



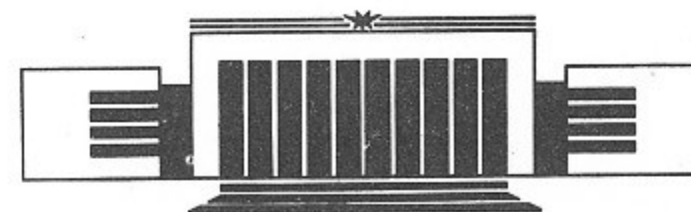
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН

38

П.В. Воробьев, А.Н. Кирпотин, В.А. Бутько,  
М.Е. Ровкин, А.П. Болдырев, Э.Б. Борисов,  
В.А. Изотов, Г.П. Слукин

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОТРАЖЕНИЯ  
ОТ ТУРБУЛЕНТНОЙ ТРОПОСФЕРЫ  
НА ЧАСТОТЕ 150 МГц

ИЯФ 94-59



НОВОСИБИРСК  
1994

## Радиолокационные отражения от турбулентной тропосферы на частоте 150 МГц

*П.В.Воробьев, А.Н.Курпотин*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск,  
Vorobyov@inp.nsk.su, Kurpotin@inp.nsk.su,

*В.А.Бутько, М.Е.Ровкин*

Томский институт автоматизированных систем управления  
и радиоэлектроники, Томск,

*А.П.Болдырев, Э.Б.Борисов*

Сахалинский радиофизический полигон, Южно-Сахалинск,

*В.А.Изотов, Г.П.Слукин*

Московский Государственный технический университет им.

*Н.Э.Баумана*

Излагаются результаты первых экспериментов по горизонтальному и вертикальному зондированию тропосферы на частоте 150 МГц с использованием импульсной когерентной доплеровской РЛС для исследования атмосферы (ST-radar).

## 1. Введение

Исследования атмосферы чрезвычайно интересны и важны как с научной, так и с прикладной точки зрения. Атмосфера необычайно сложный объект, на динамику которого влияет множество глобальных факторов: это и взаимодействие с мировым океаном и влияние солнечных возмущений. Традиционные методы изучения атмосферы с помощью сети метеостанций для измерения параметров приземного слоя и периодическим зондированием с использованием шар-зондов и метеорологических ракет совершенно недостаточны для понимания динамики атмосферы. В последнее время все больший объем информации приносят новые методы исследования такие как лидарное и акустическое зондирование, спутниковые измерения в оптическом, инфракрасном и радиодиапазоне, радиолокационные методы измерения параметров атмосферы. Сегодня радиолокационный метод позволяет измерять все три компоненты скорости ветра на высотах от 1 до 70 км в непрерывном режиме, высотные профили влажности и интенсивности осадков [?, ?].

Чувствительность радиолокатора к атмосферным образованиям определяется отношением их размеров к длине волны излучения. В сантиметровом диапазоне волн источником отражений являются входящие в состав облаков и осадков гидrometeorные частицы. В дециметровом и метровом диапазонах радиолокационные отражения обусловлены рассеянием радиоволн на спектральных компонентах турбулентных флуктуаций показателя преломления, пространственный период которых близок

к половине длины волны излучения.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований энергетических и спектральных характеристик радиолокационных отражений на частоте 150 МГц (длина волны — 2 м) при горизонтальном и вертикальном зондировании нижнего слоя тропосферы.

## 2. Отражение от атмосферы.

Отражение от нижней атмосферы при "чистом небе" обусловлено рассеянием зондирующего ВЧ сигнала на неоднородностях показателя преломления воздуха. В основном показатель преломления воздуха в радиодиапазоне (вплоть до частот порядка 20 ГГц) определяется содержанием водяного пара:

$$n = 1 + 10^{-6} (79 P/T) (1 + 7800 Q/T) \quad (1)$$

где  $P$  — давление,  $T$  — температура в  $^{\circ}K$ , а  $Q$  — относительная влажность воздуха. В турбулентной атмосфере величины  $P$ ,  $T$ ,  $Q$  флуктуируют, что приводит к флуктуациям показателя преломления.

$$n = n_0 + \delta n \quad (2)$$

Произведем разложение поля флуктуаций показателя преломления по плоским волнам. Такое разложение имеет вид:

$$\delta n(\vec{r}) = \int \delta n(\vec{k}) e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} d\vec{k} \quad (3)$$

Мощность рассеянного назад сигнала определяется выражением [?, ?, ?]:

$$P_r = (K^4 P_i / 4\pi^2 r^2) \left| \int \delta n e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} dV \right|^2 \quad (4)$$

где  $P_i$  — излучаемая мощность,  $P_r$  — мощность, рассеянная назад,  $K = 2\pi/\lambda$  — волновое число зондирующего сигнала,  $V$  — облучаемый объем,  $r$  — дальность (предполагается, что  $r^3 \gg V$ ). Очевидно, что основной вклад в  $P_r$  дадут только те гармоники в разложении  $\delta n$ , для которых с достаточной точностью выполняются условия:

$$\vec{k} = 2\vec{K}/n, \quad (n = 1, \infty) \quad (5)$$

причем, точность выполнения этих условий определяется длиной зондирующего импульса ( $L = tc$ ).

$$\Delta k = |\vec{k} - \vec{k}_r| < 1/L. \quad (6)$$

Следует отметить существенное отличие отражения от атмосферных неоднородностей по сравнению с отражением от моря. Неоднородности в атмосфере, на которых происходит рассеяние имеют турбулентную, а не волновую природу. Нет никакого дисперсионного уравнения, которое связывало бы длину волны возмущения и его фазовую скорость. Поэтому положение доплеровского пика в спектре отраженного сигнала определяется скоростью ветра, переносящего возмущения, а его ширина — дисперсией скоростей в соответствующем интервале спектра турбулентности.

При вертикальном зондировании атмосферы отражения могут быть обусловлены резкими скачками показателя преломления, связанными со слоями инверсии.

## 3. Выбор рабочей длины волны РЛС

Как было показано в предыдущем разделе, когерентное брегговское рассеяние назад происходит на эффективной диффракционной решетке, период которой равен половине длины волны зондирующего СВЧ сигнала. Естественно, необходимо, чтобы в спектре атмосферной турбулентности присутствовала соответствующая гармоника. Это накладывает жесткое ограничение на выбор рабочей длины волны РЛС со стороны коротких волн. Дело в том, что существует так называемый внутренний масштаб турбулентности, который определяется скоростью диссипации турбулентной кинетической энергии  $\epsilon$  и кинематической вязкостью  $\nu$  [?]:

$$l_0 = 5\pi \cdot (\nu^3/\epsilon)^{1/4} \quad (7)$$

при меньших масштабах турбулентные возмущения резко затухают и не могут давать когерентного рассеяния назад. Таким образом, длина волны зондирующего сигнала должна превосходить  $l_0$ . На рисунке 1 приведена зависимость внутреннего масштаба турбулентности от высоты для различных скоростей диссипации турбулентной кинетической энергии. Видно, что если мы хотим проводить зондирование до высот 20 и более километров и регистрировать достаточно слабую турбулентность, то длина волны зондирующего СВЧ сигнала должна быть больше 30 см.

С другой стороны известно, что удельная ЭПР турбулентных неоднородностей определяется выражением [?]:

$$\eta = 0.38 C_n^2 \lambda^{-1/3} \quad (8)$$

где  $C_n$  — структурная постоянная показателя преломления,  $\lambda$  — длина волны зондирующего сигнала. Поэтому рабочая длина волны РЛС должна лежать в интервале от 30 см до нескольких метров, причем дециметровый диапазон предпочтительнее, так как там, во первых, выше ЭПР, а, во-вторых, легче реализовать узконаправленную антенну с низким уровнем боковых лепестков и большим коэффициентом усиления.

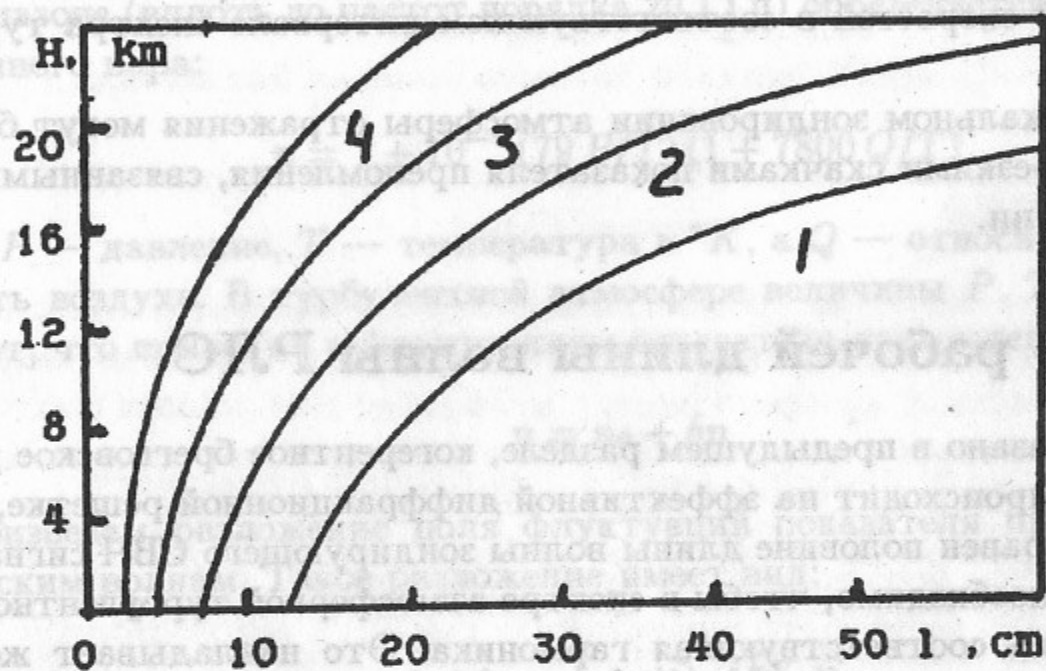


Рис. 1. Зависимость внутреннего масштаба турбулентности от высоты для скорости диссипации турбулентности кинетической энергии  $\varepsilon = 0.1(1), 1(2), 10(3), 100(4)$  ( $\text{см}^2/\text{с}^2$ ).

#### 4. Метод квазикогерентного накопления

Использование когерентной схемы с регистрацией квадратурных составляющих приводит к увеличению отношения сигнал/шум по сравнению с некогерентным накоплением в  $\sqrt{N}$  раз (где  $N$  — число накоплений) и позволяет реализовать доплеровский режим работы радиолокатора.

Здесь мы кратко коснемся метода квазикогерентного накопления сигнала, который позволяет легко реализовать для импульсного некогерентного радиолокатора когерентный доплеровский режим [?, ?].

Суть метода заключается в приведении квадратурных компонент принятого сигнала к квадратурному базису сигнала передатчика. Сигнал передатчика, начальная фаза ВЧ колебаний которого неопределена и меняется от импульса к импульсу (так как он является генератором с самовозбуждением), разлагается на квадратурные составляющие, оцифровывается и запоминается. Сигнал приёмника в нужном строке дальности также разлагается на квадратурные компоненты, оцифровывается и запоминается. Затем с помощью быстродействующего цифрового процессора (например типа *TMS320C30*) производится приведение сигнала приёмника к квадратурному базису передатчика и Фурье-анализ. Процедура перевода квадратурных составляющих принятого сигнала в новую систему координат эквивалентна вычитанию в каждом периоде повторения случайной начальной фазы излученного радиопульса из фазы принятого сигнала. Следует особо отметить, что для такого метода когерентного накопления сигнала в принципе не существует проблемы разрешения неоднозначности по дальности, связанной с помехой от импульса предыдущего периода, отраженного целью большой ЭПР. При сдвиге принимаемой последовательности относительно переданной когерентность полностью теряется. В этом смысле накапливаемый сигнал аналогичен фазоманипулированному сигналу с длиной базы соответствующей количеству накоплений и случайным законом изменения фазы. Таким образом, используемый нами метод когерентного накопления позволяет повысить частоту повторения зондирующих посылок и, таким образом, увеличить потенциал РЛС.

Натурные испытания измерительно-регистрирующего комплекса показали, что среднеквадратическое значение относительных флуктуаций амплитуд преобразованных квадратурных составляющих сигнала с выхода приёмника, обусловленных нестабильностями частот излучаемых радиопульсов и генератора промежуточной частоты, а также собственным шумом устройства формирования квадратурных составляющих, не превышает 2.5%, что соответствует значению среднеквадратичного значения эквивалентного фазового шума не более  $1.5^\circ$ . В этой работе мы использовали РЛС, работающую на длине волны 2 метра. Антенна РЛС — 16-элементная фазированная решетка ( $8 \times 2$ ), с диаграммой направленности  $6^\circ$  по горизонтали и  $30^\circ$  по вертикали. Сканирование осуществляется поворотом антенны вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Мощность передатчика РЛС —  $250 \text{ кВт}$ , длительность импульса  $5 \text{ мкс}$ , частота повторения зондирующих импульсов  $400 \text{ Гц}$ . Усиление антенны  $20 \text{ dB}$ . Чувствительность приёмника  $-145 \text{ dB/W}$ . Когерентное накопление по 4096 импульсам обеспечивает чувствительность приёмника

-180dB/W при спектральном разрешении 0.1Гц. Выбор станции определялся ее доступностью и простотой модернизации, хотя это и не лучший вариант. Сейчас мы готовим ST-радар с параболической полноповоротной антенной диаметром 9м, который будет работать одновременно на двух длинах волн (2м и 0.4м) с возможностью управления поляризацией.

Экспериментальные исследования характеристик радиолокационных отражений при горизонтальном и вертикальном зондировании атмосферы проводились на Сахалинском радиофизическом полигоне с 27 августа по 15 сентября 1993 года.

## 5. Горизонтальное зондирование

При горизонтальном зондировании основное внимание было уделено изучению дистанционных и азимутальных зависимостей энергетических и спектральных характеристик отражений и связанных с ними параметров турбулентности. Первичные экспериментальные данные представляют собой дискретные последовательности (интервал дискретизации равен периоду повторения зондирующих импульсов) значений преобразованных квадратурных составляющих сигнала, принимаемого из одного элемента разрешения по дальности. Каждая такая последовательность содержит 4096 пар квадратурных составляющих и имеет длительность 10сек.

Оценка доплеровского спектра мощности отраженного сигнала получалась путем цифрового спектрального анализа комплексной последовательности, образуемой из последовательности пар квадратурных составляющих. Использовался метод периодограмм Уэлча [?] с разбиением последовательности на 15 сегментов по 512 отсчетов в каждом, взвешенных окном Хэмминга, с перекрытием сегментов, равным 256 отсчетов. При таком разбиении оценка доплеровского спектра мощности отраженного сигнала получалась путем усреднения 15 выборочных спектров, значение спектрального разрешения с учетом действия оконной функции близко к 1 Гц. При более высоком спектральном разрешении наблюдается сильная изрезанность формы спектров с незначительным увеличением максимума спектральной плотности, а при более низком разрешении спектральный пик отраженного сигнала "расплывается" с одновременным уменьшением значения в максимуме.

Количественные оценки характеристик радиолокационных отражений определялись путем вычисления первых трех моментов измеренных

доплеровских спектров. При этом момент нулевого порядка равен средней мощности отраженного сигнала. Момент первого порядка дает значение средней доплеровской частоты  $F$ , связанной с радиальной составляющей средней скорости переноса турбулентных неоднородностей  $V_r$  соотношением

$$F = 2V_r/\lambda \quad (9)$$

Момент второго порядка определяет эффективную ширину доплеровского спектра отраженного сигнала.

Для исследования зависимости характеристик отражений от азимута были проведены сеансы измерений доплеровских спектров сигналов, отраженных с фиксированной дальности при изменении азимутального положения антенны РЛС в пределах от 0° до 360° с шагом 30°. Сеансы проводились 27 августа, 13 и 14 сентября для дальностей соответственно 15.0, 10.5 и 21.5 км. На рис. 2 и 3 приведены доплеровские спектры на азимутах, отличающихся на 90°. Максимальная дальность на которой наблюдался доплеровский сигнал от ветра в этой серии измерений достигала 70 км.

В полученных по доплеровским спектрам оценках характеристик отражений явной зависимости от азимута удельной ЭПР и ширины доплеровского спектра не выявлено. Примеры зависимости от азимута средней доплеровской скорости  $V_r$  приведены на рис. 4,5. В соответствии с методом азимутальной развертки скорости [?] при отсутствии сдвига ветра параметры аппроксимирующей синусоиды содержат в себе информацию о характеристиках трехмерного поля ветра: амплитуда синусоиды равна средней горизонтальной скорости ветра, фаза указывает направление ветра, а сдвиг синусоиды по вертикали пропорционален вертикальной составляющей скорости ветра. Направление и горизонтальная скорость ветра для всех трех сеансов измерений хорошо совпадают со значениями параметров ветра на высотах 1.5 – 3 км, полученным по данным аэрологического зондирования — расхождение в значениях направления ветра не превышает 15°, горизонтальной скорости — не более 15% и определяются точностью аэрологических данных. Значения оценок вертикальной скорости ветра близки к нулю, как и должно быть при горизонтальном зондировании.

При исследовании дистанционной зависимости характеристик отражений проводились циклы измерений доплеровских спектров сигналов, принимаемых с различных удалений от РЛС, для фиксированного значения азимута. Всего было проведено 10 таких циклов в период с 13 по 15

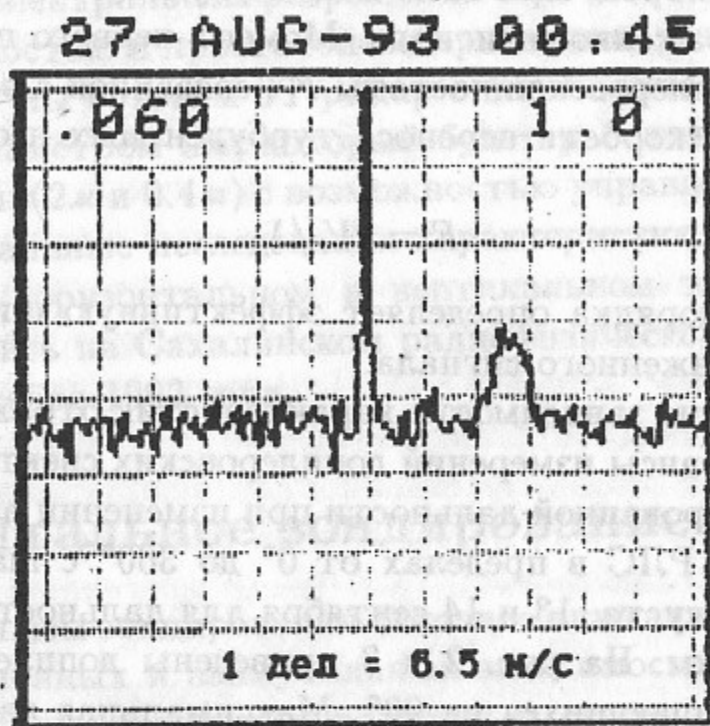


Рис. 2. (азимут 270) (масштаб — 10 дБ/дел).

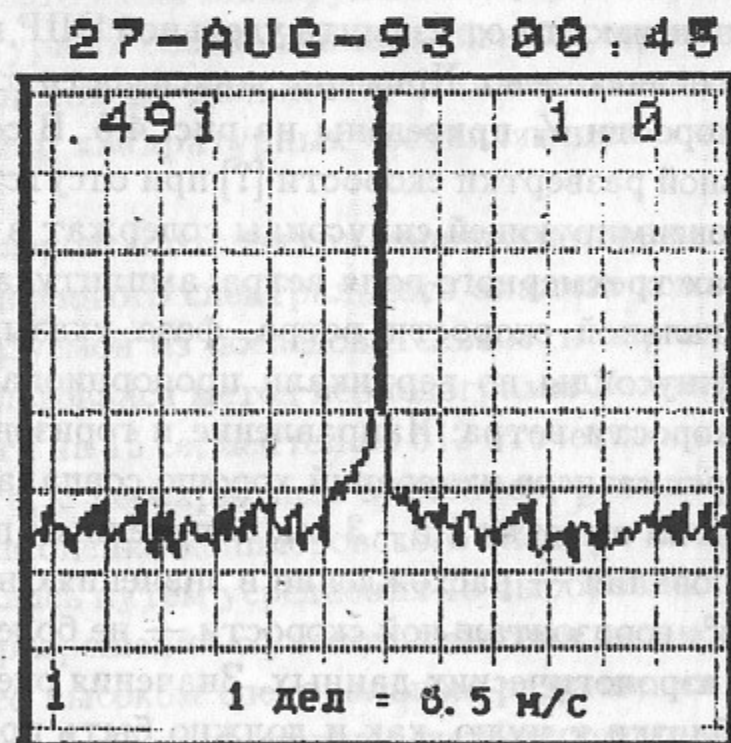


Рис. 3. (азимут 360).

## 6. Вертикальное зондирование

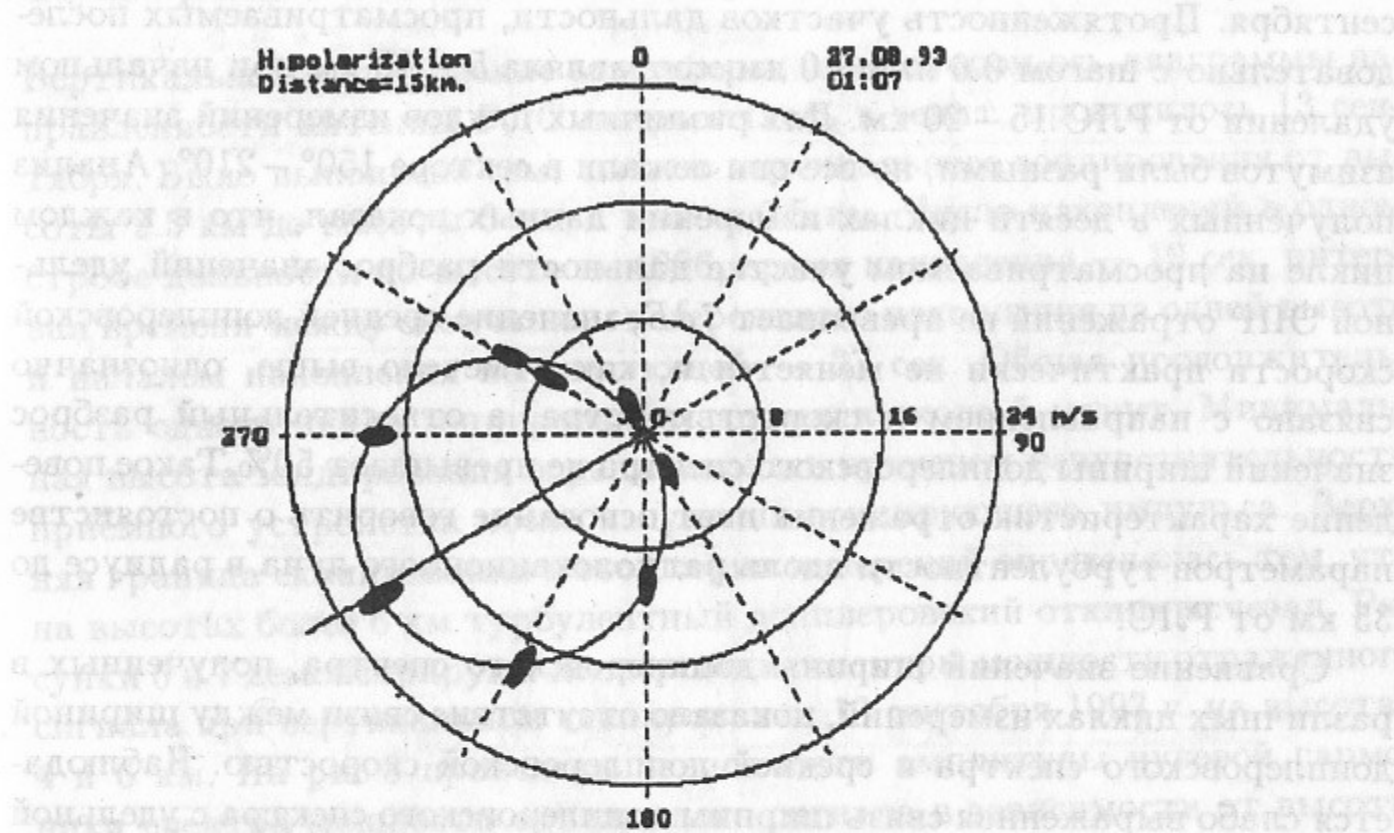


Рис. 4.

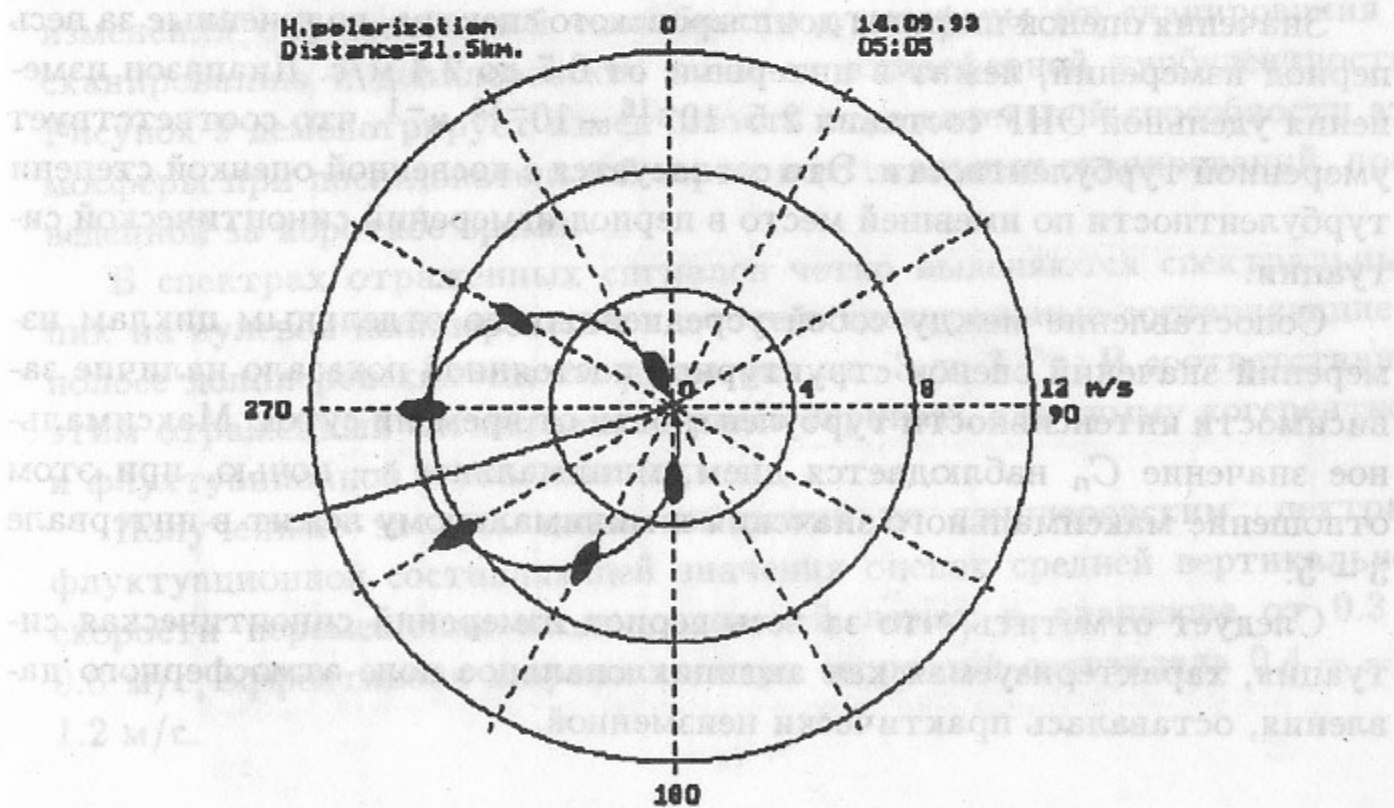


Рис. 5.

сентября. Протяженность участков дальности, просматриваемых последовательно с шагом 0.6 или 1.0 км, составляла 5 – 15 км при начальном удалении от РЛС 15 – 20 км. Для различных циклов измерений значения азимутов были разными, но все они лежали в секторе  $150^\circ - 210^\circ$ . Анализ полученных в десяти циклах измерений данных показал, что в каждом цикле на просматриваемом участке дальности разброс значений удельной ЭПР отражений не превышает  $7\text{ дБ}$ , значение средней доплеровской скорости практически не меняется и, как отмечено выше, однозначно связано с направлением и скоростью ветра, а относительный разброс значений ширины доплеровского спектра не превышает 50%. Такое поведение характеристик отражения дает основание говорить о постоянстве параметров турбулентности вдоль радиолокационного луча в радиусе до 35 км от РЛС.

Сравнение значений ширины доплеровского спектра, полученных в различных циклах измерений, показало отсутствие связи между шириной доплеровского спектра и средней доплеровской скоростью. Наблюдается слабо выраженная связь ширины доплеровского спектра с удельной ЭПР: ширина доплеровского спектра незначительно возрастает с увеличением удельной ЭПР, пропорциональной интенсивности турбулентности.

Значения оценок ширины доплеровского спектра, полученные за весь период измерений, лежат в интервале от 0.7 до 2.4 м/с. Диапазон изменения удельной ЭПР составил  $2.5 \cdot 10^{-16} - 10^{-15} \text{ м}^{-1}$ , что соответствует умеренной турбулентности. Это согласуется с косвенной оценкой степени турбулентности по имевшей место в период измерений синоптической ситуации.

Сопоставление между собой усредненных по отдельным циклам измерений значений оценок структурной постоянной показало наличие зависимости интенсивности турбулентности от времени суток. Максимальное значение  $C_n$  наблюдается днем, минимальное — ночью, при этом отношение максимального значения к минимальному лежит в интервале 3 – 5.

Следует отметить, что за весь период измерений синоптическая ситуация, характеризующаяся как антициклонное поле атмосферного давления, оставалась практически неизменной.

## 6. Вертикальное зондирование

Вертикальное зондирование атмосферы, при котором ось диаграммы направленности антенны РЛС направлялась в зенит, проводилось 13 сентября. Было выполнено семь циклов вертикального зондирования от высоты 2.5 км до высоты 6 км с шагом 0.5 км. Число накоплений в одном строке дальности по высоте — 4096, время накопления — 10 сек, интервал времени между окончанием когерентного накопления на одной высоте и началом накопления на следующей — 27 сек. Общая продолжительность одного цикла зондирования занимала около 5 минут. Минимальная высота зондирования ограничивалась временем нечувствительности приёмного устройства после излучения зондирующего импульса. Верхняя граница сканирования в этой серии измерений определялась тем, что на высотах более 6 км турбулентный доплеровский отклик исчезал. Рисунки 6 и 7 демонстрируют доплеровские спектры мощности отраженного сигнала при вертикальном сканировании 13 сентября 1993 г. на высотах 4 и 6 км. На рис.8 приведены зависимости амплитуды нулевой гармоники спектра мощности отраженного сигнала в зависимости от высоты для сканирований 13 и 17 сентября. Плохая диаграмма направленности антенны не позволяет полностью подавить отражения от местных предметов. Поэтому в нашем случае имеет смысл обсуждать только динамику изменений отражательной способности атмосферы от сканирования к сканированию и доплеровские пики от атмосферной турбулентности. Рисунок 9 демонстрирует изменчивость отражательной способности атмосферы при последовательной серии вертикальных сканирований, проведенной за короткое время.

В спектрах отраженных сигналов четко выделяются спектральный пик на нулевой доплеровской частоте и спектральные составляющие в полосе доплеровских частот примерно от -3 до 3 Гц. В соответствии с этим отраженный сигнал можно рассматривать как сумму когерентной и флуктуационной составляющих.

Полученные за весь цикл измерений по доплеровским спектрам флуктуационной составляющей значения оценок средней вертикальной скорости перемещения неоднородностей лежат в диапазоне от 0.3 – 0.6 м/с, эффективная ширина спектра скоростей составляла 0.4 – – – 1.2 м/с.

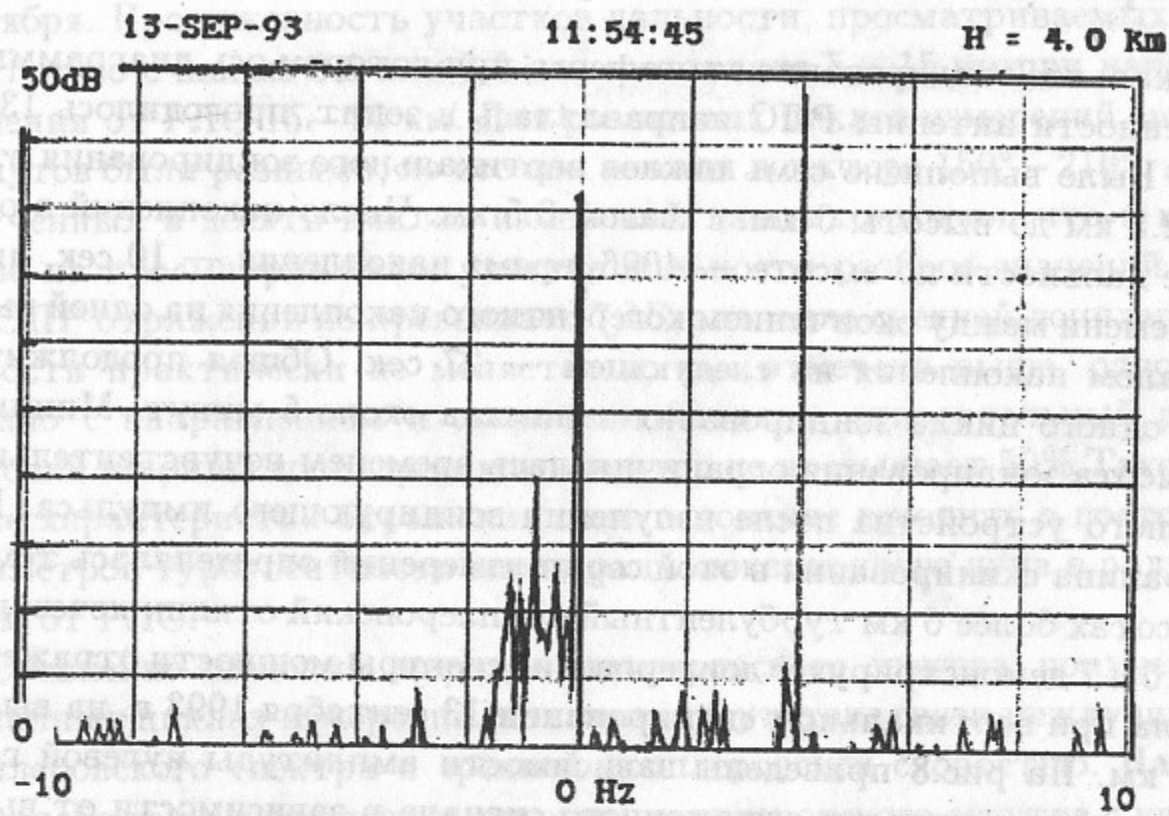


Рис. 6.

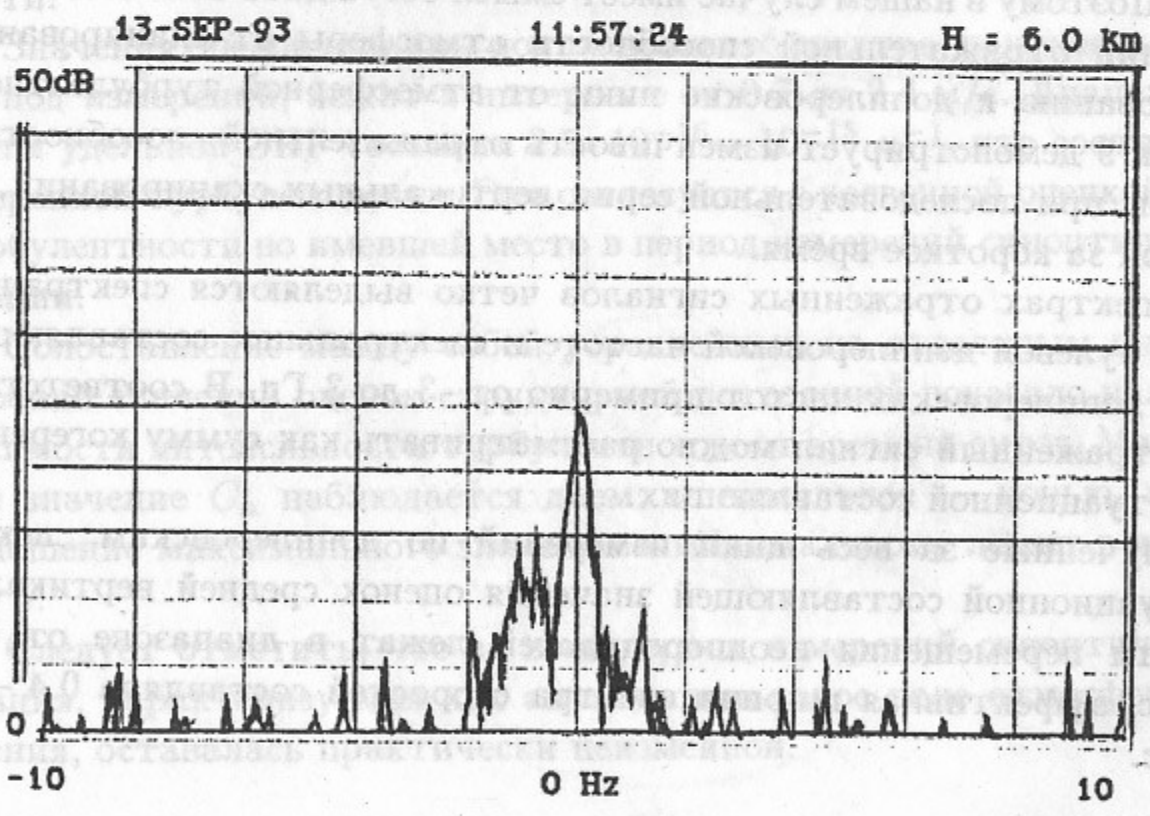


Рис. 7.

Список литературы

7. Заключенно
8. Ветряк
9. Ветряк
10. Ветряк
11. Ветряк
12. Ветряк
13. Ветряк
14. Ветряк
15. Ветряк
16. Ветряк
17. Ветряк
18. Ветряк
19. Ветряк
20. Ветряк
21. Ветряк
22. Ветряк
23. Ветряк
24. Ветряк
25. Ветряк
26. Ветряк
27. Ветряк
28. Ветряк
29. Ветряк
30. Ветряк
31. Ветряк
32. Ветряк
33. Ветряк
34. Ветряк
35. Ветряк
36. Ветряк
37. Ветряк
38. Ветряк
39. Ветряк
40. Ветряк
41. Ветряк
42. Ветряк
43. Ветряк
44. Ветряк
45. Ветряк
46. Ветряк
47. Ветряк
48. Ветряк
49. Ветряк
50. Ветряк
51. Ветряк
52. Ветряк
53. Ветряк
54. Ветряк
55. Ветряк
56. Ветряк
57. Ветряк
58. Ветряк
59. Ветряк
60. Ветряк
61. Ветряк
62. Ветряк
63. Ветряк
64. Ветряк
65. Ветряк
66. Ветряк
67. Ветряк
68. Ветряк
69. Ветряк
70. Ветряк
71. Ветряк
72. Ветряк
73. Ветряк
74. Ветряк
75. Ветряк
76. Ветряк
77. Ветряк
78. Ветряк
79. Ветряк
80. Ветряк
81. Ветряк
82. Ветряк
83. Ветряк
84. Ветряк
85. Ветряк
86. Ветряк
87. Ветряк
88. Ветряк
89. Ветряк
90. Ветряк
91. Ветряк
92. Ветряк
93. Ветряк
94. Ветряк
95. Ветряк
96. Ветряк
97. Ветряк
98. Ветряк
99. Ветряк
100. Ветряк

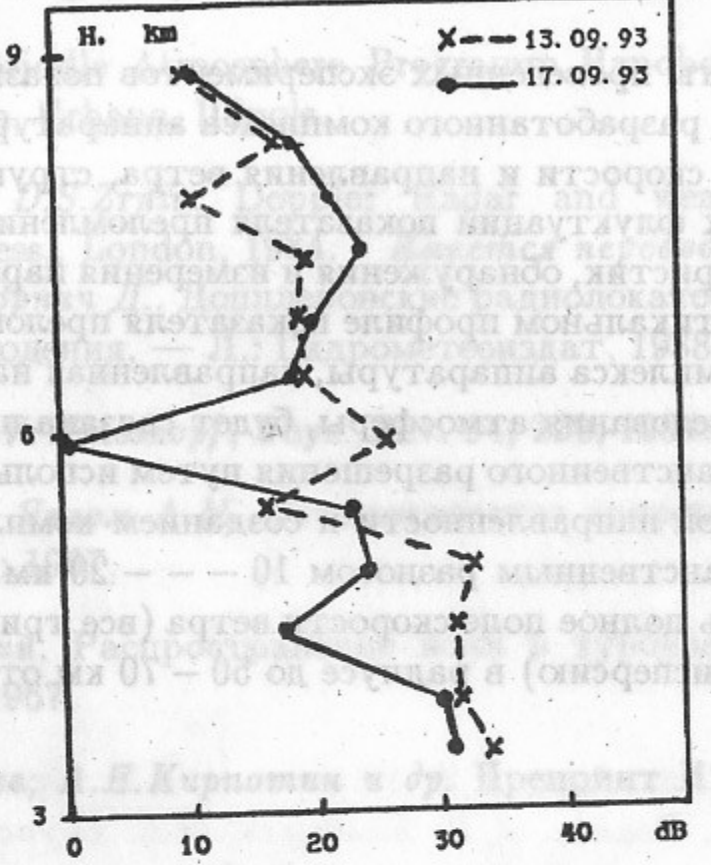


Рис. 8.

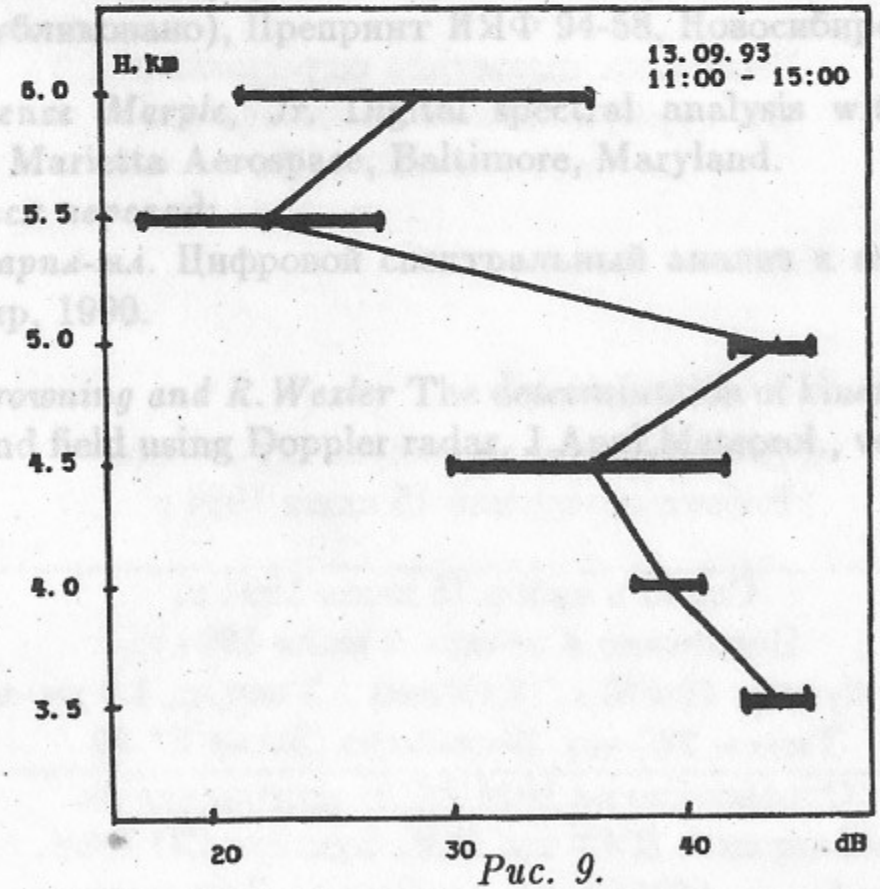
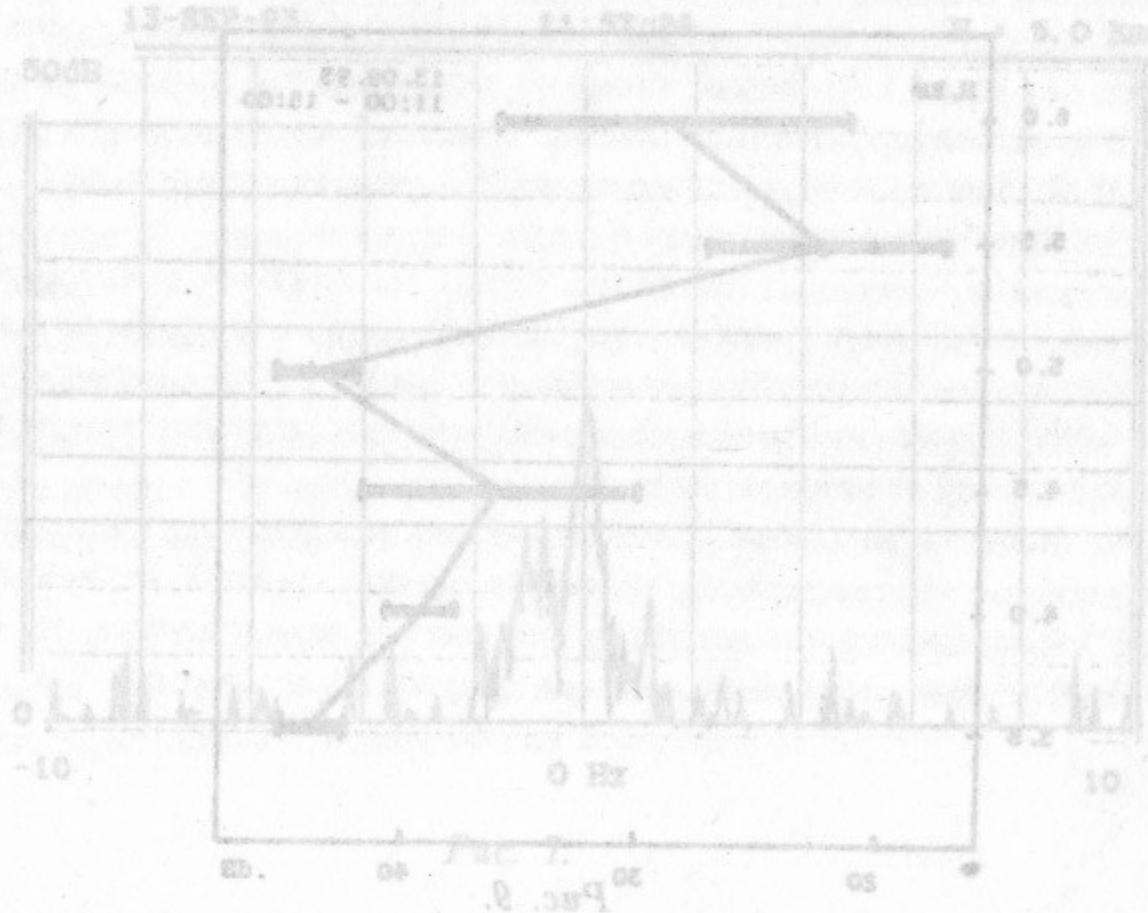


Рис. 9.



## 7. Заключение

В целом результаты проведенных экспериментов показывают практическую пригодность разработанного комплекса аппаратуры для дистанционного измерения скорости и направления ветра, структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления и ее пространственных характеристик, обнаружения и измерения параметров инверсионных слоев в вертикальном профиле показателя преломления. Дальнейшая доработка комплекса аппаратуры, направленная на создание радиолокатора для исследования атмосферы, будет связана прежде всего с повышением пространственного разрешения путем использования антенны с узкой диаграммой направленности и созданием комплекса из двух локаторов с пространственным разнесом 10 — — 20 км. Такой комплекс позволит измерять полное поле скорости ветра (все три компонента вектора скорости и дисперсию) в радиусе до 50 — 70 км от комплекса.



## Список литературы

- [1] *Toru Sato*. Middle Atmosphere Programm Handbook. Vol30, Chap2, Edit. S.Fukao, Urbana, Illinois.
- [2] *R.J.Doviak, D.S.Zrnic*. Doppler Radar and weather observations. Academic press, London, 1984. *Имеется перевод: Довиак Р., Зрнич Д.* Допплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. — Л.: Гидрометеиздат, 1988.
- [3] *F. Villars, F.V.Weisskopf*, Phys. Rev. 94, 232, 1954.
- [4] *Монин А.С. Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Часть 2, "Наука", М.: 1967.
- [5] *В.И.Троицкий*. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.
- [6] *П.В.Воробьев, А.Н.Кирпотин и др.* Препринт ИЯФ 94-57, Новосибирск, 1994.
- [7] *П.В.Воробьев, А.Н.Кирпотин и др.* Макет когерентной РЛС для исследования атмосферы и поверхности моря на частоте 150 МГц (будет опубликовано), Препринт ИЯФ 94-58, Новосибирск, 1994.
- [8] *S.Lawrence Marple, Jr.* Digital spectral analysis with applications. Martin Marietta Aerospace, Baltimore, Maryland. *Имеется перевод: С.Л.Марпл-мл.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М., Мир, 1990.
- [9] *K.A.Browning and R.Wexler* The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. J.Appl.Meteorol., vol.7, pp.105-113, 1968.

## 7. Заключение

## Список литературы

- [1] J. D. G. ...  
[2] ...  
[3] ...  
[4] ...  
[5] ...

- [6] П.В. Воробьев, А.Н. Курпотин, В.А. Бутько,  
М.Е. Ровкин, А.П. Болдырев, Э.Б. Борисов,  
В.А. Изотов, Г.П. Слукин

Радиолокационные отражения

от турбулентной тропосферы  
на частоте 150 МГц

Ответственный за выпуск С.Г. Попов  
Работа поступила 15 июня 1994 г.

---

Сдано в набор 15 июня 1994 г.  
Подписано в печать 8 июля 1994 г.  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.3 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.  
Тираж 220 экз. Бесплатно. Заказ № 59

---

Обработано на ИВМ РС и отпечатано на  
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.