

Научно–исследовательский радиофизический институт  
Министерства общего и профессионального образования  
Российской Федерации

---

П р е п р и н т    N 449

**Исследование динамических процессов  
в тропосфере локационными методами**

В. О. Ралопорт  
Н. А. Митяков  
В. А. Зиничев  
Ю. А. Сазонов

Нижний Новгород 1999

Рапопорт В. О., Митяков Н. А., Зиничев В. А., Сазонов Ю. А.  
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРОПОСФЕРЕ  
ЛОКАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ // *Препринт N 449*. — Ниж-  
ний Новгород: НИРФИ, 1999.-20 с.

УДК 537.874; 534.87

Представлены результаты зондирования атмосферы с использо-  
ванием декаметрового радиоакустического радара и дециметро-  
вого содара. Эксперименты проводились в Зименках в 25 км во-  
сточнее Нижнего Новгорода. Новая техника фазовых измере-  
ний в радиоакустических экспериментах позволила регистриро-  
вать малые (до 3 - 5 см/с) вариации вертикальной компоненты  
скорости ветра. Бистатический содар с узкими лучами антенн  
позволил определить структурный параметр турбулентности для  
скорости ветра на двух масштабах (0.5 м и 30 м). Результаты  
измерений сопоставлены с хорошо известными теоретическими  
моделями.

V. O. Rapoport, N. A. Mityakov, V. A. Zinichev, Yu. A. Sazonov

#### INVESTIGATION OF THE TROPOSPHERE DYNAMICAL PROCESSES BY USING REMOTE SENSING METHODS

The results of sounding of atmosphere by using of dekameter  
radioacoustic facility (RASS) and decimeter sodar are represented.  
The experiments were carried out on Zimenki in 25 km to east from  
Nizhni Novgorod. New technique of phase measurements allowed to  
measure small variations of a vertical component of an air velocity  
(up to 3 - 5 cm/s) at radioacoustic experiments. The bistatic sodar  
with narrow beams antennas allowed to define structural parameter  
of turbulence of wind velocity for two scales (about 0.5 m and 30 m).  
The results of observations are compared with well known theoretical  
models.

## 1. Введение

В настоящей работе представлены исследования динамики тропосферы по экспериментальным данным, полученным авторами на установках радиоакустического и акустического зондирования тропосферы. Эксперименты проводились в Зименках в 25 км к востоку от Нижнего Новгорода. Интервал высот зондирования составлял 0.3 - 4 км - для радиоакустической и 0.2 - 0.8 км - для акустической установок.

При радиоакустическом зондировании была использована разработанная авторами методика фазовых измерений, позволяющая регистрировать малые вариации вертикальной компоненты скорости движения воздушных масс (до 3 - 5 см/с).

Акустическое зондирование проводилось по двухпозиционной (бистатической) схеме с использованием антенн с узкими лучами. В статье приведены результаты локационных измерений рассеянного сигнала при пересекающихся в пространстве лучах антенн. Лучи могли находиться в вертикальной, либо наклонной плоскостях. По проведенным измерениям получены оценки структурного параметра турбулентности  $C_v^2$  на двух масштабах инерционного интервала: на масштабе  $l_1$  порядка длины акустической волны (0.5 м) и на масштабе  $l_2$  порядка 1/2 - 1/3 от линейного размера области пересечения лучей ( $l_2 \sim 30$  м).

## 2. Акустическое зондирование тропосферы.

Бистатический содар создан на базе двух полноповоротных параболических радиоантенн диаметром  $D = 15$  м со сплошным покрытием рабочей поверхности зеркала [1]. Расстояние между приемной и передающей антеннами составляет 425 м. Акустический облучатель передающей антенны состоит из четырех рупорных громкоговорителей 25ГР-Д2, установленных по углам квадрата со стороной 30 см. Диаметр выходного отверстия каждого рупора составляет 28 см. Выходные отверстия рупоров

находятся в фокальной плоскости параболоида. Максимальная суммарная электрическая мощность, подводимая к громкоговорителям, составляет 100 Вт. Рабочий диапазон частот содара 500 – 1000 Гц.

Параметры излучаемого импульсного сигнала:

Частота синусоидального заполнения  $F_a = 636$  Гц (в части сеансов  $F_a = 836$  Гц).

Длительность импульса  $\tau = 1$  с.

Период повторения  $T = 9 - 10$  с.

Мощность в импульсе  $P_a \approx 10$  Вт.

Для приема сигнала использовался измерительный микрофон, установленный в фокусе приемной антенны. Калибровка интенсивности принимаемого сигнала производилась по специальному источнику калибровочного сигнала (пистонфону), в камеру которого помещалась капсула микрофона. В рабочем положении измерительный микрофон защищался от дождя и пыли небольшой конической воронкой, закрытой снаружи тонким слоем синтепона.

Содар мог работать как в импульсном, так и в непрерывном режимах. При ширине диаграммы направленности антенн  $2^\circ - 3^\circ$  линейные размеры области пересечения лучей (при дальности зондирования  $R \sim 800$  м) должны быть около 60 – 100 м. Таким образом, размеры области рассеяния (при длине огибающей акустического импульса больше 100 м) не зависят от длительности импульса. Это позволяет проводить зондирование с достаточно высоким пространственным и частотным разрешением. Следует отметить однако, что при акустическом зондировании атмосферы узкими лучами может возникнуть проблема, связанная как с влиянием ветровой рефракции на пространственное положение лучей, так и с расширением диаграмм направленности антенн из-за значительного рассеяния сигнала под малыми углами.

Работа проводилась в период июль – август 1997 г. Рассеянный акустический сигнал наблюдался в большинстве сеансов до высот 600 – 800 м [2]. Как правило, частота принимаемого

рассеянного сигнала была смещена относительно частоты излучаемого импульса на величину от единиц герц до 20 – 30 Гц в ту или иную сторону в зависимости от направления ветра (доплеровское смещение частоты). Это позволяло отделить рассеянный сигнал от сигналов, обязанных "боковикам" диаграммы направленности антенн и связанных с отражениями от неподвижных наземных объектов (местников). Пример динамического спектра принимаемого акустического сигнала приведен на рис.1 (сеанс от 17.07.97; высота области зондирования  $H = 200$  м). Здесь каждая вертикальная строка представляет спектр (в яркостной записи) в полосе частот 606–666 Гц для отдельной выборки длительностью 1 с, совпадающей с длительностью зондирующего импульса.

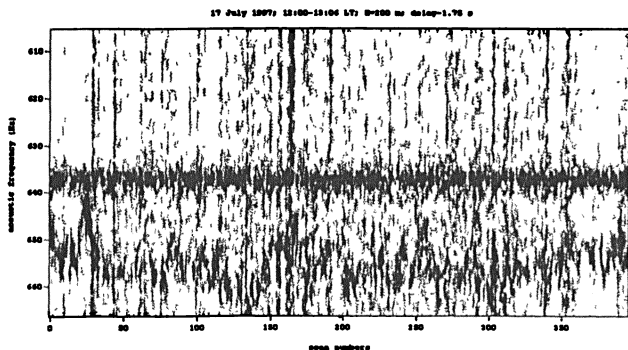


рис. 1

Каждая выборка берется из соответствующего временного отрезка (скана) длительностью в один период  $T$  из непрерывной записи принимаемого сигнала; при этом начало каждого скана отсчитывается от момента прихода прямого импульса, распространяющегося вдоль линии базы. Для построения спектра выборки берутся с определенной временной задержкой относительно начала скана, соответствующей дальности до рассеивающего объема. Аналогичные динамические спектры могут быть построены по выборкам с другими временными задержками в интервале от нуля секунд до максимальной задержки, равной  $T$ .

На динамическом спектре (рис.1) видна ровная линия на ча-

стоте около 636 Гц (частота излучаемого акустического сигнала), которая соответствует эхо - сигналу от местных предметов. Рассеянный сигнал на этом спектре представлен линией, частота которой смещена вниз в сторону высоких частот (доплеровское смещение частоты), причем это смещение в течение сеанса изменяется в широких пределах. Доплеровское смещение частоты  $\Delta\Omega = 2\pi\Delta F_a$  связано со скоростью ветра  $\vec{V}$  известным соотношением:  $\Delta\Omega = \vec{K}\vec{V}$ , где  $\vec{K} = \vec{k}_r - \vec{k}_i$ ;  $\vec{k}_i, \vec{k}_r$  - волновые векторы излученной и рассеянной волн соответственно. Если пренебречь вертикальной компонентой ветра, то по величине доплеровского сдвига частоты и геометрии эксперимента можно определить составляющую скорости ветра в направлении вектора  $\vec{K}_h$ , где  $\vec{K}_h$  - компонента полного вектора  $\vec{K}$  в горизонтальной плоскости. Смещению частоты на 30 Гц соответствует скорость ветра (в направлении на вектор  $K_h$ )  $\sim 10$  м/с.

Как видно из рис.1 ширина спектральной линии рассеянного сигнала в каждом отдельном скане чаще всего не сильно отличалась от ширины линии эхо-сигнала и обычно находилась в интервале 2 – 6 Гц. Однако в ряде случаев ширина линии рассеянного сигнала доходила до 10 – 15 Гц. Это хорошо видно на амплитудных спектрах, построенных для отдельных выборок. На рис.2а, 2б и рис.3а, 3б приведены примеры амплитудных спектров для четырех различных сканов, взятых из двух сеансов от 17.07.97 (спектры на рис.2а, 2б относятся к одному сеансу, высота области зондирования около 380 м; спектры на рис.3а, 3б – к другому сеансу, высота области около 520 м). На каждом из этих рисунков представлены спектры по нескольким последовательным выборкам соответствующего скана, различающимся временной задержкой (шаг временной задержки составляет 0.25 с). При таком представлении хорошо прослеживается эволюция спектров в зависимости от задержки (дальности). Рис.2а, 3а соответствуют узкополосным рассеянными сигналам, а рис.2б, 3б - широкополосным сигналам.

17 July 1997; 11:10 LT; scan N130; H=380 m

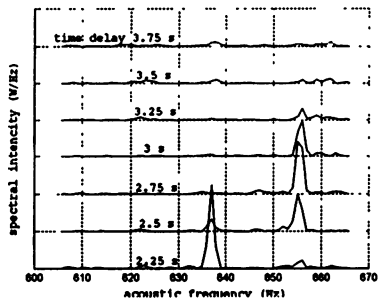


рис. 2а

17 July 1997; 10:50 LT; scan N32; H=380 m

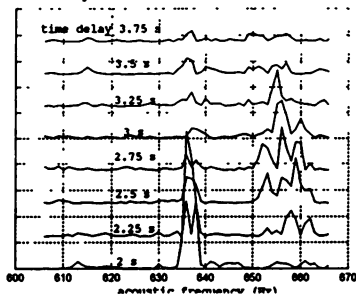


рис. 2б

17 July 1997; 9:55 LT; scan N13; H=520 m

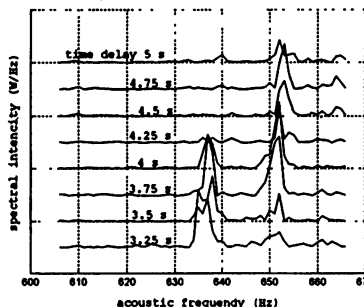


рис. 3а

17 July 1997; 10:07 LT; scan N63; H=520 m

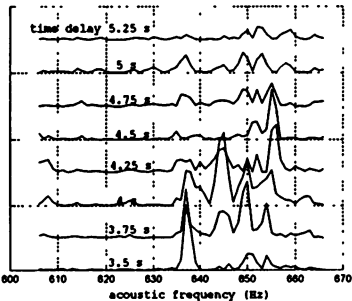


рис. 3б

Усредненные в пределах каждого сеанса данные об интенсивности рассеянного сигнала и о ширине его спектральной линии использовались для оценки параметров турбулентных движений в тропосфере.

Мощность рассеянного сигнала, улавливаемая приемным зер-

калом (мощность, проходящая через телесный угол  $S_r/R_r^2$ ), равна [3]:

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R_t^2} G_t V_r \sigma \frac{S_r}{R_r^2} L \quad (1)$$

где  $P_t$  – излучаемая мощность,  $R_t$ ,  $R_r$  – наклонные дальности от передающей и приемной антенн до объема рассеяния соответственно,  $G_t$  – коэффициент направленного действия передающей антенны,  $V_r$  – объем рассеяния,  $\sigma$  – поперечник рассеяния единицы рассеивающего объема в единицу телесного угла,  $S_r$  – площадь (геометрическая) приемной антенны,  $L$  – коэффициент, учитывающий потери (КПД антенн, поглощение акустического сигнала в атмосфере и т.п.).

Поскольку измерительный микрофон реагирует на интенсивность акустического сигнала в месте своего расположения, то нас будет интересовать интенсивность сигнала в фокальной области параболоида ( $I_r$ ). Принимая для поперечного сечения фокального пятна величину  $\lambda_a^2/4\pi$ , ( $\lambda_a$  – длина акустической волны) находим:

$$I_r = \frac{4\pi P_r}{\lambda_a^2} \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) можно найти поперечник рассеяния  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{4\pi R_t^2 R_r^2 I_r}{P_t G_t G_r V_r L} \quad (3)$$

При получении последнего выражения использовано соотношение  $4\pi S_r/\lambda_a^2 = G_r$ , где  $G_r$  – КНД приемной антенны.

Как известно, при рассеянии на турбулентных неоднородностях показателя преломления поперечник рассеяния  $\sigma$  определяется структурными параметрами  $C_v^2$  и  $C_T^2$  турбулентности и углом рассеяния  $\chi$  [4,5]:

$$\sigma(\chi) = 0.055 \lambda_a^{-1/3} \cos^2 \chi \left( \frac{C_v^2}{c_a^2} \cos^2(\chi/2) + 0.13 \frac{C_T^2}{T_a^2} \right) \sin^{-11/3}(\chi/2) \quad (4)$$



где:  $c_a$  – скорость звука,  $T_a$  – температура воздуха в области рассеяния. Структурный параметр  $C_v^2$  определяется значением структурной функции  $D_v(l) = \overline{[v(x) - v(x+l)]^2}$  на масштабе  $l$ :  $\overline{[v(x) - v(x+l)]^2} = C_v^2 l^{2/3}$ ; параметр  $C_T^2$  определяется аналогичным соотношением.

Предполагая далее, что при рассеянии под углами  $\chi \sim 120^\circ - 150^\circ$  основной вклад в рассеяние акустических волн дают ветровые неоднородности, в выражении для поперечника рассеяния  $\sigma$  можем пренебречь вкладом от второго слагаемого в скобках, пропорционального  $C_T^2$ . В этом случае по найденному поперечнику рассеяния  $\sigma$  из соотношения (4) можем оценить структурную характеристику турбулентности  $C_v^2$  на масштабе  $l_1 \simeq \lambda_a$  в области рассеяния.

С другой стороны, учет доплеровского расширения полосы рассеянного сигнала под действием крупномасштабных вихрей в области рассеяния позволяет оценить структурный параметр турбулентности на масштабах порядка 20 – 30 метров. Усредненная по сеансу полуширина полосы ( $\sqrt{\Delta F_a^2}/2$ ) связана со средним разбросом скоростей ветра в области рассеяния  $\sqrt{\overline{V_t^2}}$  соотношением:

$$\sqrt{\Delta F_a^2}/2 \simeq 2F_a \frac{\sqrt{\overline{V_t^2}}}{c_a} \quad (5)$$

В свою очередь, величину  $\overline{V_t^2}$  можем записать через структурный параметр ветровой турбулентности  $C_v^2$  и масштаб  $l_2$ :

$$\overline{V_t^2} = C_v^2 l_2^{2/3} \quad (6)$$

Из последних соотношений (5) и (6) можем найти структурный параметр  $C_v^2$ , соответствующий масштабу  $l_2$ :

$$C_v^2 \simeq \frac{c_a^2}{(4F_a)^2} \frac{\Delta F_a^2}{l_2^{2/3}} \quad (7)$$

Для количественных оценок величины структурного параметра были обработаны записи, полученные в августе 1997 года (13 сеансов). Продолжительность сеансов составляла от 30 до 80 минут. Однако, после исключения из обработки участков записи, пораженных помехами, временная длительность сеанса уменьшалась на 10 - 20 мин.

Для оценки поперечника рассеяния  $\sigma$  (из соотношения (3)) были приняты следующие допущения:

1. эффективная площадь каждой антенны составляет 50 процентов от геометрической площади (эффективный диаметр параболоида  $D_{eff} = 10.5$  м),

2. при распространении звуковой волны рассеяние под малыми углами на крупномасштабных неоднородностях расширяет луч антенны в 2 раза (при этом усиление антенн  $G_t, G_r$  падает в 4 раза, объем рассеяния  $V_r$  увеличивается в 8 раз),

3. в коэффициенте потерь  $L$  оставляем только множитель  $L_1$ , учитывающий потери, связанные с возможным поглощением акустических волн в атмосфере ( $L_1 \simeq 0.5$ ). Потери, связанные с неполным облучением зеркала антенны, КПД антенн, уменьшением КНД антенн из-за рассеяния и пр. учитываются пунктами 1 и 2. При расчетах  $\sigma$  по соотношению (3) конкретные значения величин  $R_t, R_r, V_r$  учитывают геометрию эксперимента. Результаты расчетов представлены в таблице.

Примечания к таблице:

1. Величина  $I_r$  приведена в децибеллах. В акустике за 0 Дб принимается уровень интенсивности, равный  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Отметим попутно, что минимальный уровень спектральной интенсивности внешних шумов (в полосе 1 Гц) при отсутствии помех от проходящего автотранспорта и прочих помех составлял величину около 14 - 17 Дб.

2. Приведенное в седьмой колонке значение полосы относится к средней за сеанс величине  $\sqrt{\Delta F_a^2}$ .

Таблица

Дата	Время ЛТ	Высота, /уг.рас.	$I_r$ (Дб)	$\sigma$ (1/м)	$C_v^2$ (0.5м)	$\overline{\Delta F}$ (Гц)	$C_v^2(0.5)$ / $C_v^2(30)$
11 авг	15.08	500/140	28.7	5.6e-10	1.2e-2	4.0	0.38
12 авг	17.17	500/140	31.9	1.2e-09	2.4e-2	4.4	0.68
15 авг	16.37	193/125	34.3	2.1e-09	3.2e-2	6.5	0.42
19 авг	12.28	300/125	33.3	1.6e-09	2.5e-2	4.7	0.61
19 авг	14.47	500/140	29.3	6.7e-10	1.4e-2	4.2	0.42
19 авг	17.10	193/125	30.8	9.1e-10	1.4e-2	5.9	0.22
20 авг	12.34	193/125	35.2	2.5e-09	3.8e-2	4.0	1.28
20 авг	15.48	386/145	30.0	8.0e-10	1.9e-2	4.2	0.59
21 авг	16.33	500/140	29.3	6.5e-10	1.3e-2	5.5	0.23
25 авг	12.55	386/145	27.6	4.6e-10	1.1e-2	5.9	0.17
25 авг	15.25	606/149	26.5	3.8e-10	1.1e-2	5.1	0.22
25 авг	18.40	606/149	27.0	3.8e-10	1.0e-2	3.0	0.58
26 авг	14.47	500/140	34.5	2.1e-09	3.9e-2	6.5	0.85

Как видно из таблицы, отношение  $\frac{C_v^2(l=0.5)}{C_v^2(l=30)}$ , приведенное в последней колонке, почти всегда меньше единицы. Возможное объяснение этому будет дано ниже.

### 3. Радиоакустическое зондирование тропосферы.

Радиоакустическое зондирование (РАЗ) атмосферы основано на явлении резонансного (брэгговского) рассеяния радиоволн на периодических неоднородностях атмосферы в области, занимаемой распространяющимся акустическим импульсом [6]. В этом методе доплеровское смещение частоты рассеянного радиосигнала определяется локальной скоростью звука  $c_a$ . При вертикальном зондировании (когда вертикальной проекцией скорости ветра можно пренебречь) скорость звука связана с температурой воздуха  $T_a$  соотношением:

$$c_a \approx 20.05\sqrt{T_a} \quad (8)$$

Измерения доплеровского смещения частоты радиосигнала, связанного со скоростью движения акустического импульса, по-

зволюет таким образом измерить высотный профиль температуры воздуха.

Основные параметры используемой установки РАЗ [7,8]:

Акустический излучатель.

Акустический излучатель установки РАЗ был выполнен в виде 9-ти элементной синфазной квадратной антенной решетки (сторона квадрата  $L \simeq \lambda_a$ ), формирующей вертикальную диаграмму направленности с шириной луча около  $45^\circ$ . Элементом антенной решетки являлся резонатор Гельмгольца, возбуждаемый несколькими (от 4 до 8) электродинамическими головками ГДН - 75, выполненными в виде односторонних поршневых излучателей, или одним мощным двусторонним поршнем электромагнитного типа. Излучаемый акустический сигнал имел длительность импульса 1–1.5 с на фиксированной частоте в интервале 40–45 Гц. Общая излучаемая акустическая мощность в импульсе составляла около 400 Вт. Особенностью акустического возбудителя являлось то обстоятельство, что каждый импульс начинался с одной и той же (нулевой) фазы, что позволило применить фазовые методы измерения вертикальной скорости движения воздушных масс (или вариаций температуры).

Радиолокатор.

Для локации акустического импульса использовался бистатистический доплеровский импульсный радиолокатор с разносом передающей и приемной радиоантенн соответственно на 50 и 60 метров (в направлении север-юг) относительно акустического излучателя. Для выполнения условия синхронизма частота радиолокатора выбиралась в диапазоне 18–20 МГц, импульсная мощность радиопередатчика составляла около 1000 Вт. Передающая и приемная антенны выполнены одинаково в виде 3-дипольных синфазных антенн с длиной диполей (по Надененко) порядка 0.6-0.7 и расстоянием между диполями 0.5 от длины радиоволны. Ширина диаграммы направленности антенн составляла  $36^\circ \times 60^\circ$ . Для увеличения развязки между передающим и приемным трактами радиолокатора использовался импульсный режим работы пере-

датчика и стробирование приемника. Радиопередатчик излучал импульсы длительностью 4–8 мкс с периодом повторения около 20–40 мкс. Стробируемый доплеровский радиоприемник имел узкую (порядка 20 Гц) полосу пропускания.

При вертикальном зондировании температуры атмосферы, когда вертикальная компонента скорости ветра примерно на три порядка меньше скорости звука, ветровой поправкой обычно пренебрегают. На рис.4 приведен пример температурного профиля, полученного нами при обработке экспериментальных записей РАЗ методом максимальной энтропии (процедура Юла- Уолкера) [9]. На приведенном рисунке (частота зондирования  $F_a = 41.8$

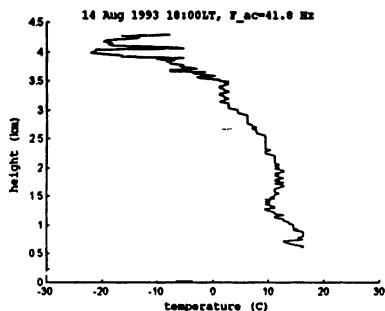


рис. 4

Гц) область высот ниже примерно 1 км не измерялась; для зондирования в области высот 0.3 – 1.5 км применялись частоты 43.5 – 42.5 Гц. На высотах больше 3.5 км в данном сеансе сигнал уменьшался настолько, что резко возрастали ошибки измерений.

С другой стороны, экспериментальное исследование относительно быстрых ( $\sim 10$ мин) вариаций  $v_z$  представляет большой интерес, так как именно этот параметр является одним из наиболее информативных при исследовании процессов конвекции и распространения ВГВ в тропосфере. Необходимую для измерения вариаций  $v_z$  точность может обеспечить найденный нами

фазовый метод РАЗ, суть которого сводится к следующему [10]:

Если начальная фаза излучаемого акустического сигнала синхронизована с началом импульса (что и было реализовано в нашем радиоакустическом комплексе), то для фиксированной акустической частоты зондирования изменение от скана к скану фазы регистрируемого сигнала для определенной высоты  $H$  (т.е. для определенного момента времени от начала зондирующего импульса) будет определяться только изменением температуры и (или)  $v_z$  в интервале высот  $0 - H$  за время между сканами.

Для удобства использования фазового метода выходной сигнал доплеровского приемника (доплеровский сигнал) дополнительно гетеродинировался на частоты  $2 - 7$  Гц; при этом для сохранения начальной фазы преобразованного сигнала напряжение гетеродина также было синхронизовано с началом развертки, длительность которой определялась периодом повторения акустических импульсов. Для последующего просмотра и обработки использовалась яркостная запись преобразованного сигнала на плоскости высота – время. При высокой контрастности и достаточно хорошем отношении сигнал/шум на записи будут наблюдаться почти горизонтальные полосы ("зевровая" структура), ориентированные вдоль оси времени. Пример такой записи представлен на рис.5а и рис.5б.

Интервал между двумя соседними черными полосами на записи (рис.5) соответствует изменению фазы гетеродинированного сигнала на  $2\pi$ . Скорость изменения фазы по высоте определяется волновым числом  $\frac{2\pi}{\lambda}$  для этого сигнала и, так же как исходный доплеровский сигнал, характеризует зависимость температуры и продольной компоненты ветра от высоты. Изменения фазы сигнала (для заданной высоты  $H$ ) вдоль оси времени характеризуют временные вариации этих параметров. Характер записи различается для дневных и ночных сеансов. В дневном сеансе (рис.5а) морфологически можно выделить три типа "зевровых" структур:

10 May 1996

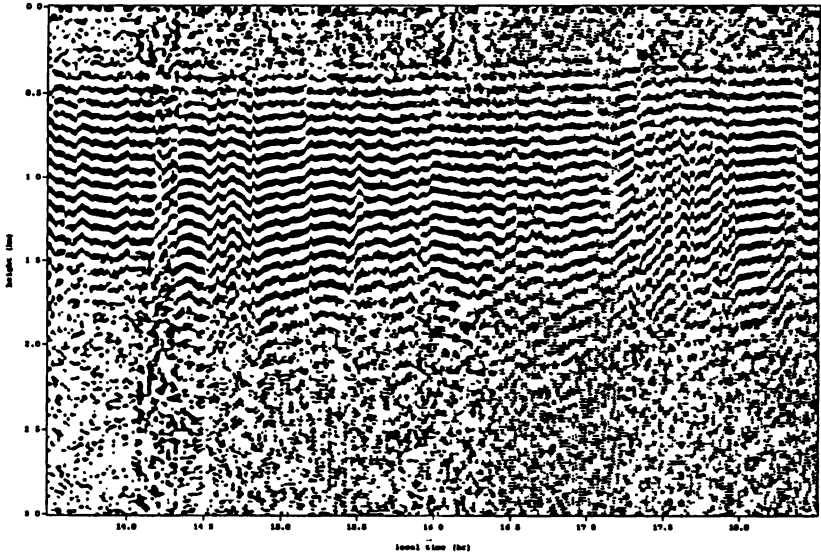


рис. 5а

20 July 1996

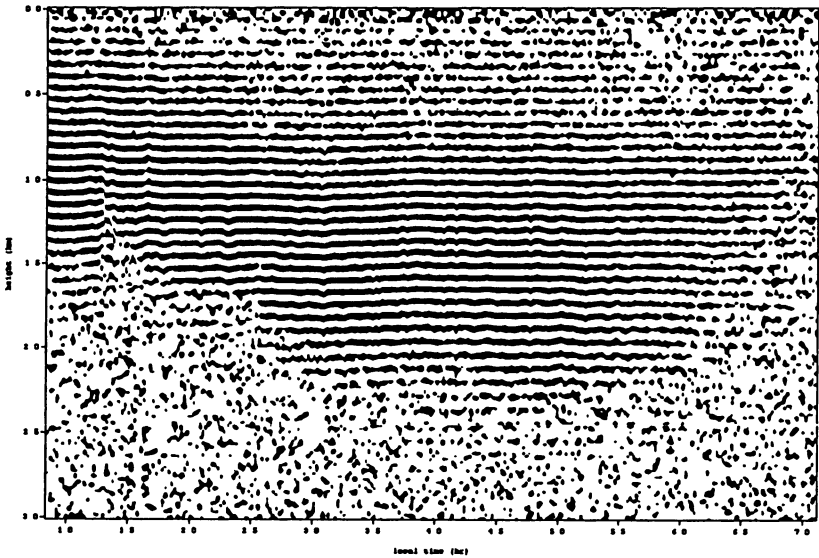


рис. 5б

– Медленные (за 30 – 60 минут) изменения фазы на  $2\pi$  (например, интервал 15.00 – 15.40 ЛТ). На таких участках изменения фазы (наклон "зубровой" структуры) могут плавно меняться с высотой. Это соответствует изменению скорости звука (например, в результате изменения вертикальной составляющей скорости ветра) на величину порядка 10 м/с за время 30–60 минут или порядка 3–5 см/с за время между соседними акустическими посылками.

– Быстрые изменения фазы на величину  $\leq \pi$  (например, интервал высот 0.7 – 1.2 км около 15.35 ЛТ). Обращает на себя внимание, что ниже 0.7 км и выше 1.2 км "разрывы" фазы в это время отсутствуют.

– Быстрые, квазихаотические изменения фазы (например, 18.00 – 18.40 ЛТ). Такие изменения фазы как бы накапливаются с высотой и в конце концов приводят к пропаданию сигнала РАЗ.

Изменения фазы сигнала в ночном сеансе (рис.5б), как правило, носят значительно более плавный характер. Это свидетельствует об отсутствии заметных движений в атмосфере. Тем не менее, в интервале 01.20 – 01.45 ЛТ наблюдались резкие изменения фазы, увеличивающиеся с высотой. На высотах больше 1.8 км "зубровая" структура пропадала до 02.30 ЛТ.

#### 4. Дискуссия.

##### Турбулентность

Результаты экспериментов по акустическому зондированию позволяют оценить поперечник рассеяния  $\sigma$  и структурную характеристику турбулентности  $C_v^2$  по рассеянию на мелкомасштабных (порядка длины волны зондирующего акустического сигнала) неоднородностях показателя преломления и турбулентную скорость  $V_t$  на масштабе порядка 30 м в разных условиях и для разных высот зондирования.

Как видно из таблицы, приведенной в разделе 2, отношение  $\frac{C_v^2(l=0.5\text{м})}{C_v^2(l=30\text{м})}$ , (см. последнюю колонку), почти всегда меньше (для некоторых сеансов - существенно меньше) единицы. Однако, если рассматриваемые интервалы  $l$  ( $l_1 = 0.5$  м и  $l_2 = 30$  м) принадле-



жат внутреннему интервалу Колмогоровской турбулентности, то величина структурного параметра  $C_v^2$  должна оставаться постоянной на этих масштабах. Одно из возможных объяснений полученного результата может состоять в том, что в действительности не вся область пересечения лучей одинаково рассеивает падающий на нее сигнал. Рассеянный сигнал идет от отдельных рассеивающих вихрей, суммарный объем которых может быть существенно меньше объема пересечения лучей антенн. Здесь, к сожалению, может так же сказываться и неполное пересечение лучей из-за неучтенной ветровой рефракции акустического сигнала. В обоих случаях это приводит к уменьшению реального объема рассеяния  $V_r$  и, как следствие, - к увеличению значений параметров  $\sigma$  и  $C_v^2(0.5)$  и сближению значений  $C_v^2(0.5)$  и  $C_v^2(30)$ .

Тем не менее, проведенное сопоставление значений структурного параметра ветровой турбулентности  $C_v^2$  на масштабах 0.5 м и 30 м дает, на наш взгляд, некоторую дополнительную возможность для оценки условий применимости теории развитой турбулентности в области высот порядка нескольких сотен метров.

### **Конвекция и ВГВ.**

В тропосфере можно выделить несколько слоев, играющих большую роль в процессах переноса энергии [11–14]: слой перемешивания (высота до 0.5 – 1 км), слой условной неустойчивости (где образуются облака), занимающий интервал высот 1 – 2 км и стабильный слой (выше 2 км), где происходит диссипация облаков.

В слое перемешивания градиент потенциальной температуры близок к нулю. В этом слое наблюдается высокой уровень турбулентности.

Несколько другая ситуация имеет место в слое условной неустойчивости, где потенциальная температура слабо растет с высотой и основную роль играют процессы конвекции и внутренние гравитационные волны (ВГВ). Здесь частота Бранта-Вяйселя близка к 0, и процессы конвекции, генерации и распространения ВГВ тесно взаимосвязаны.

В стабильной области потенциальная температура резко па-

дает с высотой, и основные механизмы переноса энергии могут быть связаны с распространением ВГВ, которые генерируются в более низких слоях.

Такая модель обычно используется при численном моделировании тропосферных процессов. В этом разделе предпринята попытка провести сопоставление результатов эксперимента с моделями.

По результатам радиоакустических измерений в дневное время в области высот 0.5 – 1.5 км наблюдаются быстрые (порядка 5 минут) изменения фазы сигнала РАЗ на величину порядка  $\pi$ , которые повторяются с интервалом 20 – 40 минут (см. рис. 5а). Эти вариации фазы можно интерпретировать как движение в горизонтальном направлении областей с достаточно быстрыми подъемами вертикальной скорости на величину порядка 1 м/с. Если принять величину горизонтального ветра равной 3 – 5 м/с, то наблюдаемые интервалы 20 – 40 минут соответствуют пространственному квазипериоду 3 – 5 км. Данные эксперимента достаточно хорошо согласуются с результатами численного счета процессов развития конвективной неустойчивости и ВГВ, приведенными в работе [15].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты N 95-02-04768, N 96-02-18632 и N 96-02-18634).

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.О.Ралопорт, Н.А.Митяков, В.А.Зиничев, Ю.А.Сазонов. Бистатический содар на базе полноповоротных 15-метровых радиотелескопов. //Изв.ВУЗов. Радиофизика, 1997, т.40, N10, с.1302-1304.  
V.O.Rapoport, N.A.Mityakov, V.A.Zinichev, Yu.A.Sazonov. Bistatic sodar based on 15-meter overall revue radiotelescopes. - Radiophysics and quantum electronics 40, N10, 1997, 877 - 878.
2. В.О.Ралопорт, Н.А.Митяков, В.А.Зиничев, Н.И.Белова, Ю.А.Сазонов. Исследование ветровых характеристик на

- высотах 200 – 800 м с помощью дециметрового содара. //Изв.ВУЗов. Радиофизика, 1999, т.41, N7, с.841-848.
3. Н.П.Красненко. Акустическое зондирование атмосферы. – Новосибирск: Наука (СО), 1986.
  4. В.И.Татарский. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967.
  5. C.G.Little. Acoustic methods for the remote probing of the lower atmosphere. //Proc IEEE, 57, N4, 1969, 571-578.
  6. М.А.Каллистратова, А.И.Кон. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М.: Наука, 1985.
  7. A.L.Fabrikant, V.Yu. Trakhtengerts, Yu.G.Fedoseev, V.O.Rapoport, V.A.Zinichev. Radio-acoustic sounding of the troposphere using short radio waves. //Int. J. Remote Sensing, 15, 347-360, 1994.
  8. V.O.Rapoport, Yu.G.Fedoseev, N.I.Belova, Yu.A.Sazonov, V.A.Zinichev. Operating decameter RASS near Nishny Novgorod and perspectives for far radio-acoustic sounding using the Sura HF-radar. //J. Atm. and Terr. Phys, 58, N8/9, 1033-1037, 1996.
  9. S.L.Marple. Digital spectral analysis with applications. – Prentice - Hall, 1987, Chapter 7.
  10. В.О.Рапопорт, Н.А.Митяков, В.А.Зиничев, Н.И.Белова, Ю.А.Сазонов. Исследование малых вариаций параметров тропосферы методом радиоакустического зондирования. //Изв.ВУЗов. Радиофизика, 1997, т.40, N11, 1355-1364, 1997
  11. Ph.Veyre, G.Sommeria, Y.Fouquart. Attempt to directly simulate cloud-radiation interaction in the case of small cumuli. Cloud dynamics — Proceedings of a Symposium held at the third general assembly of IAMAP, Hamburg, West Germany, 17-28 August, 1981, 135-148.
  12. J.W.Deardorff. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimentional model boundary-layer. Meteorol., 1980, v.18, pp. 495-527.

13. G.Sommeria.// J.Atmos. Sci., 1976, v.33, pp. 216-241
14. G.Sommeria, Le Mone M.A. //J. Atmos. Sci, 1978, v.35, pp. 25-39.
15. T.Asai. On the preferred mode of cumulus convection in a conditionally unstable atmosphere. Cloud dynamics – Proceedings of a Symposium held at the third general assembly of IAMAP, Hamburg, West Germany, 17-28 August, 1981, 149-162.