

– акустического канала, с помощью которого в атмосферу излучаются акустические импульсы, выполняющие функции искусственного радиолокационного отражателя, скорость движения которого зависит от параметров атмосферы;

– непрерывной доплеровской РЛС, которая измеряет скорость распространения звуковой посылки;

– измерительно-регистрирующего канала, в котором производится измерение периода доплеровской частоты на заданных высотах зондирования и вычисление по заданному алгоритму температуры воздуха. Принцип работы РАЛ-17 состоит в следующем. Электрический сигнал синусоидальной формы, полученный от звукового генератора (ЗГ) с частотой, устанавливаемой в пределах $f_3 = (32 \pm 5,6)$ кГц, управляет центральной частотой следящего фильтра (СФ) $f_{сф} = 0,125$ з, имеющего полосу пропускания $2\Delta f_{сф} = 40$ Гц. Точное значение f_3 устанавливается вручную до выполнения условия синхронизма ($\lambda_a = C_a f_{сф}^{-1} = 0,5\lambda_e$, λ_a, λ_e – длины волн акустического и электромагнитного излучений соответственно).

Получаемый в результате деления в СФ электрический сигнал с частотой $f'_3 = f_{сф} = (4 \pm 0,7)$ кГц подается на модулятор. В модуляторе из непрерывного сигнала формируется импульсный сигнал заданной длительности, который после усиления в усилителе мощности (УМ) подается на электроакустический преобразователь (ЭАП) и излучается в атмосферу. При распространении в атмосфере акустический импульс облучается непрерывным электромагнитным сигналом частоты f_0 , излучаемым передающей антенной доплеровской РЛС. Отраженный электромагнитный эхо-сигнал частотой $f_0 - F_d$ (F_d – частота Доплера) усиливается и выделяется в приемнике доплеровской РЛС, с выхода которого он подается на СФ. В нем происходит узкополосная фильтрация эхо-сигнала. Затем сигнал частоты F_d через усилитель доплеровской частоты (УДЧ) подается на цифровой периодомер, где происходит измерение периода доплеровской частоты $\tau = F_d^{-1}$ с интервалом 80 мкс, сдвинутым на 40 мкс относительно момента начала излучения зондирующего акустического импульса. Среднее по 100 периодам измеренное значение τ в цифровом коде поступает в мини-ЭВМ, где происходит математическая обработка данных. Предусмотрен визуальный контроль за амплитудой эхо-сигнала и значением τ . Он осуществляется с помощью индикатора – двухлучевого осциллографа, на один вход которого подается сигнал доплеровской частоты непосредственно с УДЧ, а на второй – напряжение, пропорциональное τ , получаемое путем преобразования цифрового кода периодомера в напряжение. Координирует взаимодействие всех узлов РАЛ-17 синхронизатор. Документирование результатов обработки мини-ЭВМ осуществляется телетайпом (РБА) Т-51, а аналоговой информации – автоматическим фотоаппаратом типа ФАРМ. Радиоприемное устройство доплеровской РЛС с внутренней когерентностью представляет собой супергетеродин с тройным преобразованием частоты. Антенная система РАЛ-17 смонтирована на артиллерийском лафете от зенитного орудия и может дистанционно управляться по углу места и азимуту. Для улучшения звуковой изоляции и характеристик излучения ЭАП помещен в металлический рупор, обшитый изнутри звукопоглощающим материалом. Одновременно стенки рупора служат экраном для паразитного электромагнитного излучения, попадающего на приемную антенну РЛС от передающей антенны. Обработка информации ведется с помощью мини-ЭВМ. Электронная аппаратура помещается в передвижном двухосном прицепе. Основные технические характеристики РАЛ-17 приведены ниже.

Акустический канал:

Длина волны, м	– 0,085
Подводимая электрическая мощность, Вт	– 360
Ширина диаграммы направленности $2\Theta_{0,5}$, град	– 6
Длительность зондирующего импульса τ_a , мкс	– 25 – 195
Период повторения зондирующих импульсов, с	– 1,2 и 2,4
Электроакустический преобразователь (ЭАП) представляет собой решетку из 6×6 громкоговорителей типа ГР-1.	

Доплеровская РЛС:

Излучаемая мощность, Вт	– 1
Чувствительность приемника, Вт	– 10^{-12}
Длина волны, м	– 0,17
Ширина диаграммы направленности каждой антенны $2\Theta_{0,5}$, град	– 8
Высота сведения лучей, м	– 300
Нестабильность частоты задающего генератора за 1 с	– $\pm 2 \cdot 10^{-11}$
Антенная система состоит из двух параболических зеркал диаметром 1,6 м с фокусным расстоянием 0,375 м, разнесенных относительно центров друг от друга на расстояние 4,3 м (антенная база).	

Измерительно-регистрирующий канал:

Используемая мини-ЭВМ – УВК-ОГ (на базе процессора С5-12).

Источник информации – цифровой выход частотомера ЧЗ-34.

Представление информации на бумажной ленте в виде таблицы и на перфоленте телетайпа Т-51.

Время получения данных о профиле температуры при усреднении по 20 зондированиям 2 мин.

Системные характеристики:

Диапазон высот зондирования при отсутствии ветра и $\tau_a = 80$ мс равен 35—180 м.
Условия работоспособности — от -20°C до 30°C , при слабых и умеренных осадках.
Мобильность — передвижной вариант.

Расчет определяемой в результате радиоакустического зондирования температуры велся по формуле:

$$t^{\circ\text{C}} = \left(\frac{1}{2} \frac{c_e}{a\tau} \frac{1}{f_0} \right)^2 - 273,15, \quad (2)$$

где $C_e = 2997928 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость распространения электромагнитных волн; $f_0 = 1760 \text{ МГц}$ — центральная частота излучения доплеровской РЛС; τ — измеренный период доплеровской частоты. Коэффициент a рассчитывался по формуле:

$$a = a_{\text{сух}} \left(1 + 0,14 \frac{e}{p} \right), \quad (3)$$

где $a_{\text{сух}} = 20,053 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \text{ К}^{-1/2}$; e — определяемое по наземным данным давление водяного пара; p — атмосферное давление. Поправка на несоосность лучей в ближней зоне не вводилась. Аппаратура, методика обработки и представление данных измерений ВММ описаны в [4]. При проведении измерений установка РАЛ-17 располагалась в 120 метрах к юго-востоку от ВММ. Измерения проводились в режиме вертикального зондирования. Всего было проведено 14 серий параллельных измерений. Из них одна серия была 7-часовой длительности, а остальные продолжались 2—4 часа. Ниже приводятся типичные результаты совместных измерений.

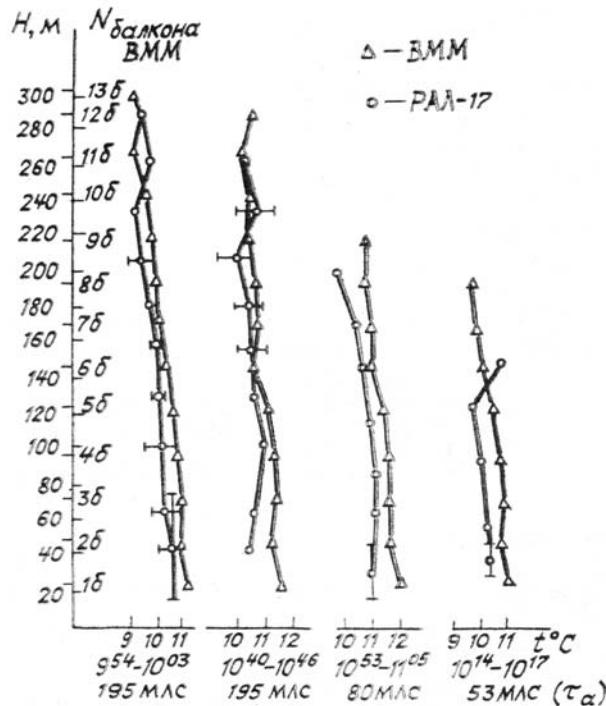


Рис. 2

На рис. 2 показаны вертикальные профили температуры воздуха, измеренные 05.06.87 г. в условиях, близких к штилевым, при различной длительности зондирующего акустического импульса. Время усреднения в этом эксперименте составило 5—7 мин. Расхождения между значениями температуры, измеренной на ВММ ($t_{\text{ВММ}}$) и РАЛ-17 ($t_{\text{РАЛ}}$), практически во всех точках профилей оказались не хуже, чем $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Как следует из этого рисунка, максимальная высота зондирования составила при $\tau_a = 80$ мс около 180 м, при $\tau_a = 195$ мс — 300 м. На рис. 3 а показан результат 7-часового слежения за тенденцией изменения температуры от 23—00 ч 08.06.87 г. до 06—00 ч 09.06.87 г. на четырех уровнях по высоте. Здесь усреднение проводилось по получасовым интервалам времени. Для иллюстрации корреляции между ходом $t_{\text{ВММ}}$ и $t_{\text{РАЛ}}$ значения $t_{\text{РАЛ}}$ были искусственно смещены на $+1^\circ\text{C}$. Удовлетворительное совпадение имело место и для абсолютных значений сравниваемых темпе-

ратур, рис. 3 б. Отличие в измеренных значениях $t_{РАЛ}$ и $t_{ВММ}$ составило за исключением одного выброса величину, также не превышающую $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Погрешность определения соответствующих средних значений температуры на ВММ не превышала $\pm 0,2^\circ\text{C}$, а установкой РАЛ-17 $\pm 0,3^\circ\text{C}$.

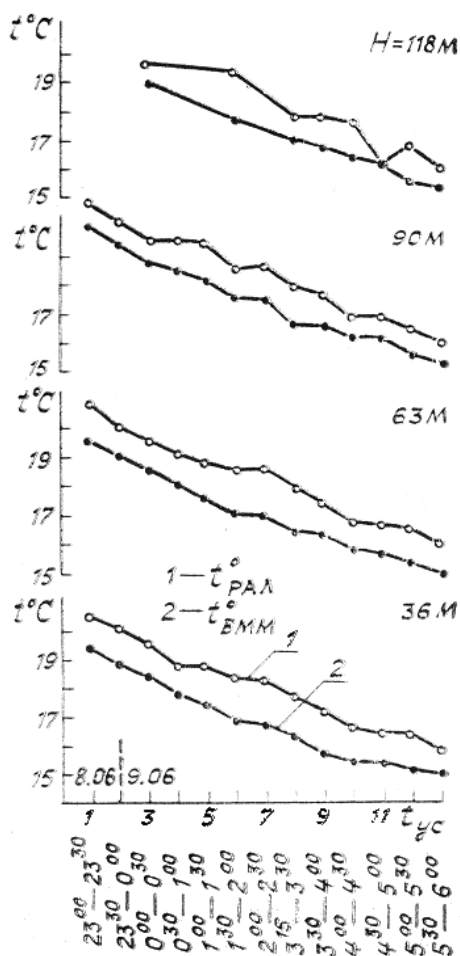


Рис. 3,а

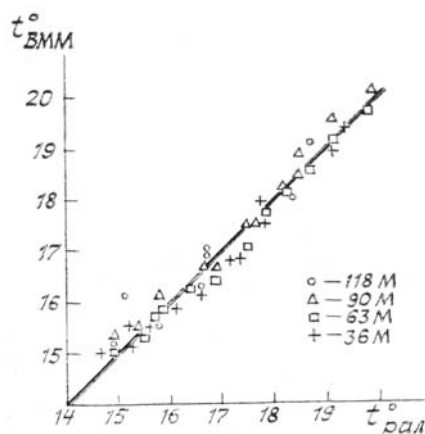


Рис. 3,б

Измерение скорости ветра методом РАЗ проводилось амплитудно-временным способом (АВС) по изменению дальности зондирования [5]. Разработка АВС обусловлена необходимостью быстро оценивать хотя бы качественно динамическое состояние приземного слоя атмосферы. Например, для обеспечения безопасности взлета и посадки летательных аппаратов. Применение обычной методики определения ветра в этом случае затруднительно. АВС базируется на достаточно обоснованном теоретически и экспериментально положении о том, что основными факторами, влияющими на амплитуду радиоакустического эхо-сигнала, помимо геометрической расходимости акустического луча, являются молекулярное затухание звука и вынос пятна рассеянного электромагнитного излучения из пределов апертуры приемной антенны под действием бокового к трассе зондирования (горизонтального) ветра [1]. Основываясь на результатах работы [6], уравнение радиоакустического зондирования можно записать в виде

$$A(z) = A(z)_0 \exp\left(-\frac{2}{3} \frac{1}{g^2} \langle v_{\perp} \rangle^2 z^2\right), \quad (4)$$

где $A(z)$ и $A(z)_0$ — отношение сигнал-шум по мощности радиоакустического эхо-сигнала при наличии и отсутствии ветра в слое $0 \dots z$ соответственно; V_{\perp} — скорость бокового ветра; $g = C_a(\kappa_e \Theta_0)^{-1}$, $\kappa_e = 2\pi\lambda_e^{-1}$; Θ_0 — полуширина диаграммы направленности акустического излучателя. Зависимость $A(z)_0$ может быть экспериментально определена при измерении огибающей радиоакустического эхо-сигнала на данной установке РАЗ и контролируемом с помощью ВММ факте отсутствия ветра в зондируемом слое атмосферы (при так называемых калибровочных условиях). Изменение амплитуды калибровочного эхо-сигнала с высотой согласно [6] можно записать в виде:

$$A(z)_0 = \Pi z^{-2} \exp(-\langle \alpha \rangle z), \quad (5)$$

где Π — радиоакустический потенциал; $\langle \alpha \rangle$ — средний по трассе коэффициент затухания звука. Принимая какое-либо значение отношения сигнал-шум за пороговое и отмечая соответствующие этому порогу значения z_0 и z , из равенства

$$A(z_0)_0 = A(z) \quad (6)$$

получим

$$\langle v_{\perp}(z) \rangle = m \frac{z_0}{z} \sqrt{\lg \frac{z_0}{z} + \frac{1}{2} z_0 \langle \alpha \rangle \left[1 - \left(\frac{z_0}{z} \right)^{-1} \right]}, \quad (7)$$

где

$$m = g \sqrt{\frac{3}{\lg e} \frac{1}{z_0}}.$$

Если выбранный порог соответствует минимально обнаруживаемому сигналу, то z_0 — максимальная дальность зондирования при отсутствии ветра и является параметром, характеризующим данную установку РАЗ. Величина $z(v_{\perp})$ при этом есть максимальная дальность зондирования при наличии ветра.

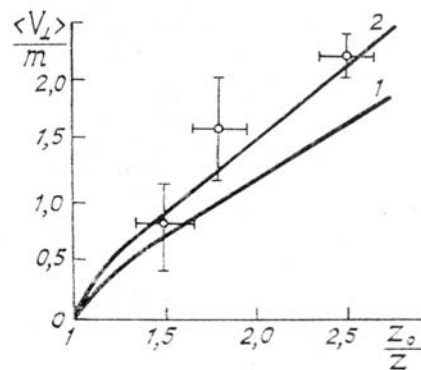


Рис. 4

Теоретическая зависимость (7), нормированная на параметр m , приведена на рис. 4. Кривая 1 рассчитана без учета молекулярного ослабления ($\langle \alpha \rangle = 0$, а кривая 2 — при $\langle \alpha \rangle = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, что соответствует калибровочным условиям: $t = 12^\circ \text{ С}$, $u = 80\%$, $F = 4$ кГц. Экспериментально определенный параметр z_0 для установки РАЛ-17 при $\tau_a = 80$ мс составляет 180 м. На этом же рисунке нанесены измеренные на ВММ значения средней в слое 8–120 м скорости ветра, соответствующие полученным на РАЛ-17 отношениям z_0/z . Приведенные результаты получены в 7 экспериментах по параллельному измерению среднего ветра общей продолжительностью 17 часов. Обработка данных радиоакустического зондирования ветра, так же как и при определении температуры, производилась с учетом большого веса измерений, соответствующих лучшему выполнению условия синхронизма на данной высоте. Экспериментальные данные наносились с учетом того, что для РАЛ-17 $m = 2,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Как следует из рис. 4, совпадение теоретической кривой 2 (с учетом ослабления) с экспериментальными точками вполне удовлетворительное в пределах достигнутой точности измерений. Полученные результаты в целом подтверждают возможность оценки средней в слое скорости ветра по амплитудно-временным характеристикам радиоакустического эхо-сигнала. Отметим, что зависимость типа представленной на рис. 4 может служить градуировочной кривой при экспресс-анализе ветровой обстановки радиоакустическим способом. Рассмотренный выше способ оценки среднего ветра оперативнее способа, основанного на определении высоты пересечения акустического пакета с электромагнитным лучом при упреждающем по отношению к направлению и скорости ветра выносе акустического излучателя [7]. Для реализации АВС не требуется никаких механических перемещений элементов антенной «системы установки РАЗ. Однако АВС не позволяет определять направление ветра. Это тем не менее является не принципиальным ограничивающим фактором, так как величина поворота ветра в рабочем диапазоне высот зондирования дециметровых систем РАЗ ~ 40–200 м лишь на немного (и то в редких случаях) превышает погрешность измерения направления. Проведенный цикл совместных измерений позволил дать объективную оценку точностным характеристикам установки РАЛ-17, а также экспериментально проверить амплитудно-временной метод оценки средней скорости ветра в зондируемом слое атмосферы.

В заключение автор выражает благодарность И.М. Крыловой и Л.К. Беловой за программное обеспечение экспериментов, П.В. Воловикову, Л.А. Лаврентьеву и Н.Д. Сучкову за помощь в проведении экспериментов на РАЛ-17 и коллективу сотрудников, руководимому Н.П. Тофанчуком, за проведение измерений на ВММ.

1. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука. 1985. 197 с.
2. Лободин В.М., Мазурин Н.Ф. //Труды ИЭМ. 1987. Вып. 10 (131). С. 81–89,
3. Алехин В.И., Корытцев И.В., Пилипенко Ю.Л. и др. //В кн.: Труды IX Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 2. Томск: ИОА СО АН СССР. 1987. С. 80–81.
4. Мазурин Н.Ф. //Труды ИЭМ. 1987. Вып. 10(131). С. 9–17.
5. А. с. 1008683 СССР, МКИ³ G 01 S 13/95. Радиоакустический способ определения сдвига ветра /Орлов М.Ю., Юрчак Б.С. Оpubл. в БИ. 1983. № 12.
6. Карюкин Г.А. //Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18. № 1. С. 38–45.
7. Бабкин С.И., Панченко А.Ю., Прошкин Е.Г. и др. //В кн.: Труды IX Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 2. Томск: ИОА СО АН СССР. 1987. С. 153–157.

Институт экспериментальной метеорологии
НПО «Тайфун»

Поступила в редакцию
1 августа 1988 г.

B. S. Yurchak. Comparative Analysis of Temperature and Wind Velocity Measurements by a Radioacoustic System and Local Sensors on a 300 m-High Meteorological Mast.

A radioacoustic sounding system RAL-17 is outlined. The temperature profiles and the average wind velocity for the particular layer measured by the proposed system are compared with in situ data from sensors located on a 300m-high meteorological 5 mast.