

Министерство образования Российской Федерации
Нижегородский научно-исследовательский радиопизический институт

Препринт № 469

*В.О. Рапопорт, В.А. Зиничев, Н.А. Митяков,
Ю.А. Сазонов, Ф.И. Выборнов, Н. А. Рыжов*

**Акустическое зондирование атмосферы
с использованием многолучевого содара**

Нижний Новгород – 2001

**В.О. Рапопорт, В.А. Зиничев, Н.А. Митяков, Ю.А.Сазонов,
Ф.И.Выборнов, Н.А.Рыжов.**

Препринт № 469 – Нижний Новгород: НИРФИ, 2001, 25 с.

**Акустическое зондирование атмосферы с использованием
многолучевого содара**

УДК 537.874; 534.87

Представлены результаты акустического зондирования атмосферы летом 2001 года. Эксперименты проводились на частоте 576 Гц с использованием многолучевого бистатического содара. Установка включала в себя две параболические антенны диаметром по 15 метров. Расстояние между антеннами составляет 425 м. Один из параболоидов используется в качестве передающей акустической антенны, луч которой имеет ширину 8 градусов и ориентирован в зенит. Второй параболоид представляет собой четырехлучевую приемную антенну, лучи которой имеют ширину 2,6 градуса каждый и пересекают луч передающей антенны на высоте около 500 м. Длительность акустического импульса составляла 2 с, период повторения — 8 с. Такая установка позволила определить пространственно – временные характеристики атмосферной турбулентности в соседних объемах с временным разрешением 1–2 с и пространственным разрешением около 30 м.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 00-02-17372 а, № 01-02-17428 а, № 01-02-81009 к).

1. Введение

Эксперименты по исследованию атмосферной турбулентности на высотах 300 – 800 м проводились нами с 1997 г. В первых экспериментах использовалась схема бистатического содара на базе двух полноповоротных 15-метровых параболических антенн, разнесенных на расстояние 425 м [1–3]. При использовании бистатического содара локальный объем рассеяния формируется пересечением лучей приемной и передающей антенны. Узкие (порядка $2 - 3^\circ$) диаграммы направленности антенн позволили обеспечить пространственное разрешение локатора порядка 30 – 50 м, что существенно меньше длины акустического импульса $\frac{c\tau}{2}$. При

длительности импульса $\tau = 1$ с спектральное разрешение составляло 1 Гц. В рамках модели Тейлора “вмороженной” турбулентности можно ожидать, что расширение спектра рассеянного сигнала будет определяться конечными размерами диаграммы направленности и при скорости ветра 5–10 м/с должно составлять от долей герца до 1 Гц. На эксперименте спектр рассеянного сигнала часто имел сложную структуру, и его ширина достигала $\Delta f \approx 6 - 8$ Гц. Этот эффект можно объяснить внутренними движениями воздушных масс в объеме рассеяния [2,3].

Работа содара в многолучевом режиме дает возможность проводить одновременные измерения в нескольких рассеивающих объемах. Увеличение длительности зондирующего импульса с 1 до 2 секунд позволило исследовать эволюцию процесса во времени. (Длительность зондирующего импульса ограничивалась временем его распространения от передающей антенны до рассеивающего объема и обратно до приемной антенны.) Использование регистрирующей аппаратуры с большим динамическим диапазоном позволило отказаться от узкополосных фильтров и значительно уменьшить усиление приемного тракта, что улучшило его динамические характеристики. Первая серия экспериментов с многолучевым содаром была проведена нами в 2000 году [4]. В этой серии как приемная, так и передающая антенны работали в четырехлучевом режиме. Для идентификации каналов лучи передающей антенны формировались на близких, но разнесенных частотах. Однако эта схема оказалась не совсем удачной: при работе с узкими лучами антенн из-за значительной нерегулярной рефракции акустических сигналов прием рассеянного

сигнала был недостаточно устойчивым; его интенсивность была мала. Существенным недостатком было и отсутствие оперативного контроля эффективности эксперимента.

В экспериментах 2001 года указанные недостатки были в значительной степени устранены: передающая антенна работала в однолучевом режиме с широкой (порядка 8 градусов) диаграммой направленности (для приема рассеянного сигнала по-прежнему использовался четырехлучевой режим). Был организован оперативный контроль результатов эксперимента. Предложенная система обеспечивает эффективную регистрацию наличия турбулентных неоднородностей воздуха внутри ячеек с размерами порядка 30 – 60 м.

Результаты проведенного эксперимента могут привести к более широкому использованию содарных технологий в исследованиях атмосферной турбулентности и внедрению относительно недорогого способа мониторинга трехмерной структуры поля скоростей ветра на высотах до 500 – 1000 м.

2. Аппаратура и методика эксперимента

Эксперименты проводились на многолучевом бистатическом содаре. Эта установка включала в себя две параболические антенны (РТ–15) диаметром по 15 м и фокусным расстоянием 5,25 м. Одна из этих антенн (РТ–15–1) использовалась в качестве передающей антенны, а вторая (РТ–15–2) — как четырехлучевая приемная антенна. Расстояние между антеннами (база) составляло 425 м, база ориентирована (направление от передающей к приемной антенне) под углом 31 градус к югу от востока. Луч передающей антенны был направлен в зенит. Геометрическая ось приемной антенны пересекала луч антенны передатчика на высоте 400 или 500 м. На рис.1 схематично изображено пересечения лучей приемной и передающей антенн. Кроме упомянутых (основных) антенн в ряде сеансов была использована дополнительная приемная параболическая антенна (РТ–4) диаметром 4,5 м и фокусным расстоянием 1,57 м. При работе с РТ–4 база составляла около 380 м, ориентация базы — 36 градусов к югу от востока. Зеркало антенны было ориентировано на точку, находящуюся на высоте около 300 м над антенной передатчика. Антенна РТ–4 могла работать в двухлучевом режиме.

Передающая антенна

Для облучения зеркала передающей антенны РТ–15–1 использовались шесть рупорных громкоговорителей 25ГР–Д2 с номинальной мощностью 25 Вт каждый. Рупоры были установлены в фокальной

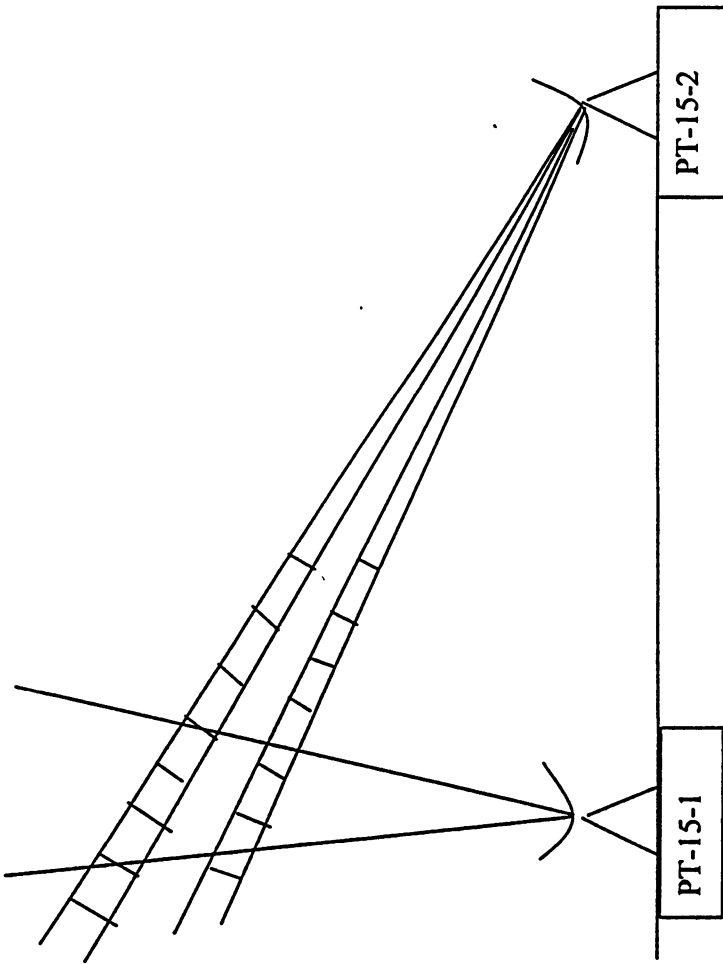


Рис. 1

плоскости зеркала, при этом их центры были удалены от фокуса зеркала на расстояние 0,32 м. Рупоры возбуждались попарно тремя отдельными усилителями мощности. На вход каждого усилителя мощности подавался сигнал от общего задающего генератора, работавшего на частоте 576 Гц. В некоторых сеансах на вход усилителей подавался суммарный сигнал от двух генераторов (с равными амплитудами). В этом случае частота второго генератора устанавливалась выше частоты основного генератора на 20, 40 или 60 Гц. В работе использовался импульсный режим излучения (для временного разделения прямого и рассеянного сигналов при приеме), хотя передатчик мог работать так же и в непрерывном режиме. На рис.2а контурами показано сечение горизонтальной плоскостью (на высоте 500 метров) расчетной диаграммы направленности (по мощности) антенны РТ-15-1 при облучении зеркала шестью рупорами на основной рабочей частоте 576 Гц.

К сожалению, вскоре после начала наблюдений одна пара рупоров оказалась не работающей (из-за нарушения контакта с питающим кабелем), поэтому в дальнейшем работа производилась с использованием только двух пар рупоров. Это привело к уменьшению излучаемой мощности и к некоторой асимметрии в диаграмме направленности передающей антенны относительно ее геометрической оси. Сечение диаграммы направленности при работе двух пар рупоров показано на рис. 2б. На рис. 2а, б ось ординат ориентирована в направлении базы (от РТ-15-1 к РТ-15-2), другая ось — перпендикулярно базе, точка с координатами (0,0) находится над центром зеркала.

Приемная антенна

Прием акустического сигнала на антенну РТ-15-2 проводился четырьмя микрофонами (МКЭ-3), которые были установлены в фокальной плоскости антенны на плоском квадратном отражателе размером 0,7 x 0,7 м. Микрофоны располагались по углам квадрата на удалении 0,22 м от фокуса и были снабжены микрофонными усилителями. Конструктивно каждая микрофонная капсула (МКЭ-3) размещалась внутри небольшой воронки для защиты от дождя. Там же размещался микрофонный усилитель (коэффициент усиления порядка 30 дБ).

Наличие четырех отдельных микрофонов позволяло сформировать четыре луча приемной антенны, разнесенные по азимуту и высоте на ширину луча (на угол 2,6 градусов). Каждый из этих лучей при

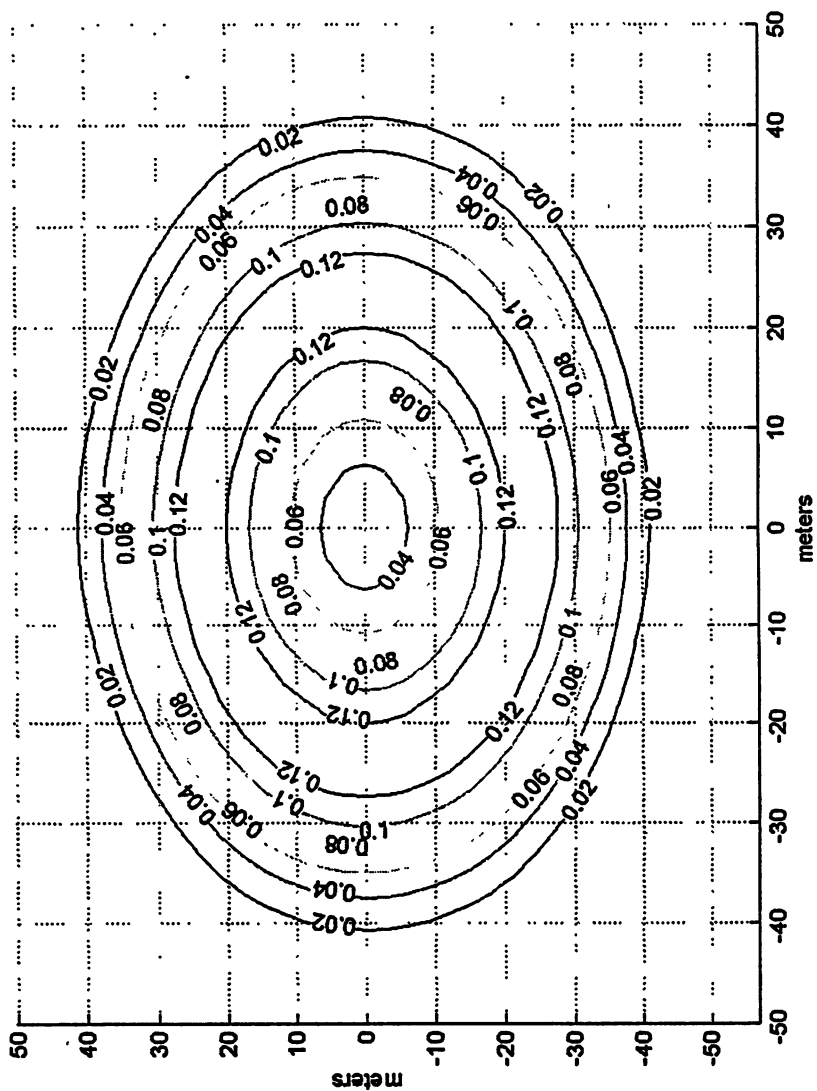


Рис. 2а

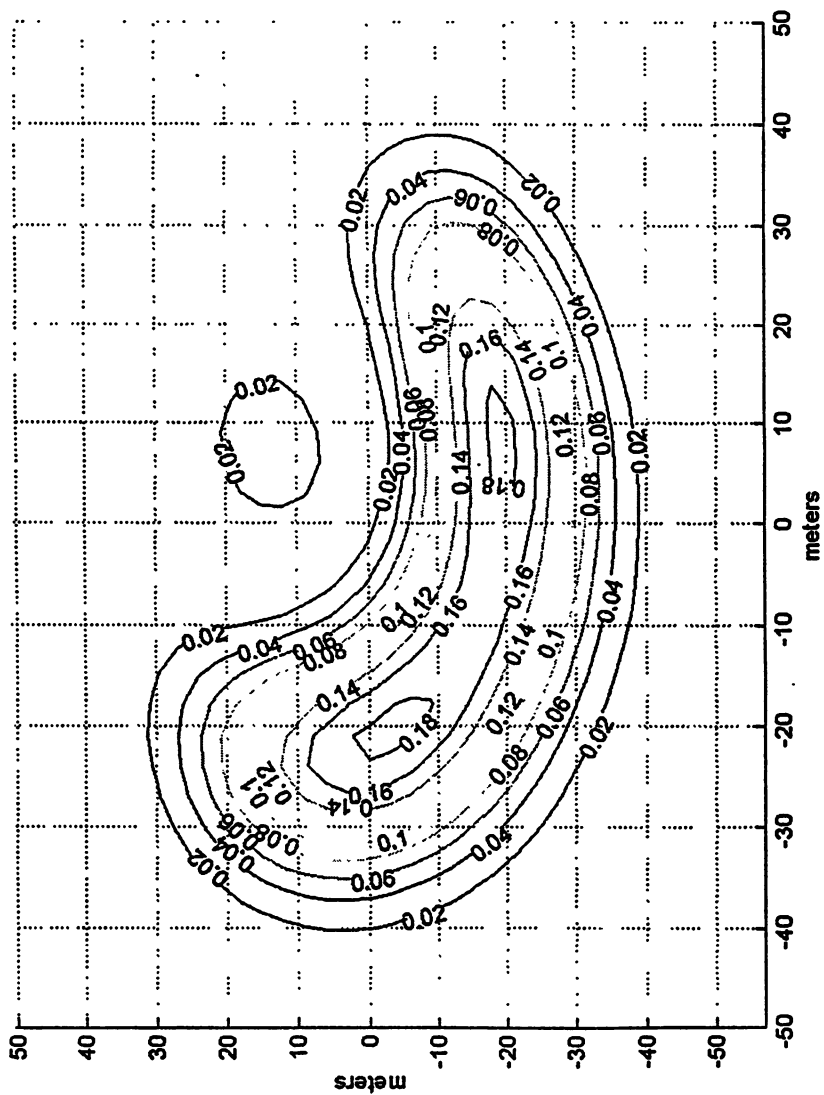


Рис. 26

пересечении с более широким лучом передающей антенны формировал свою область, из которой принимался рассеянный сигнал. Чтобы наглядно представить размеры и взаимное расположение этих областей на рис. 3а приведена расчетная величина интенсивности сигнала, рассеянного плоским слоем толщиной 3 м, в зависимости от высоты слоя для каждого из четырех лучей (сечение области рассеяния по вертикали). Размеры слоя в двух других измерениях составляют 117 на 117 м. На рис. 3а отметке 0 на оси X соответствует высота 500 м. Расчет проведен в предположении однородных и изотропных рассеивающих свойств атмосферы и с учетом того, что зеркало передатчика облучалось только четырьмя рупорами (из шести установленных). Из рис. 3а видно, что, например, для первого и третьего лучей максимум рассеянного сигнала приходит с высоты 545 и 485 м соответственно, а толщина областей эффективного рассеяния (по вертикали) составляет 50 – 60 м. Второму и четвертому лучам соответствуют высоты максимального сигнала 530 и 490 метров. На рис. 3б и 3с приведены аналогичные сечения для вертикальных секущих плоскостей (рис. 3б – секущая плоскость параллельна плоскости YZ, т.е. – вертикальная и параллельная направлению базы; рис. 3с – секущая плоскость параллельна плоскости XZ, т.е. – вертикальная, поперек базы). При этом координате 0 на этих рисунках соответствует сечение, проходящее через точку (0,0) на рис. 2б.

Для приема сигнала на антенну РТ-4 в ее фокальной плоскости были установлены два микрофона с разнесом (от фокуса) по 14 см. Это позволяло сформировать два луча, разнесенные в вертикальной плоскости. На рис. 4а – рис. 4с приведены аналогичные сечения областей рассеяния для двух лучей РТ-4. В отличие от рис. 3а, на рис. 4а отметке 0 на оси X соответствует высота 300 м.

Были предприняты попытки по прямому измерению диаграмм направленности четырех лучей приемной антенны РТ-15-2. В этих измерениях приемная антенна ориентировалась на источник сигнала, в качестве которого использовалась одна пара рабочих рупоров передающей антенны РТ-15-1, ориентированной в зенит. В этом случае предполагалось, что излучение самого зеркала антенны РТ-15-1 вдоль поверхности земли много меньше бокового излучения рупоров в том же направлении. Для измерения диаграмм азимут приемной антенны (при фиксированном положении оси антенны относительно горизонта) изменялся в пределах до 7 градусов в обе стороны от направления на источник сигнала с шагом 1 градус. Из-за глубоких

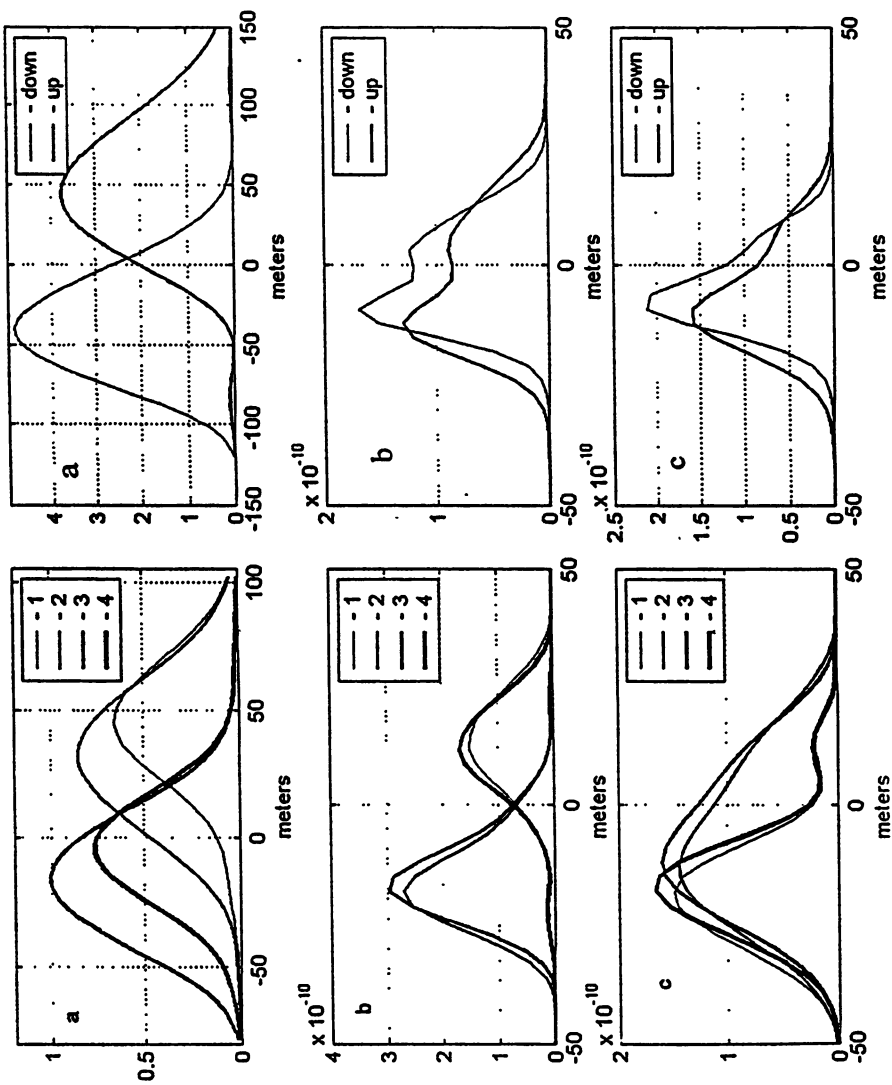


Рис. 3

Рис. 4

флуктуаций уровня сигнала его регистрация в каждом положении антенны проводилась в течение пяти минут, так что общее время прохождения по всем 15 точкам азимута составляло 75 мин. Измерения проводились в утренние часы по одному разу в день в течение нескольких дней (каждый раз изменяя положение оси антенны относительно горизонта на 1 град). Взаимное расположение микрофонов в фокальной плоскости РТ-15-2 (вид на зеркало) и их ориентировка относительно горизонтальной системы координат при измерениях диаграммы направленности дано на рис. 5.

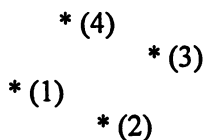


Рис.5

На рис. 6а приведена зависимость усредненных (по 5-минутным интервалам) значений интенсивности принимаемого сигнала от положения антенны (азимута) для каждого из четырех лучей. Ориентация оси антенны относительно горизонта в этих измерениях составляла угол 0,7 град (при этом геометрическая ось антенны при изменении азимута должна проходить через источник сигнала). Из рисунка 6а видно, что лучи 1 и 3 (с наибольшим разносом по азимуту и с наименьшим разносом по высоте относительно оси антенны) разделяются очень хорошо, при этом ширина каждого из этих лучей порядка 2-3 градуса. На рис. 6б приведена аналогичная зависимость при ориентации оси антенны относительно горизонта под углом 1,7 град. В этом положении наилучшие условия для приема сигнала должен иметь четвертый луч, что мы и видим из сравнения рис. 6а и рис. 6б. Что касается интенсивностей сигнала, то здесь следует заметить, что, к сожалению, прямое сравнение интенсивностей в разных лучах оказалось невозможным из-за неучтенного различия в коэффициентах усиления по каналам. Причиной различия могли быть изменения в коэффициентах передачи электретных микрофонов (МКЭ-3), работавших в условиях отсутствия надежной защиты от влаги. Подытоживая, можно сказать, что измеренные диаграммы направленности по лучам удовлетворительно соответствуют расчетным значениям.

Основные параметры установки

Частота излучаемого сигнала	576 Гц (основной режим)
Ширина луча передатчика	8 град
Ширина (каждого) луча основной приемной антенны	2,6 град
Ширина (каждого) луча дополнительной антенны	9 град
Длительность импульса	2с (в первых сеансах – 1с)
Период повторения импульсов	8с
Суммарная мощность:	
подводимая к рупорам (электрическая)	100 Вт
излучаемая (акустическая)	5 – 10 Вт
Полоса пропускания приемного канала	200 – 1500 Гц
Частота оцифровки АЦП	2304 Гц

Методика эксперимента

Нами была разработана методика, позволяющая исследовать динамические процессы в турбулентной области.

Сформулируем основные требования к эксперименту.

1. Размеры области пересечения приемного и передающего лучей должны быть меньше или порядка внешнего масштаба (или субмасштаба) турбулентности.
2. Размер элементарного рассеивателя, определяемого длиной акустической волны, должен быть много меньше размера объема рассеяния (другими словами — в объеме рассеяния должно находиться много рассеивающих центров).
3. Длительность зондирующего импульса должна быть достаточной, чтобы обеспечивать возможность Фурье — анализа с разрешением, существенно превышающем расширение спектра рассеянного сигнала.
4. Желательно обеспечить регистрацию скорости ветра в широком интервале высот.

Выбранная схема эксперимента достаточно хорошо соответствовала этим требованиям.

К сожалению, нам не удалось реализовать моностатический режим работы содара (параллельно с бистатическим режимом). Одновременная работа с наклонным и обратным лучами позволила бы

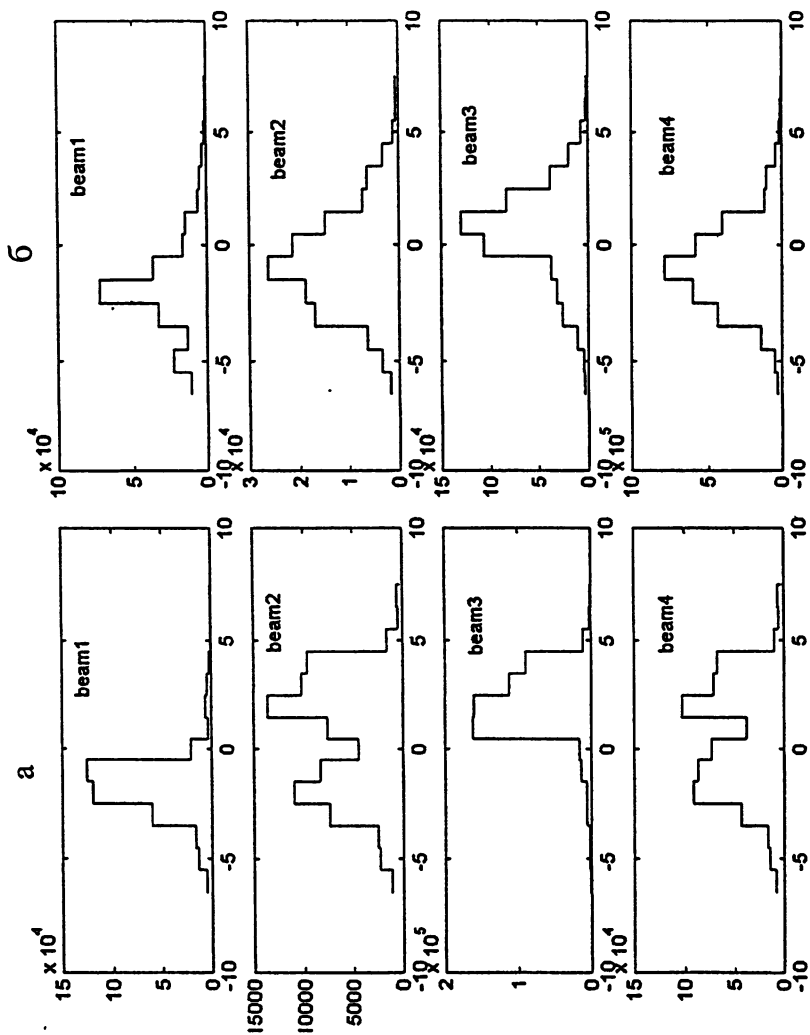


Рис.6

оценить вклад в рассеянный сигнал от температурных и ветровых неоднородностей.

Частота оцифровки принимаемого сигнала была выбрана равной 2304 отсчета/сек., т.е. ровно в четыре раза выше рабочей акустической частоты. Такое соотношение частот позволило использовать при обработке схему аналогичную схеме синусно-косинусного синхронного детектирования с последующей фильтрацией сигнала. Действительно, умножая регистрируемый сигнал на меандр, затем тот же сигнал на меандр, сдвинутый относительно первого, на четверть периода, и проводя затем частичное усреднение результирующего сигнала по нескольким периодам, получим полный аналог работы приемника с нулевой промежуточной частотой. При использовании сравнительно маломощного компьютера эта методика позволяла проводить эффективный контроль спектров рассеянных сигналов в процессе проведения эксперимента. Обработка проводилась в промежутках времени между сеансами наблюдений. При проведении эксперимента использовался стандартный режим работы с длительностью акустического импульса 2 с и длительностью паузы 6 с. Выбор такого режима связан с тем обстоятельством, что прямой зондирующий сигнал не должен мешать регистрации рассеянного сигнала.

Для более полного исследования пространственного спектра турбулентности нами были проведены несколько пробных сеансов, в которых излучение проводилось одновременно на двух частотах (двухчастотный сигнал). Известно, что рассеяние акустических волн происходит на неоднородностях порядка $\lambda_{ac}/2$, где λ_{ac} — длина волны. Методика, основанная на использовании двухчастотных сигналов, позволяет исследовать пространственный спектр элементарных рассеивателей с размерами $\lambda_{ac}/2$. Если плотность (концентрация) этих рассеивателей связана с масштабом вихрей, то этот метод позволит исследовать пространственный спектр вихрей в широком интервале масштабов. Рассмотрим эту методику на несколько упрощенной модели.

Поле рассеянного монохроматического сигнала в случае $L \ll R$ (где L — линейный размер объема рассеяния, R — расстояние от приемника (передатчика) до этого объема) определяется выражением

$$u(\vec{R}_r) = \text{const} \cdot e^{i\Omega t} \int_{(V')} e^{i(\vec{k}, \vec{r}_i - \vec{k}, \vec{r}_r)} \varepsilon(\vec{r}') d\vec{r}'$$

или

$$u(\bar{R}_r) \sim e^{i\Omega t} \cdot e^{i(\bar{k}_r \bar{R}_r - \bar{k}_r \bar{R}_r)} \int_{(V')} e^{i(\bar{k}_r - \bar{k}_r) \bar{r}'} \varepsilon(\bar{r}') d\bar{r}' \quad (1)$$

Здесь Ω — акустическая частота, \bar{r}' , \bar{R}_r , \bar{R}_r — координаты рассеивающего центра, передатчика и приемника соответственно, $\varepsilon(\bar{r}')$ — задает распределение неоднородностей в области рассеяния, а величины \bar{r}_r и \bar{r}_i задаются соотношениями $\bar{r}_r = \bar{R}_r - \bar{r}'$, $\bar{r}_i = \bar{R}_r - \bar{r}'$.

Для моностатического зондирования, когда приемник и передатчик находятся в одной точке, и узкой диаграммы направленности антенны (излучение вдоль оси z), выражение (1) можно переписать в виде

$$u(\bar{R}_r) \sim e^{i(\Omega t - 2kR)} \int_{(V')} e^{i2kz} \varepsilon(z) dz, \quad (2)$$

$\int_{(V')} e^{i2kz} \varepsilon(z) dz$ — случайная комплексная амплитуда рассеянного поля.

Пусть зондирующий сигнал представляет собой сумму двух синусоид $u = u_1 + u_2$, где u_1 — рассеянное поле на частоте Ω_1 (волновое число — k_1), а u_2 — рассеянное поле на частоте Ω_2 (волновое число k_2),

$$u_1(\bar{R}_r) \sim e^{i(\Omega_1 t - 2k_1 R)} \int_{(V')} e^{i2k_1 z} \varepsilon(z) dz, \quad (3a)$$

$$u_2(\bar{R}_r) \sim e^{i(\Omega_2 t - 2k_2 R)} \int_{(V')} e^{i2k_2 z} \varepsilon(z) dz. \quad (3b)$$

При использовании двухчастотного сигнала произведения $u_1 u_1^*$ и $u_2 u_2^*$ не будут содержать осциллирующих членов, произведения же $u_1 u_2^*$ и $u_2^* u_1$ (смешанные моменты второго порядка) будут содержать компоненту, связанную с разностной частотой Ω .

Действительно,

$$J = \overline{u_1 u_2^*} \sim e^{i(\Delta\Omega t - 2\Delta k R)} \iint_{(V')} e^{i2(k_1 z_1 - k_2 z_2)} \overline{\varepsilon(z_1) \varepsilon^*(z_2)} dz_1 dz_2.$$

Усреднение проводится по «малому» интервалу времени (несколько периодов основной частоты).

В случае $\overline{\varepsilon(z_1)\varepsilon^*(z_2)} = \sigma(z_1) \cdot \delta(z_1 - z_2)$ имеем

$$J = \overline{u_1 u_2^*} \sim e^{i(\Delta R \cdot t - 2 \Delta k R)} \cdot \Phi(2 \Delta k), \quad (4)$$

где $\Phi(k) = \int_{V'} e^{ikz} \cdot \sigma(z) dz$ — спектральная плотность для поперечников

рассеяния σ , соответствующая пространственной частоте k .

Таким образом, для величины $H = \langle JJ^* \rangle$ (усредненной за весь сеанс) получим

$$\langle JJ^* \rangle = \langle \overline{u_1 u_2^*} \cdot \overline{u_1^* u_2} \rangle = \langle \Phi(2 \Delta k) \cdot \Phi^*(2 \Delta k) \rangle.$$

Измеряя величину H , мы получим спектральную компоненту пространственного распределения поперечника рассеяния акустических волн для масштаба, характеризуемого волновым числом $2 \Delta k$. Изменяя разность частот сигналов, излучаемых одновременно, мы можем перекрыть пространственный спектр в диапазоне масштабов 1 – 10 м.

3. Результаты эксперимента

В настоящей работе мы стремились провести систематизацию данных эксперимента и провести первые попытки использования новых методик обработки данных.

Эксперименты проводились с 11 июня по 15 июля 2001 года на полигоне НИРФИ Зименки в 25 км к востоку от Нижнего Новгорода. Регистрация рассеянного на атмосферных неоднородностях сигнала проводилась ежедневно. Длительность отдельного сеанса составляла 0,5–2 часа. Интенсивность рассеянного сигнала имела четко выраженный суточный ход и не была прямо связана со скоростью ветра. Рассеянный сигнал появлялся, как правило, в интервале 8–11 LT, интенсивность его заметно уменьшалась к 20–21 LT. Ежедневный интервал наблюдений варьировался от 6 до 12 часов. Общее время наблюдений составило примерно 210 часов. В первый период (11 – 19 июня) наблюдений проводилась регистрация сигналов с 4-х микрофонов антенн РТ–15–2. В дальнейшем, после ввода в строй антенны РТ–4, регистрировались также сигналы с обоих микрофонов этой антенны. Общее число акустических каналов, таким образом, было равно 6.

Как правило, на непосредственной записи в широкой полосе частот увидеть относительно слабый рассеянный сигнал, приходящий с опозданием на 2–3 секунды относительно момента прихода прямого,

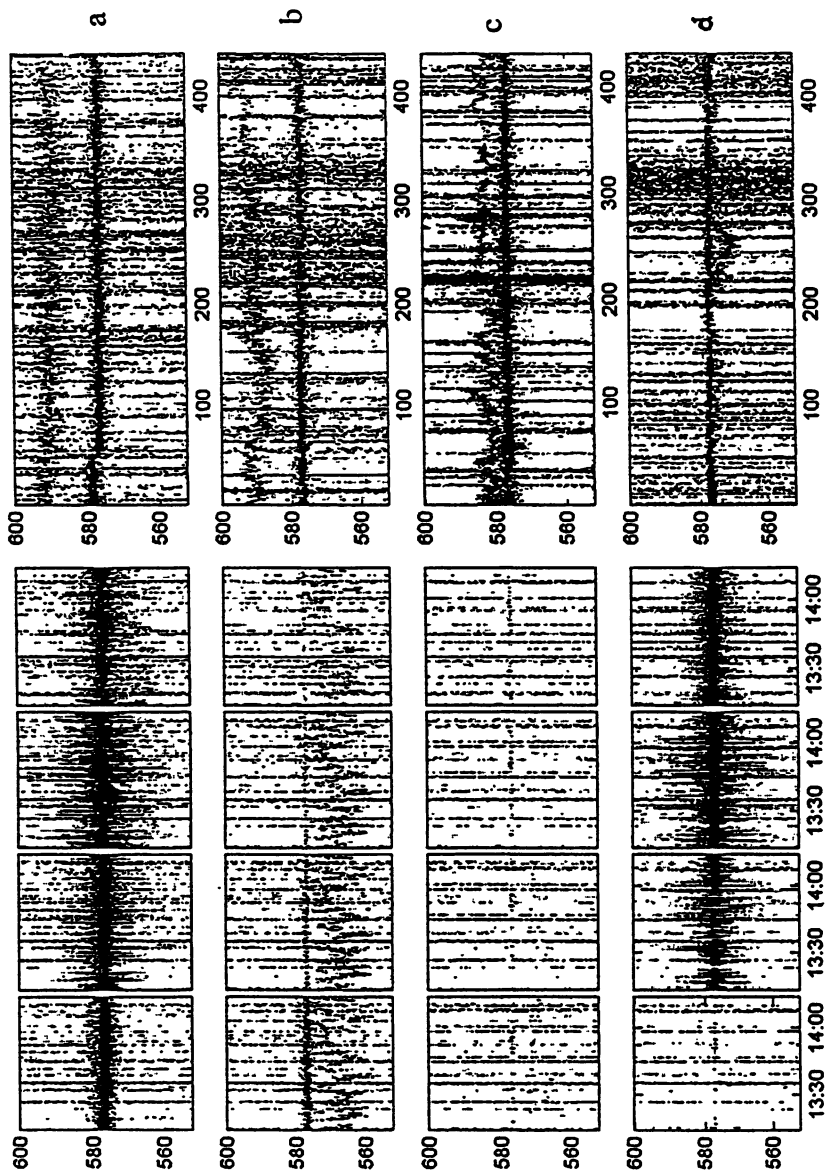


Рис.8

Рис.7

невозможно. Причиной этого является как высокий уровень мешающих сигналов, принимаемых антенной после их отражения от множества местных предметов и приходящих одновременно с рассеянным сигналом, так и (часто) высокого уровня посторонних широкополосных помех. Рассеянный сигнал удается выделить (однако тоже не всегда) при спектральной обработке записи с достаточно высоким частотным разрешением и при условии, что рассеянный сигнал отличается по частоте от сигналов, отраженных от неподвижных объектов. На рис. 7 приведен пример спектральной обработки одного из сеансов

наблюдений продолжительностью 1 час (июль 10, сеанс 5 — с 13:15 до 14:15). Здесь в каждом из 16 “окон” представлен динамический спектр (яркостная запись) 2-х секундных выборок, взятых из непрерывной записи с определенной фиксированной задержкой относительно момента прихода ^{прямой сигнал} сигнала. От одного “окна” к последующему “окну” (считая слева направо и сверху вниз) величина задержки изменялась от 0 до 7,5 с с шагом 0,5 с. Видно, что рассеянный сигнал, характеризующийся диффузным спектром и смещенной частотой (частота также изменяется за время сеанса), появляется только в интервале задержек от 2 до 3–3,5 с. На задержках от 0 до 1,5 с и от 6,5 до 7,5 с выборки забиты прямым сигналом. В интервале задержек от 4-х до 6 с в выборки попадает только ослабленный сигнал, отраженный от местников (и, конечно, на всех задержках видны вертикальные полосы от широкополосных помех). На рис. 8а – рис. 8д приведены характерные спектры (для оптимальных временных задержек). На этих рисунках вдоль горизонтальной оси отложено время в форме номера скана (временной период между соседними сканами составляет 8 с). На рис. 8а (июнь 15, сеанс 1) приведен пример спектра с относительно постоянной средней доплеровской частотой на значительном интервале времени. На рис. 8б (июнь 15, сеанс 4) – пример спектра с плавным изменением средней доплеровской частоты. На рис. 8с (июнь 18, сеанс 3) – пример спектра с относительно быстрыми хаотическими изменениями доплеровской частоты и на рис. 8д (июнь 23, сеанс 4) – пример спектра с изолированным глубоким колебанием доплеровской частоты. По величине доплеровского смещения частоты может быть найдена проекция скорости ветра (в области рассеяния) на направление базы двухантенной системы. Обработка показала, что эта величина обычно находится в интервале значений от 0 до 14 м/с. (с тем или иным знаком в зависимости от направления ветра).

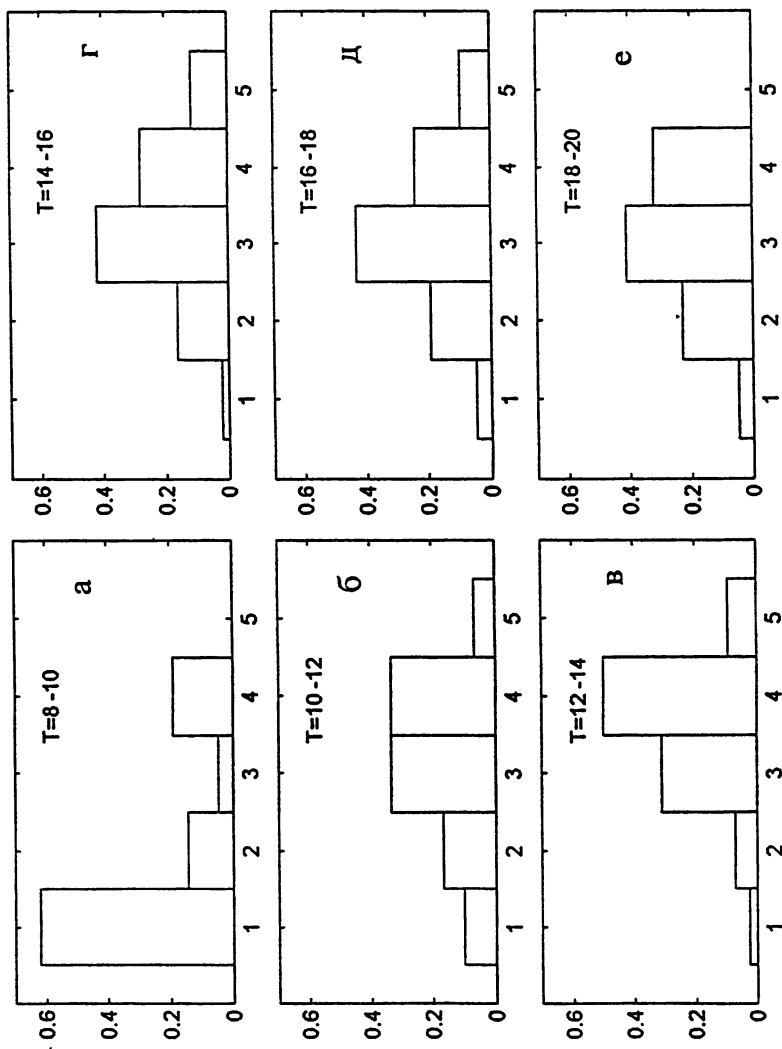


Рис.9

При рассеянии звука на турбулентных неоднородностях атмосферы ее рассеивающие свойства определяются в основном ветровыми и температурными неоднородностями [5,6], интенсивность которых зависит, в частности, от времени суток. Для выяснения зависимости интенсивности рассеянного сигнала от времени проведения наблюдений, нами была проведена оценка уровня (интенсивности) рассеянного сигнала и построено распределение записей по уровню сигнала для различных временных интервалов. Оценка уровней делалась качественно, по пятибальной шкале и учитывала различимость сигнала на фоне шумов (1 – сигнал практически не заметен, 2 – заметен, но почти тонет в шумах, 3 – удовлетворительный, 4 – хорошо выделяется на фоне шумов, 5 – очень хороший сигнал). На такую оценку, конечно, влияет уровень шумов, который, в свою очередь, зависит от многих факторов. Уровень акустического шума резко возрастал во время дождя или при значительном ветре вблизи поверхности земли (резко возрастал шум, создаваемый близкорасположенными деревьями). На рис. 9а–9е приведено распределение спектров по уровню сигнала для различных двухчасовых временных интервалов, охватывающих период с 8 до 20 часов. Из рис. 9а видно, что в утренние часы рассеянный сигнал чаще всего отсутствовал, а наилучшее время наблюдений приходилось на полуденные часы (см. рис. 9в). В утренние (до 8 ч) и вечерние (после 20 ч) часы количество проведенных сеансов было недостаточным для построения распределений. Однако имеющиеся записи подтверждают вывод, что в это время суток чаще всего отсутствовали условия для заметного рассеяния сигнала. На ряде спектров можно видеть плавное нарастание интенсивности линии рассеянного сигнала в утренние часы и плавное уменьшение интенсивности линии рассеянного сигнала в вечернее время, хотя доплеровское смещение частоты (характеризующее скорость ветра в области рассеяния) остается неизменным. Все это указывает на существенное влияние конвективных движений на интенсивность рассеянного сигнала.

Интересны спектры, относящиеся к 3 июля и 11 июля.

В первой половине дня 3 июля стояла особенно жаркая и безветренная погода. В это утро (около 11:30) был замечен огромный (на несколько десятков метров) вертикальный столб пламени, выходящий из трубы нефтеперегонного завода НОРСИ, находящегося на расстоянии 4–5 км от полигона. На рис. 10 приведена спектральная обработка часовой

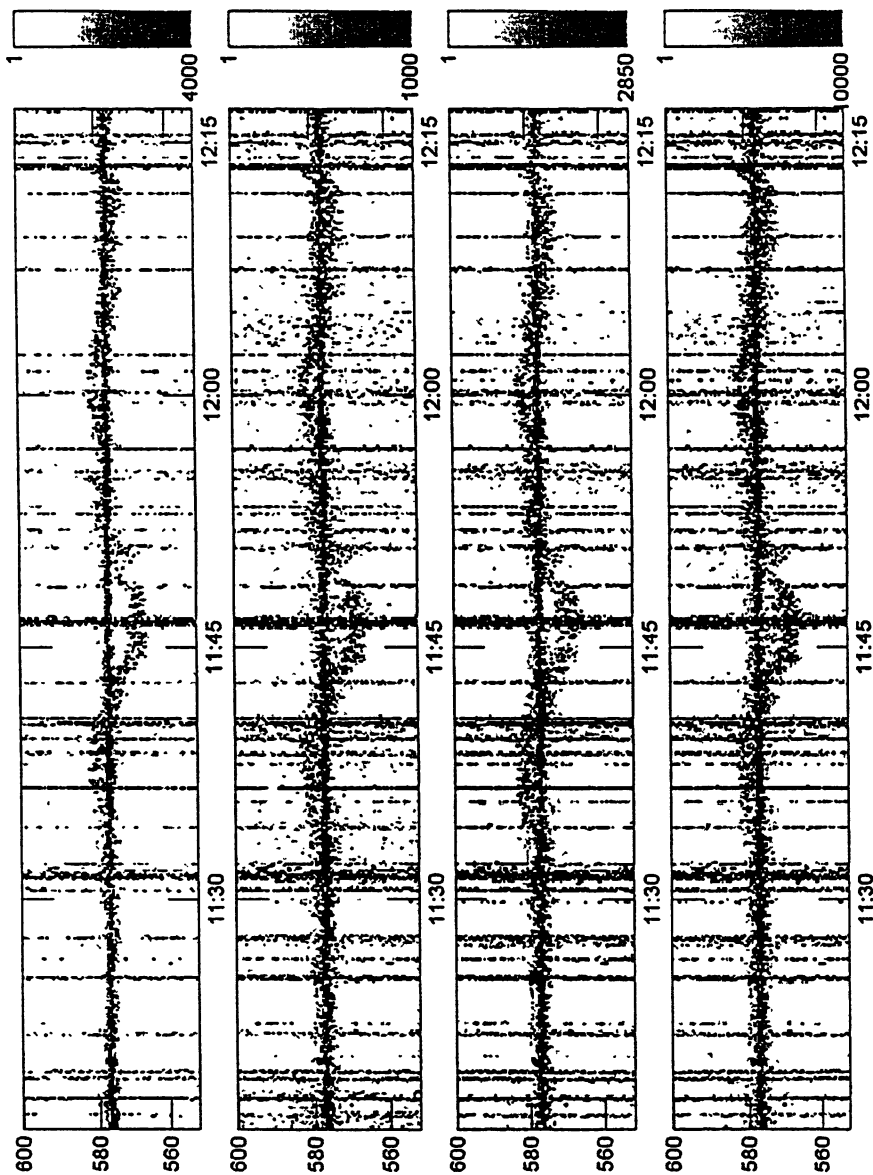


Рис. 10

записи сигнала, относящейся к этому времени. На приведенном спектре (всех 4-х каналов РТ-15-2) обращает на себя внимание довольно резкое появление рассеянного сигнала, по времени близкое к моменту обнаружения факела, его необычно большая интенсивность и четко очерченная ширина полосы. Интересно и довольно глубокое изолированное колебание доплеровской частоты продолжительностью 4 – 6 минут вблизи момента времени 11:46. Эта запись дает основание предполагать наличие возможной связи между интенсивностью рассеяния акустического сигнала и загрязнением атмосферы промышленными выбросами.

В последующие три сеанса (практически непрерывная запись с 12:57 до 16:03) характер спектра не изменился. К сожалению, в этот день наблюдения проводились только до 16:03.

Что касается спектров за 11 июля. Первые два сеанса относятся к периоду времени 7:57 – 10:13. Спектр в этот период вполне обычный, рассеянный. сигнал стал заметен к 8:20, в последующие 20–30 минут его интенсивность увеличилась до обычного уровня, характер спектра – спокойный (полоса рассеянного сигнала почти не отличалась от полосы сигнала, рассеянного местниками, смещение частоты небольшое с небольшими же колебаниями). Но уже с начала 3-го сеанса (10:30) и до конца времени наблюдений (до 18:00) рассеянный сигнал имел необычно высокую интенсивность, широкий спектр, довольно быстро и хаотично изменяющуюся частоту. К сожалению, на этот день мы не можем ничего сказать о состоянии выбросов в атмосферу со стороны НОРСИ.

Литература

1. Зиничев В.А., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А. Бистатический содар на базе полноповоротных 15-метровых радиотелескопов// Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т.40. №10. С. 1302 – 1304.
2. Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Сазонов Ю.А. Исследование динамических процессов в тропосфере локационными методами – Препринт №449. Нижний Новгород: НИРФИ, 1999.
3. Rapoport V., Mityakov N., Zinichev V., Sazonov Yu. The study of atmospheric turbulence with on acoustic locator// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. (в печати).
4. Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Сазонов Ю.А., Выборнов Ф.И. Многолучевой бистатический содар — Препринт №464, Нижний Новгород: НИРФИ, 2000.
5. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967.
6. Little C.G. Acoustic methods for the remote probing of the lower atmosphere// Pros. IEEE. 1969. V.57. N 4. P. 571-578.

N.A.Mitjakov, V.A.Zinichev, V.O.Rapoport, U.A.Sazonov, F.I.Vybornov,
N.A.Ryzhov

Acoustic sounding of atmosphere using multibeam sodar

The results of atmosphere acoustic sounding in summer of 2001 are represented. The experiments were carried out on frequency of 576 Hz using multibeam bistatic sodar. The facility consisted of two parabolic antennas by a diameter 15 meters. The distance between antennas was about 425 m. Transmitting acoustic antenna having 8 degrees beam width was oriented in zenith. Receiving antenna had four beams with 2,6 degrees beam width for each and intersected transmitting antenna beam at a height about 500 m. The duration of acoustic pulse was 2 s with pulse repeating period 8 seconds. Such facility has allowed determining spatially - temporal behavior of an atmospheric turbulence in close volumes with a time resolution 1-2 s and space resolution about 30 m.