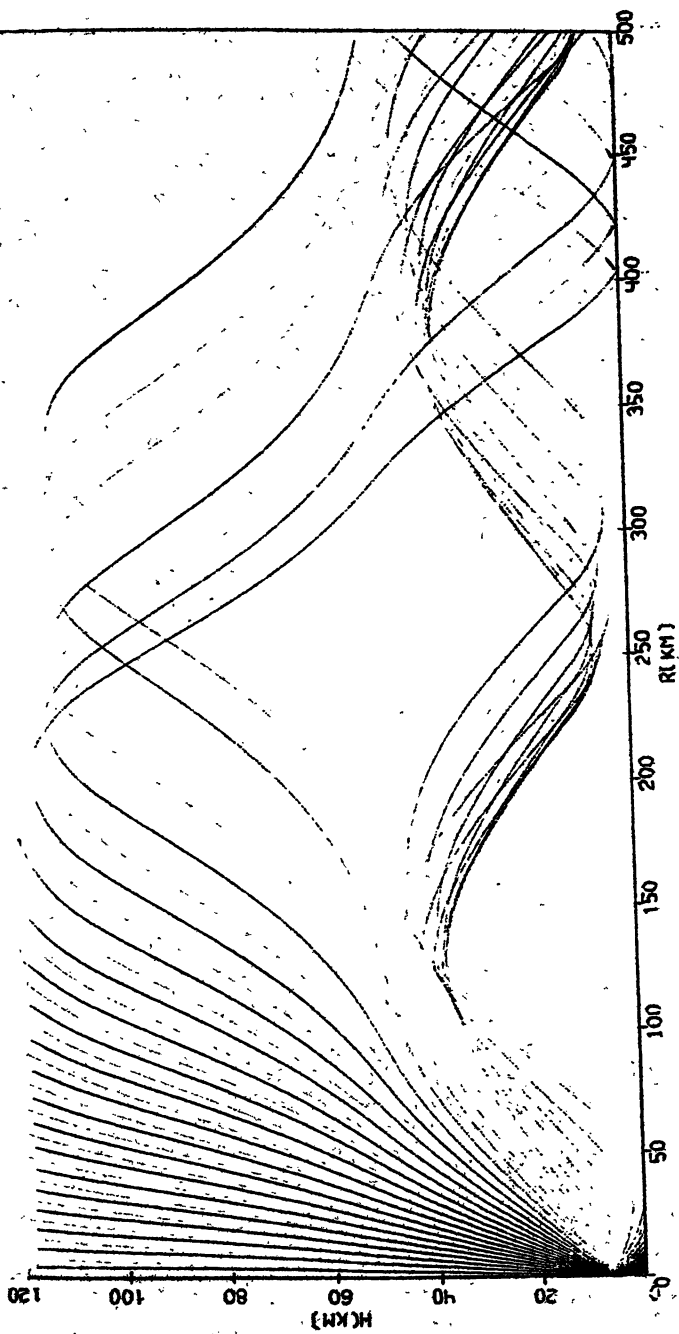


Рис. 9. Лучевая картина при $H = 7$ км.

$HS(KM) = 8.0$

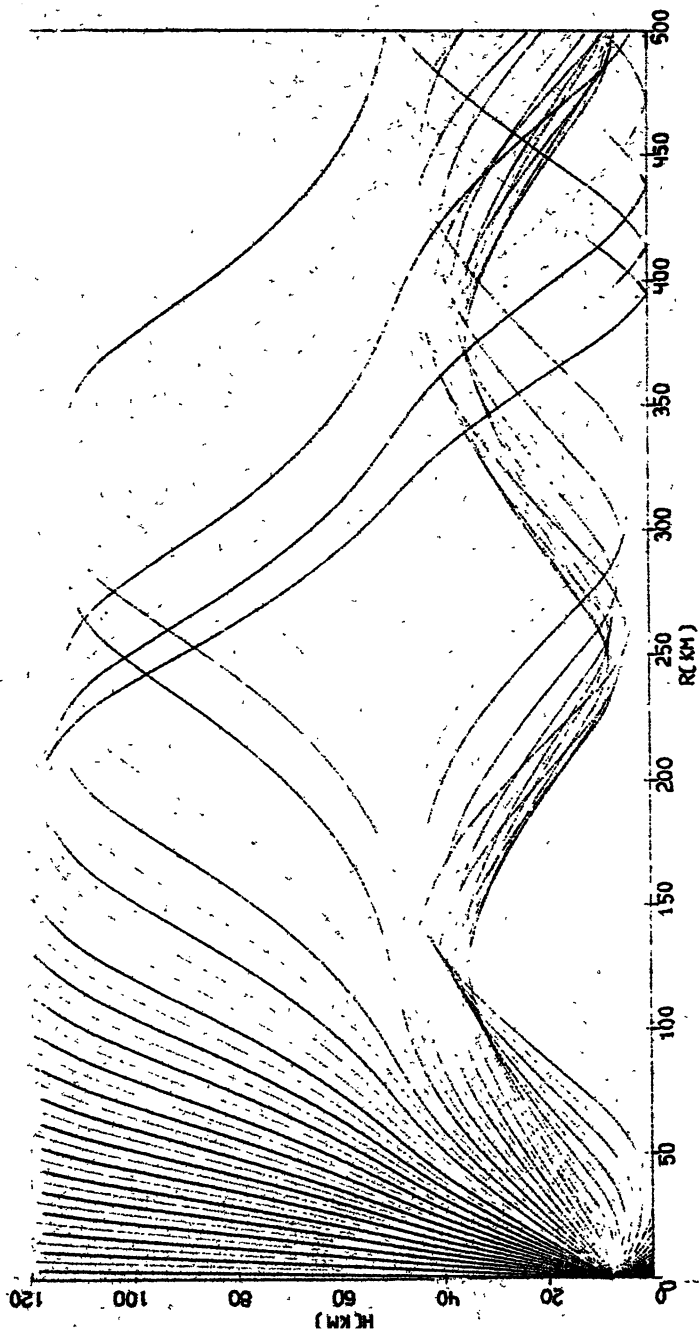


Рис. 10. Лучевая картина при $H = 8$ км.

$HS(KM) = 9.0$

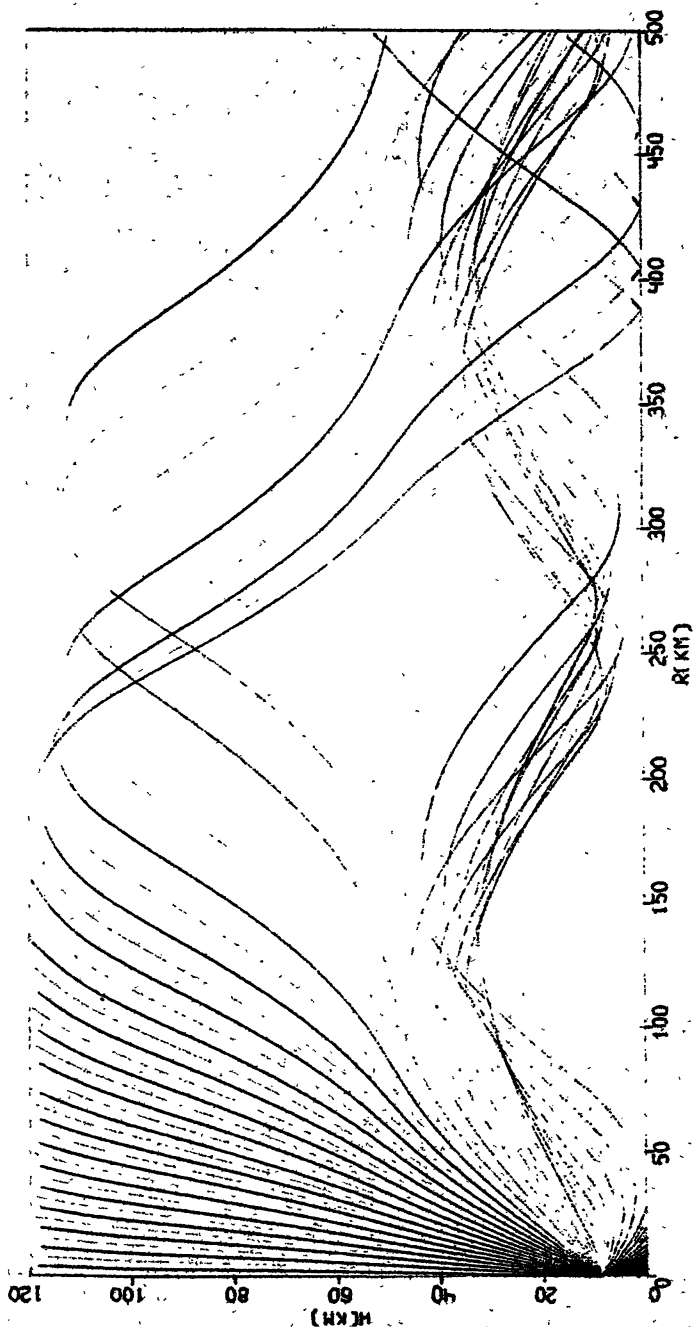


Рис. 11. Лучевая картина при $H = 9$ км.

HS(KM) = 10.0

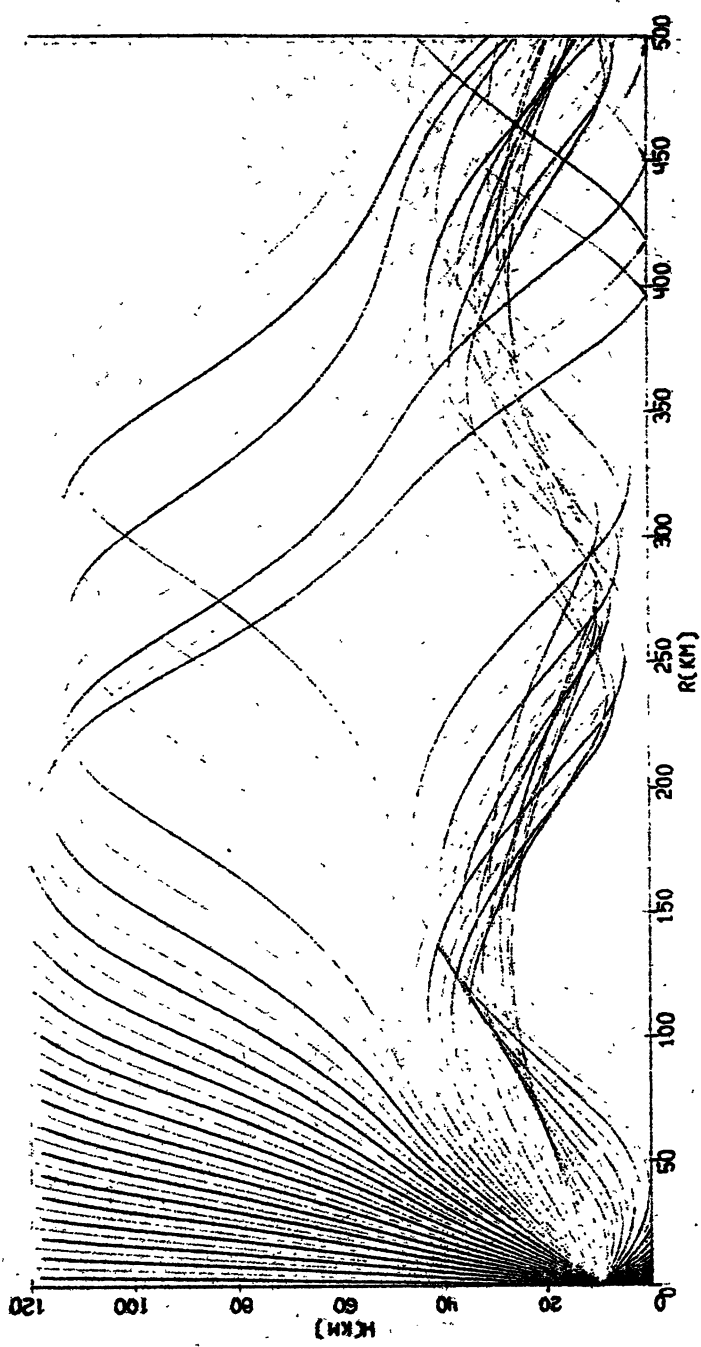


Рис.12а. Лучевая картина при H = 10 км.

HS (KM) = 10,0

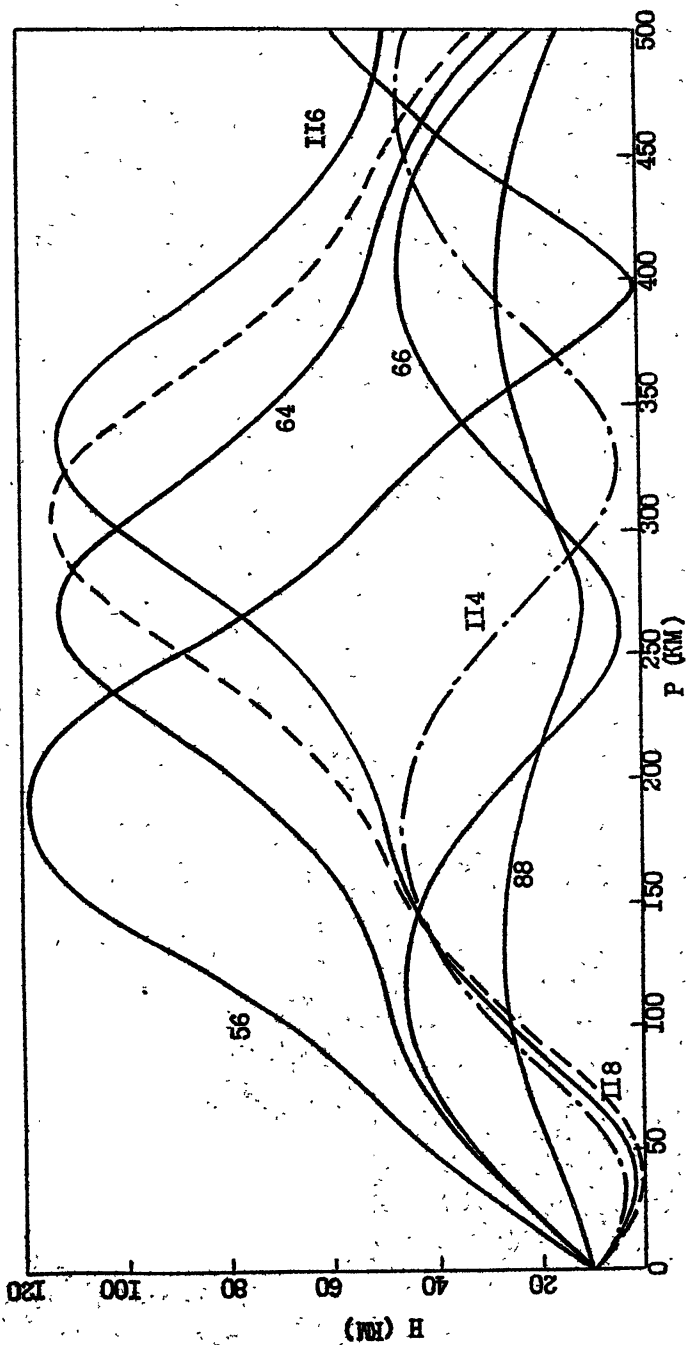
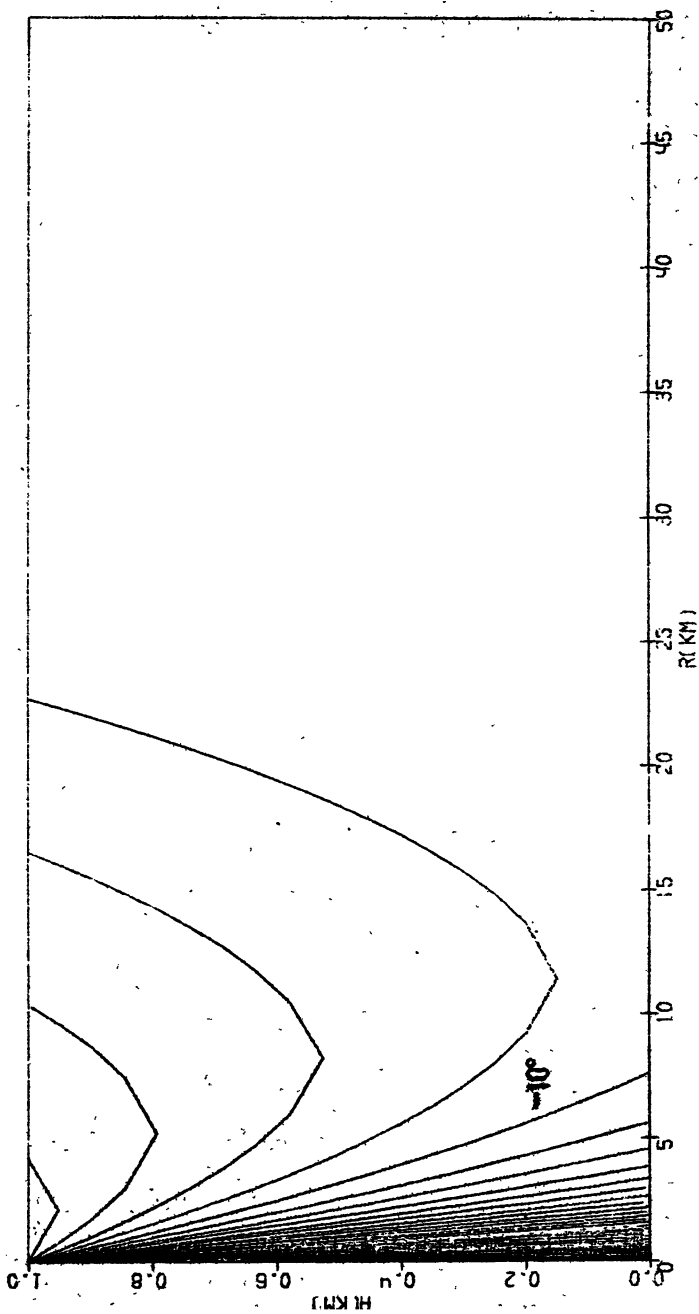
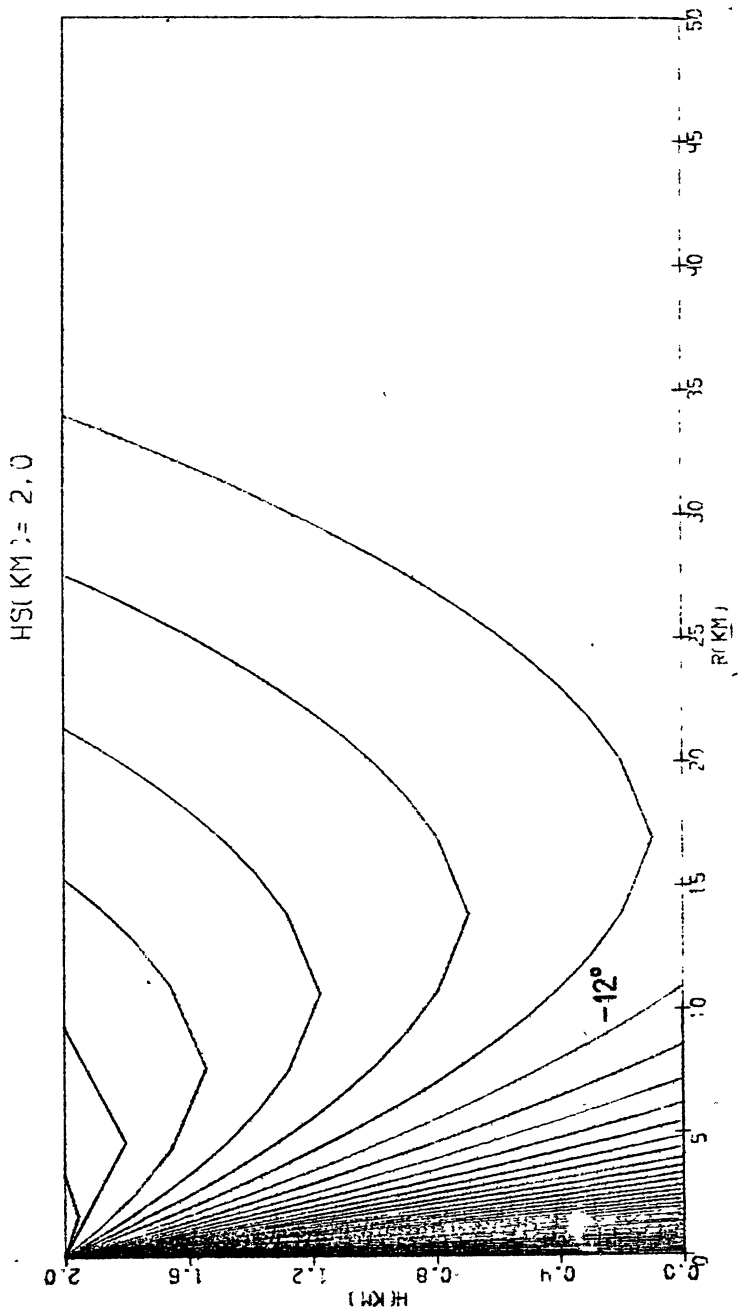


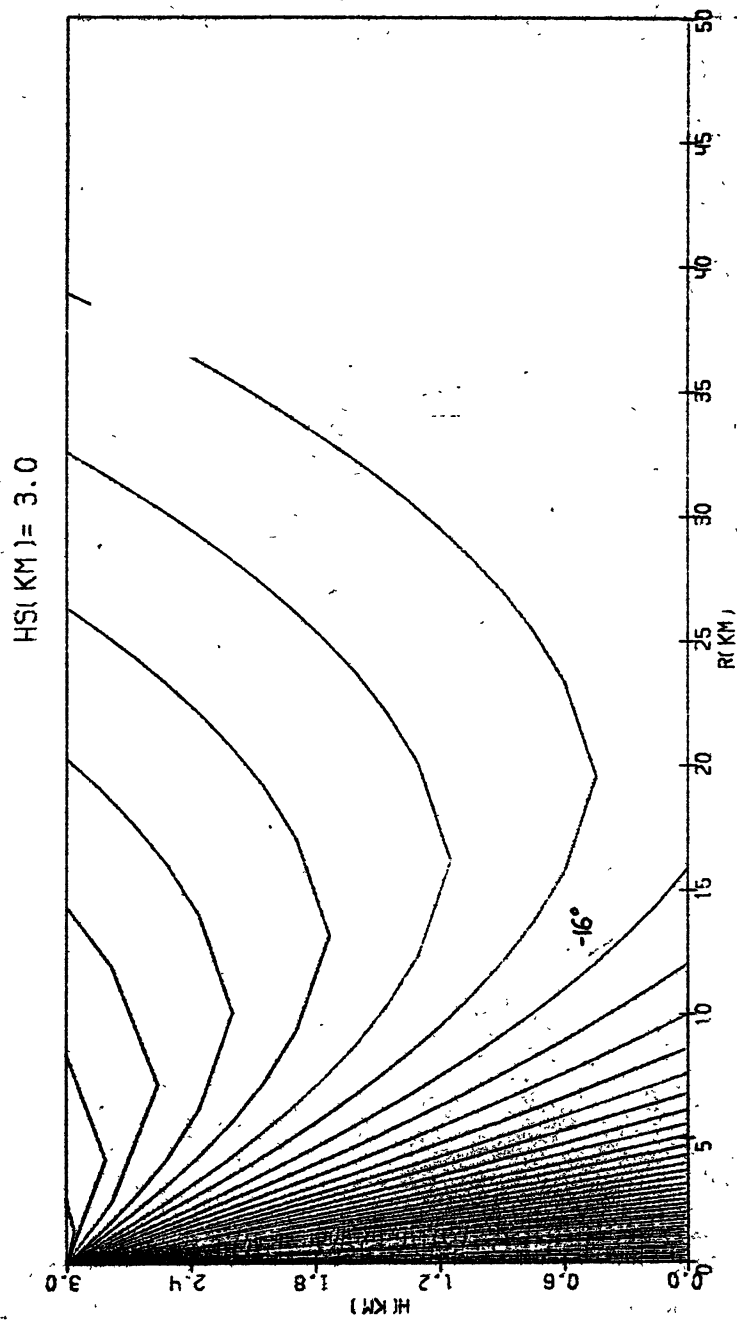
Рис. 126. Лучи, формирующие каустики, волновод, зону тени при $H = 10$ км.
Значения углов, указанных около кривых, отсчитываются от вертикальной оси.

$HS(KM) = 1.0$


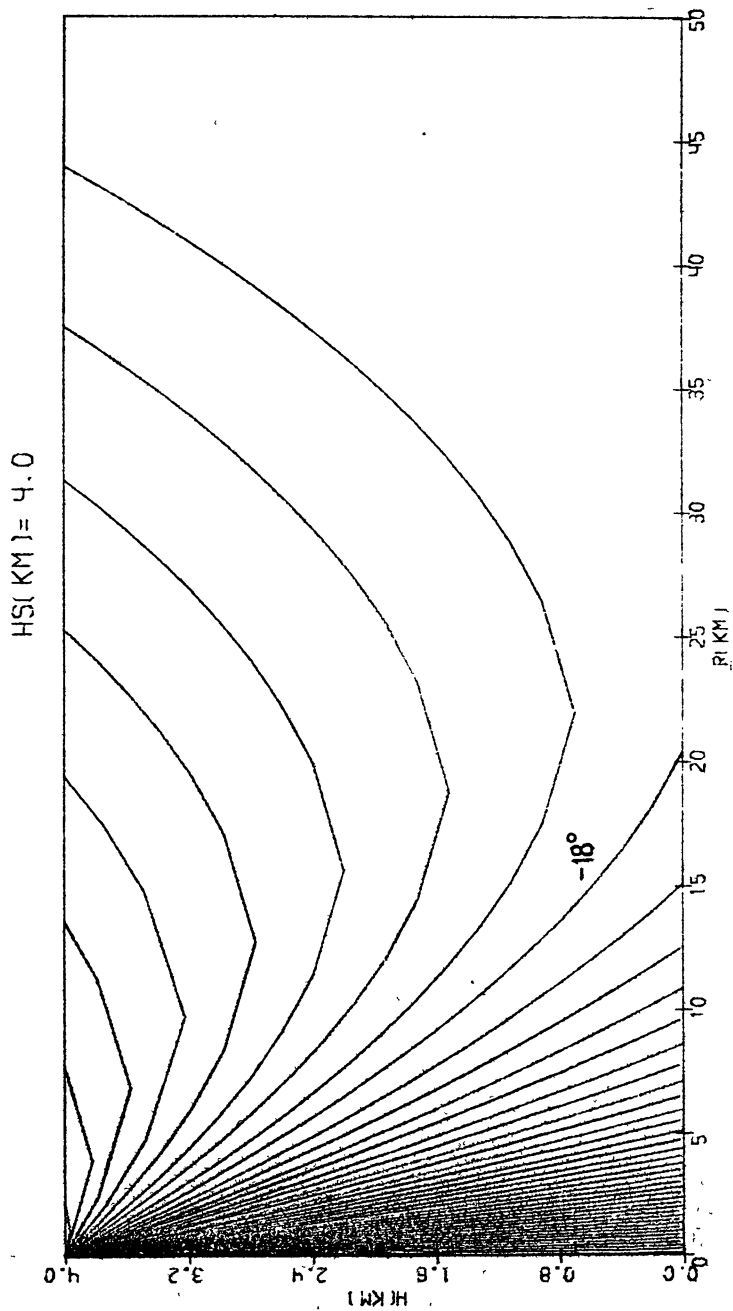
Р и с. 13. Лучи, образующие зону ослеплости под лоточником.
Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.



Р и о.14. Лучи, образующие зону ослеплости под источником.
 Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.



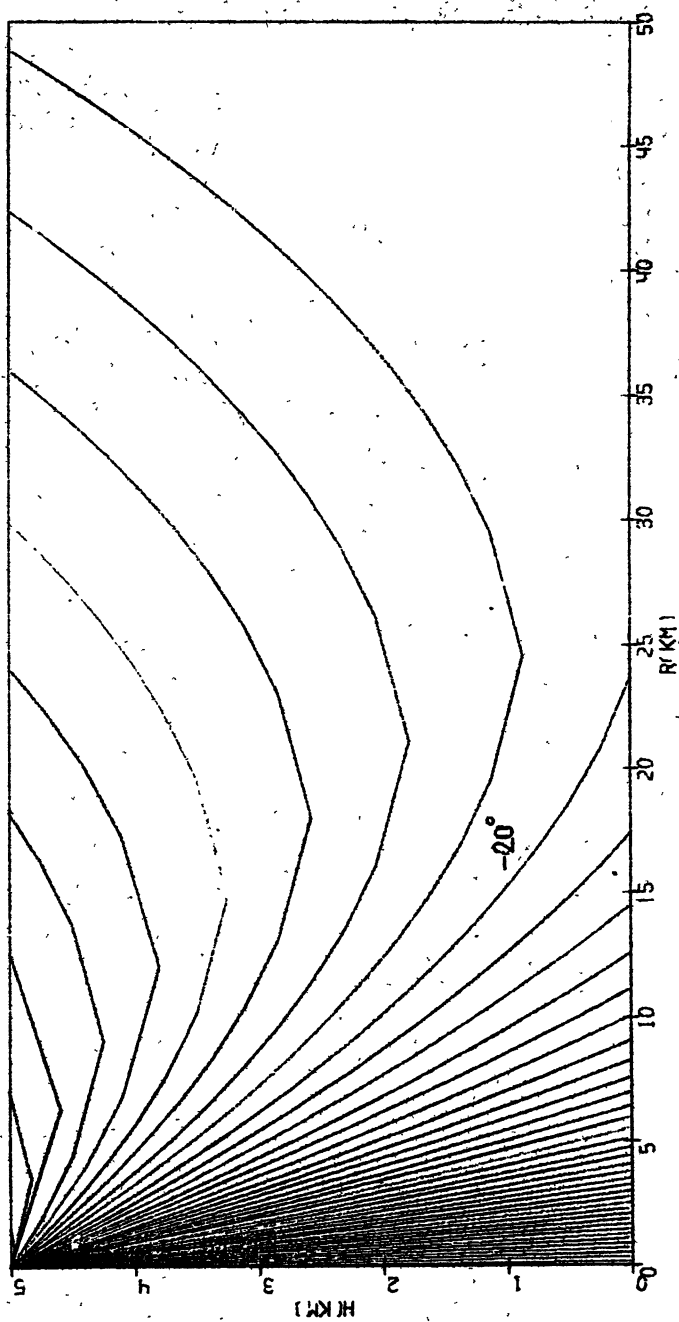
Р и с. 15. Лучи, образующие зону ослеплости под углом -16° .
Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.



Р и о. 16. Лучи, образующие зону слышимости под источником.

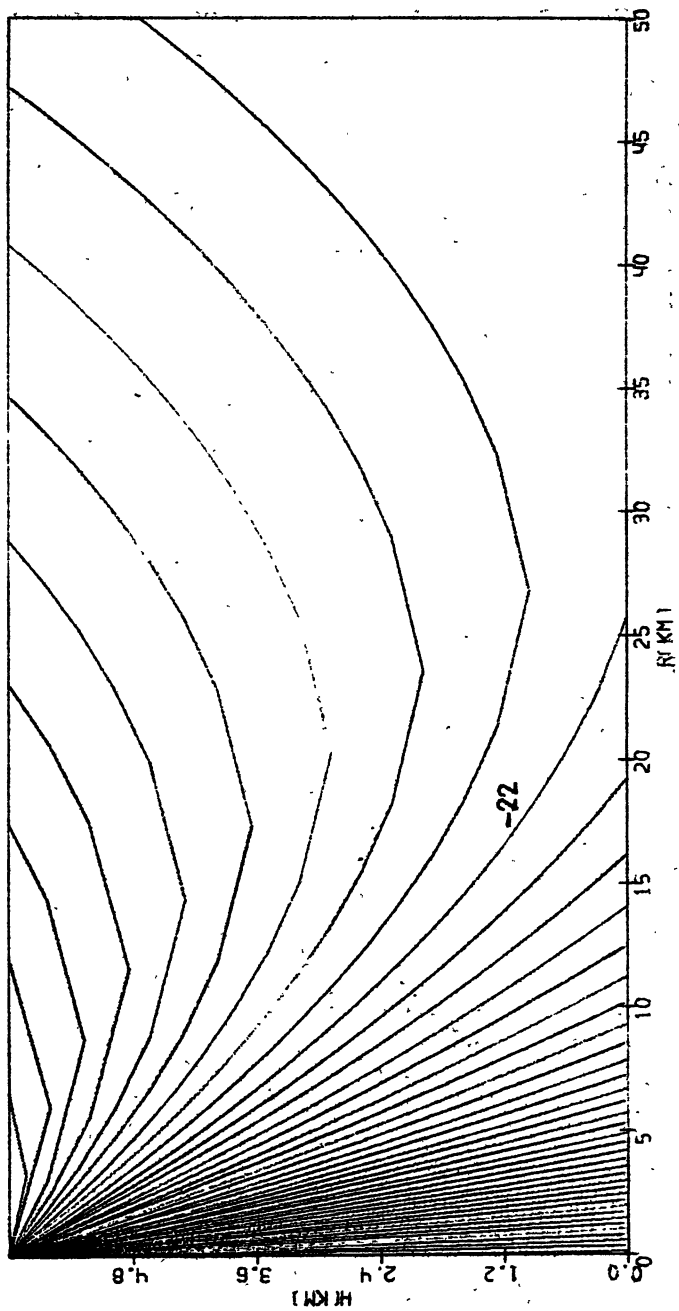
Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.

HS(KM) = 5.0



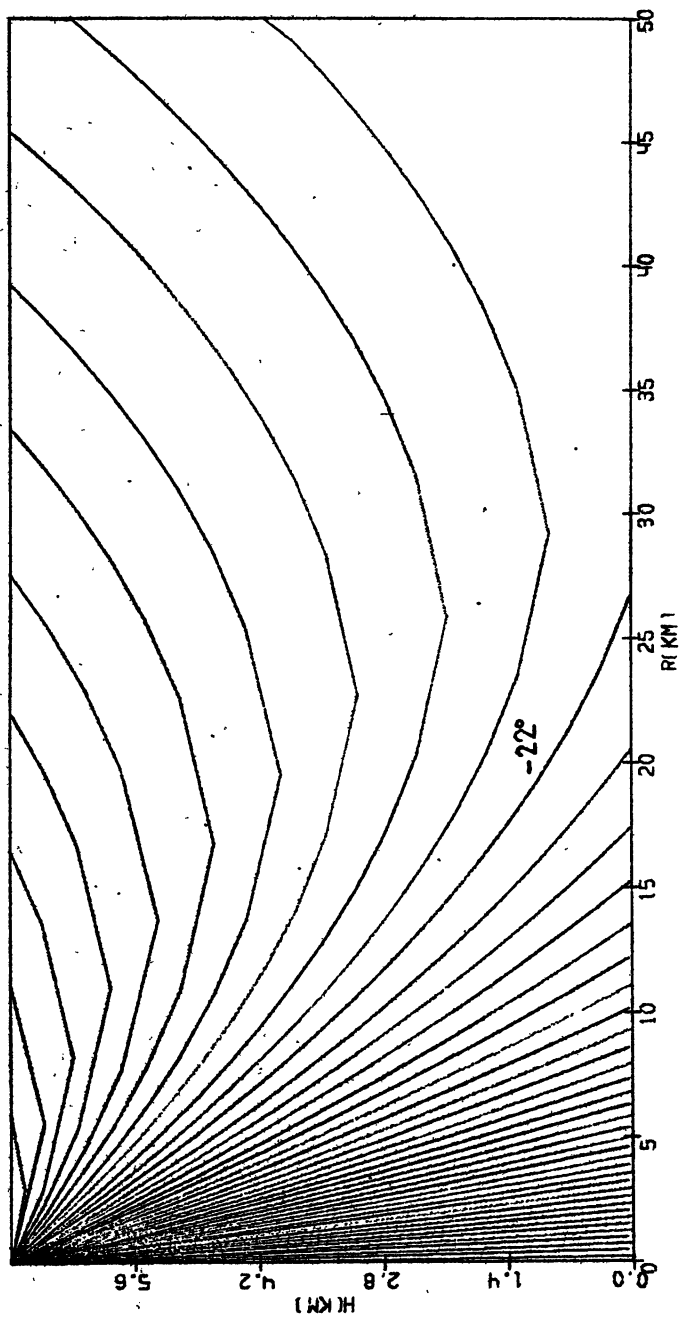
Р и с. 17. Лучи, образующие зону ослеплости под источником.
Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.

$H_S(KM) = 6.0$



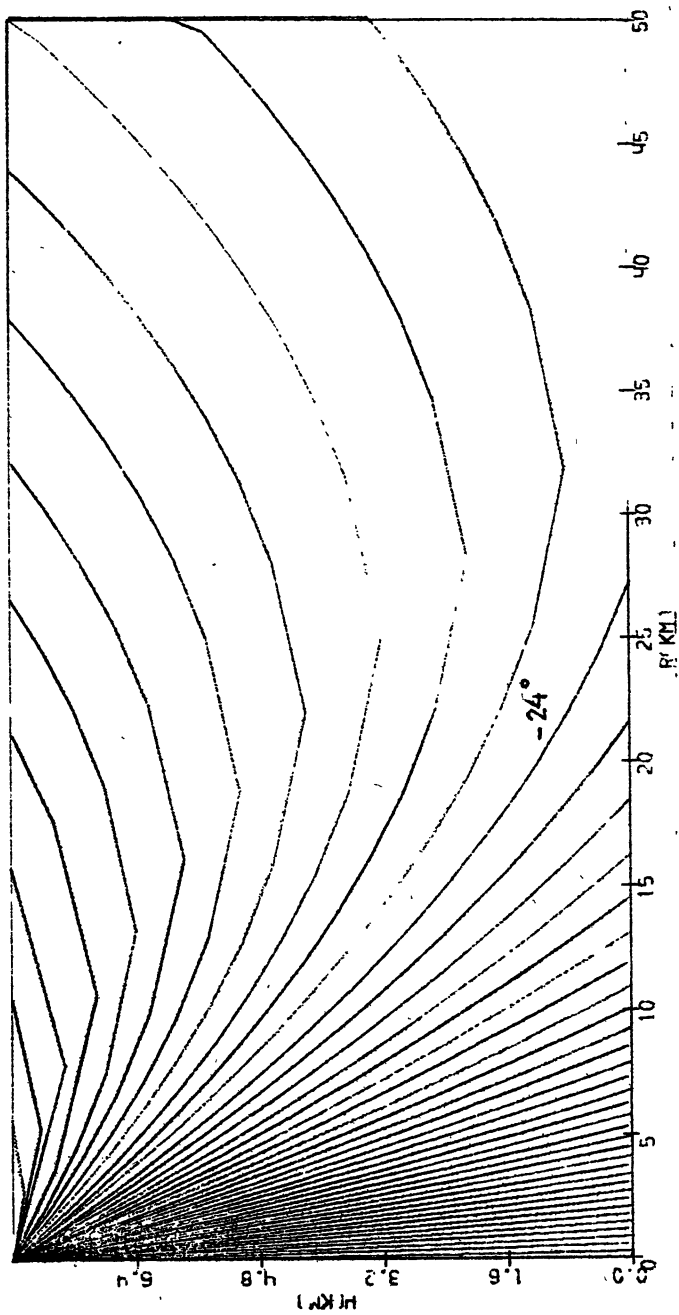
Р и с. 18. Лучи, образующие зону ослеплости под источником.

Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.

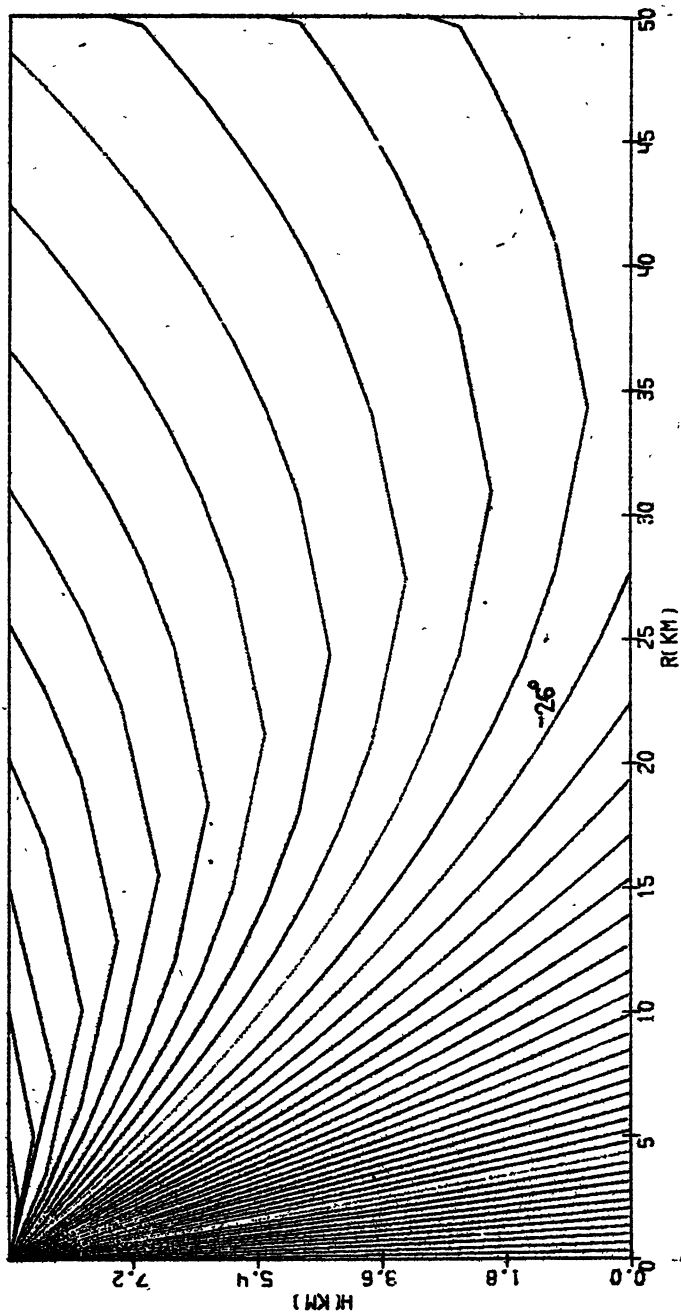
H(KM) = 7.0

Р и с. 19. Лучи, образующие зону слышимости под источником.
Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.

HS(KM) - 8.0



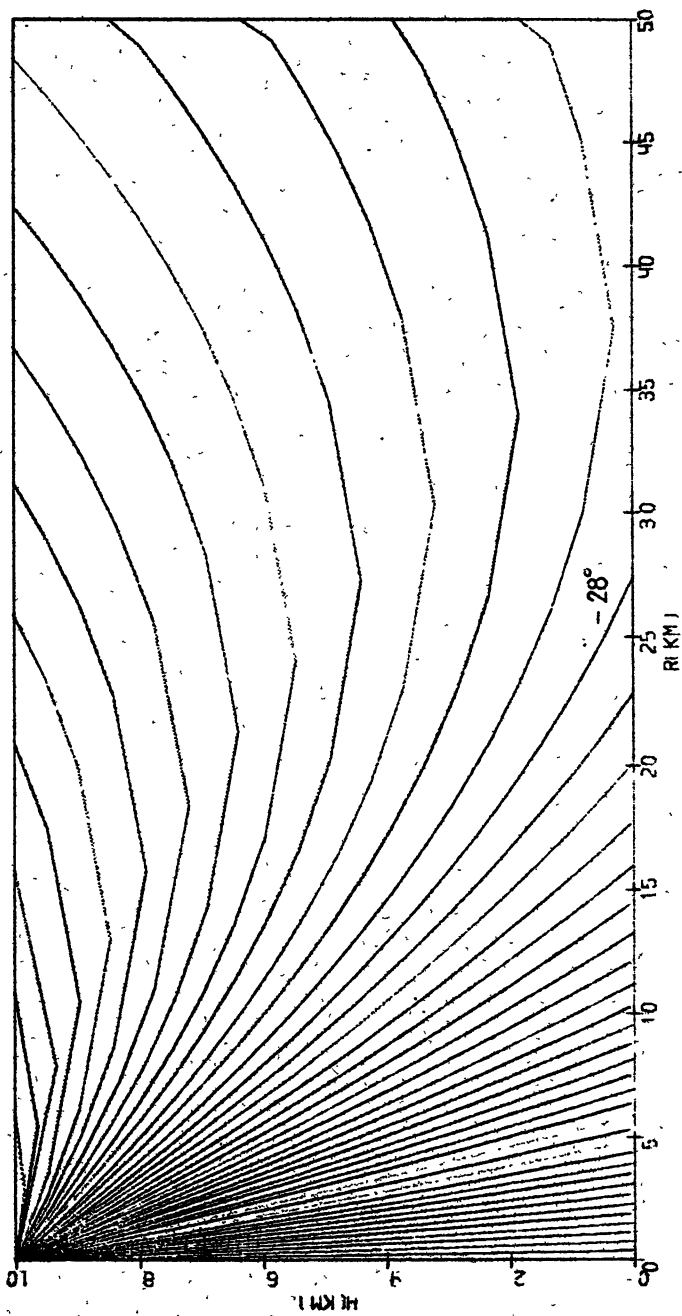
Р и с.20. Лучи, образующие зону слышимости под источником.
Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.

$H_5(KM) = 9.0$


Р и с.21. Дуги, образующие зону слышимости под точником.

Высота H измеряется от одного до десяти километров с шагом 1 км.

$H_S(KM) = 10.0$



Р и с.22. Лучи, образующие зону ослеплости под источником.

Высота H меняется от одного до десяти километров с шагом 1 км.

выходящих под отрицательными углами скольжения и возвращающихся в атмосферу, формируется в верхней атмосфере каустика, разделяющая зону прямых лучей и зону тени. Дальнейшее увеличение высоты до $H = 2$ км (рис. 4) приводит к размыванию этой каустики. Но в целом характер зон акустической засветки и тени остается прежним.

Качественно меняется лучевая картина для источника на высоте $H = 3$ км (рис. 5). На этой высоте скорость звука сравнивается со значением в локальном максимуме в стратосфере (рис. 1), что вызывает появление узкого веера волноводных лучей. Эти лучи формируются при малых значениях угла скольжения; они попадают в зону тени, но не касаются земли. Пучок волноводных лучей и лучи, выходящие под отрицательными углами скольжения и уходящие вверх, в атмосферу, формируют фокальную область^{+) на высоте чуть больше 40 км и горизонтальном расстоянии около 130 км.}

Таким образом, можно выделить два класса акустической засветки стандартной атмосферой. При $H < H_* \sim 3$ км имеет место антиволноводное распространение в стратосфере; при $H \geq H_*$ часть звуковой энергии захватывается стратосферным волноводом.

С ростом высоты положения источника все больше энергии захватывается волноводом (рис. 6, 7). При этом фокальная область становится более выраженной и с ростом H медленно уменьшает свою высоту и горизонтальное расстояние (сравни рис. 6-8). С дальнейшим ростом H фокальная область трансформируется и в этой зоне формируется каустика (см. рис. 9-12). Отметим, что при любой высоте источника H имеется ромбовидная зона акустической тени в стратосфере на расстояниях 200-300 км от источника. Общим для всех результатов численных расчетов является также приземная область тени, простирающаяся до 400 км. Характерные лучи, формирующие каустики, волновод, зону тени, приведены на рис. 126 для источника, находящегося на высоте 10 км.

Кратко проанализируем теперь результаты расчета лучей, падающих от источника на поверхность земли (рис. 13-22). С увеличением высоты H веер лучей, попадающих на поверхность, уменьшается (на каждом рисунке отмечен граничный луч), но область засветки увеличивается. Интересна закономерность увеличения границы области слышимости r_c . Нарастание высоты источника H приводит к насыщению

^{+) Из-за сжатия лучевой трубки здесь особенно резко должны проявиться нелинейные эффекты. Для наземного источника, очевидно, такая ситуация не возникает (ср. /3,4/).}

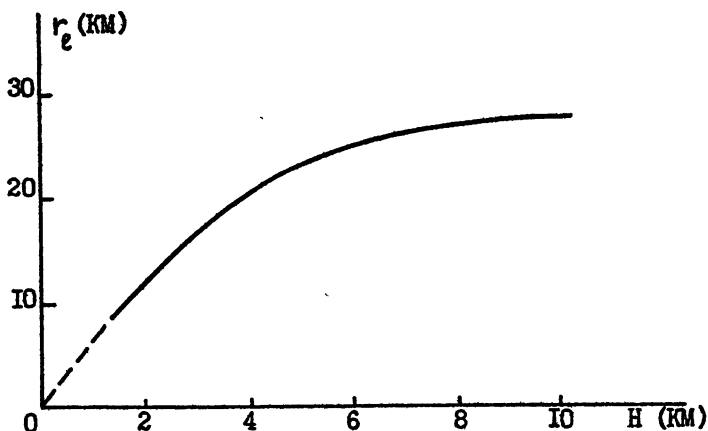


Рис. 23. Зависимость наземной области слышимости от высоты положения источника.

размеров зоны слышимости (рис. 23). Это неожиданное обстоятельство может оказать серьезное влияние на разработку методов зондирования атмосферы с помощью тропосферных источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атмосфера стандартная: Параметры. - М.: Изд-во стандартов, 1981. - 197 с.
2. Cole A.E., Kantor A.J. Air force reference atmospheres. - Air force system command., USA, 1978.
3. Новиков Ю.В., Разин А.В., Фридман В.Е. Уровень нелинейных искажений акустической волны от точечного источника в стандартной атмосфере // Препринт № 243.-Горький: НИРФИ, 1987.-17 с.
4. Новиков Ю.В., Фридман В.Е. Расчет параметров плоской волны конечной амплитуды в стандартной атмосфере // Изв. АН СССР, сер.: Физ.атм. и океана.-1988.-Т.24, № 12.-С.1262-1265.

Дата поступления статьи
24 апреля 1989 г.

Дрий Вячеславович Новиков
Вениамин Ефимович Фрицман

ЛУЧЕВАЯ СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ
В СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Подписано в печать 06.07.89 г. МЦ 05165 . Формат 60x84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1,75 усл.п. л.
Заказ 4883. Тираж 120. Бесплатно.

Отпечатано на ротационте НИРФИ