

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ.  
ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 681.325.5–181.4

А.Я. Богушевич

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ  
И ТУРБУЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск*

Поступила в редакцию 30.10.98 г.

Принята к печати 27.11.98 г.

Описываются информационные возможности ультразвуковых систем для оценивания метеорологических и турбулентных параметров в приземном слое атмосферы. С этой целью приводятся алгоритмы и методики обработки данных измерений, применяемые в ультразвуковой метеостанции БМК-01.

**Введение**

Идея применения ультразвуковых методов для оценивания метеорологических параметров атмосферы появилась еще в конце 40-х годов в связи с тем, что используемым стандартным метеорологическим приборам присущи существенные инерционные и радиационные ошибки. Ультразвуковые методы в значительной степени свободны от этих недостатков, что особенно ценно для определения различных статистических и турбулентных характеристик метеорологических полей атмосферы.

Первоначально локальный акустический метод был предложен только для целей измерений температуры воздуха. Первое описание термометра, реализующего этот метод, было дано Барретом и Суоми в 1949 г. [1]. В СССР аналогичный прибор впервые описан Н.П. Фатеевым в 1955 г. [2]. Однако из-за ряда недостатков в их конструкции в дальнейшем эти акустические термометры широкого распространения не получили.

Новый качественный скачок в применении ультразвуковых методов для исследований атмосферы произошел в 60-е годы. В этот период их начали использовать для определения не только температуры воздуха, но и различных компонент вектора скорости ветра [3–5]. Более того, в связи с интенсивными экспериментальными исследованиями в этот период атмосферной турбулентности ультразвуковые методы стали применяться для оценивания различных характеристик турбулентных пульсаций этих же метеопараметров [6–13]. Интенсивное развитие в последние примерно 15 лет цифровых интегральных микросхем и появление современных персональных компьютеров привело к разработке качественно новых ультразвуковых измерителей, обладающих существенно лучшими техническими характеристиками (см., например, [14–19]). Данные устройства позволяют длительное время, практически без участия оператора, определять мгновенные значения температуры воздуха и трех ортогональных компонент скорости ветра с постоянной времени порядка  $10^{-3}$  с и чувствительностью, равной примерно 0,01–0,02 (°С или м/с). Эти данные обычно снимаются через интервалы в 0,1 с или больше и сохраняются на жестком диске компьютера в виде длин-

ных временных рядов для каждой из измеряемых метеорологической величин. Используя специальное программное обеспечение для обработки этих рядов, можно получить чрезвычайно многообразную информацию о состоянии приземного слоя атмосферы. Ниже кратко описываются основные алгоритмы и методики, которые применяются нами при получении и обработке данных ультразвуковой метеостанции БМК-01 [18, 19].

**Алгоритмы и методика измерений**

Методика определения метеорологических величин в ультразвуковых системах основана на зависимости групповой скорости звука от температуры воздуха и скорости ветра [20]:

$$\mathbf{U} = c \mathbf{n} + \mathbf{v}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{U}$  – вектор групповой скорости звука;  $\mathbf{n}$  – нормаль к фазовому фронту волны;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости ветра;  $c$  – скорость распространения звука в неподвижном воздухе. Известно [21], что формула для скорости звука в воздухе  $c$  выводится из линеаризованных уравнений гидродинамики. При этом для идеального в термодинамическом смысле газа получается выражение

$$c = \sqrt{\frac{\chi R}{\mu} T_k}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где  $\chi = c_p/c_v$  – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\mu$  – молекулярный вес газа;  $T_k$  – температура, К. Для сухого воздуха в нормальных условиях  $\chi = 1,402$ ,  $\mu = 28,96$ ,  $R = 8,315 \cdot 10^7$  эрг/град и, следовательно, вместо (2) можно использовать формулу

$$c = 20,067 \sqrt{T_k}, \text{ м/с}.$$

Поправки Ван-дер-Ваальса, применяемые для реальных газов, сказываются в (2) пренебрежимо мало, по крайней мере вне области частот звуковых колебаний, на

которых наблюдается максимум молекулярного поглощения и дисперсии звука. Молекулярный вес воздуха остается практически неизменным до высот порядка 100 км. Величина  $\chi = c_p/c_v$  изменяется в зависимости от температуры воздуха в диапазоне ее реальных значений в атмосфере только в четвертой значащей цифре. Поэтому формула (2) позволяет чрезвычайно точно оценивать температуру воздуха из  $c$ , если дополнительно учитывать в ней зависимость  $c$  от отношения упругости водяного пара к атмосферному давлению  $e/p_a$ , используя соотношение [14]:

$$c = 20,067 \sqrt{T_b}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где  $T_b = T_k(1 + 0,3192 e/p_a)$  – виртуальная акустическая температура. Величина  $e$  может быть оценена здесь из значения относительной влажности воздуха  $E$  с учетом равенства  $e = 6,107 m^{-2} E$ , где  $m = 7,665 T/(243,33 + T)$ ,  $T$  – температура воздуха, °С.

В ультразвуковых системах измеряют времена  $t_i$  прохождения акустического сигнала между парами ультразвуковых преобразователей (датчиков), размещенных на известные расстояния  $S_i$  (от 15 до 30 см) вдоль выбранных направлений  $i$ . При этом с помощью соотношения  $U_i = S_i/t_i$  фактически оцениваются значения модуля групповой скорости  $U_i = \{c^2 + 2c \mathbf{v} \mathbf{n}_i + v^2\}^{1/2}$ . Поскольку вектор скорости ветра  $\mathbf{v}$  характеризуется значениями его трех ортогональных компонент  $v_x$ ,  $v_y$  и  $v_z$ , то для алгоритмического выделения вкладов ветра и температуры в получаемые значения  $U_i$  необходимо иметь минимум четыре канала распространения ультразвука в воздухе, отличающихся по ориентации в пространстве.

Введем единичный вектор  $\mathbf{q}_i = U_i/U_i$ , описывающий направление распространения энергии звуковой волны в  $i$ -м канале ультразвуковой системы. Данный вектор связан с нормалью  $\mathbf{n}_i$  к фазовому фронту волны соотношением [22]:

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{q}_i \left( \sqrt{1 + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_i/c)^2} - (v/c)^2 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_i/c \right) - \mathbf{v}/c. \quad (4)$$

Умножая скалярно левую и правую части равенства (1) на  $\mathbf{q}_i$  и учитывая (4), имеем

$$U_i = c \sqrt{1 + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_i/c)^2} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_i. \quad (5)$$

Для вывода алгоритмов вычисления метеорологических параметров выражение (5) можно упростить, разлагая его правую часть в ряд по малому параметру  $v/c \ll 1$ . При этом для групповой скорости звука в  $i$ -м канале получается

$$U_i = c + \mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_i + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_{i\perp})^2/(2c) + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_{i\perp})^4/(8c^3) + \dots, \quad (6)$$

где  $\mathbf{q}_{i\perp}$  – единичный вектор, поперечный к  $\mathbf{q}_i$ . Если оставить в (4) только первые два члена (линейное приближение), то вклад составляющей скорости ветра, поперечной к направлению распространения сигнала, не будет учтен. Численные оценки показывают, что это допустимо делать только в случае слабого ветра  $v \leq 10$  м/с. Поэтому алгоритмы измерений, применяемые в ультразвуковых системах, должны также учитывать квадратичные члены в (6). Конкретный вид алгоритмов определяется геометрической схемой пространственного расположения датчиков. Рассмотрим их на примере метеостанции БМК-01 [18, 19].

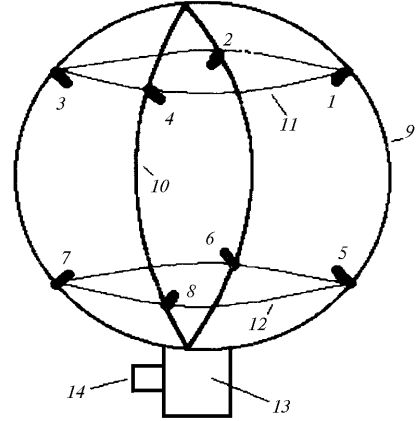


Рис. 1. Общий вид измерительной системы ультразвуковой метеостанции БМК-01, где 1–8 – пьезокерамические датчики; 9–10 – трубчатые кольца; 11–12 – сплошные кольца; 13 – узел крепления к метеомачте; 14 – разъем для подключения электронного модуля

В БМК-01 ультразвуковая система представляет собой сферу из двух ортогональных трубчатых колец диаметром 277 мм (рис. 1), на которых крепятся ультразвуковые пьезо-керамические датчики. Датчики размещены таким образом, что совпадают с вершинами параллелепипеда, основание которого лежит в горизонтальной плоскости и имеет форму квадрата. Датчики, обозначенные цифрами 2, 4, 5 и 7, используются для излучения акустических сигналов, а датчики 1, 3, 6 и 8 – для их приема. Пространственная ориентация каналов распространения звука описывается системой уравнений для единичных векторов  $\mathbf{q}_i$  (в скобках указаны номера соответствующих излучающего и принимающего датчиков):

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1 &= \mathbf{i} \sin \alpha + \mathbf{k} \cos \alpha, \quad (7 \rightarrow 1 \text{ – для канала № 1}), \\ \mathbf{q}_2 &= -\mathbf{i} \sin \alpha + \mathbf{k} \cos \alpha, \quad (5 \rightarrow 3 \text{ – для канала № 2}), \\ \mathbf{q}_3 &= \mathbf{j} \sin \alpha - \mathbf{k} \cos \alpha, \quad (4 \rightarrow 6 \text{ – для канала № 3}), \\ \mathbf{q}_4 &= -\mathbf{j} \sin \alpha - \mathbf{k} \cos \alpha, \quad (2 \rightarrow 8 \text{ – для канала № 4}), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{k}$  – орты декартовой системы координат;  $\alpha = 45^\circ$ . При измерениях метеорологических величин в БМК-01 вначале производится оценка их значений в линейном приближении по формулам:

$$\begin{aligned} \hat{v}_x &= \sqrt{2} (U_1 - U_2), \quad \hat{v}_y = \sqrt{2} (U_3 - U_4), \\ \hat{v}_z &= 2 (U_1 + U_2 - U_3 - U_4), \\ \hat{c} &= (U_1 + U_2 + U_3 + U_4)/4, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $U_1 = S_1/t_1$ ;  $U_2 = S_2/t_2$ ;  $U_3 = S_3/t_3$ ;  $U_4 = S_4/t_4$  – значения групповой скорости звука для 4 каналов ультразвуковой системы. Символ « $\hat{\phantom{x}}$ » указывает, что значение данной величины определено только в линейном приближении. После этого, используя линейные оценки, вычисляются поправки второго приближения по формулам:

$$\begin{aligned} \delta v_x &= \sqrt{2} \hat{v}_x \hat{v}_z / (2 \hat{c}), \\ \delta v_y &= -\sqrt{2} \hat{v}_y \hat{v}_z / (2 \hat{c}), \\ \delta v_z &= \begin{pmatrix} -2 & -2 \\ v_x - v_y \end{pmatrix} / (4\sqrt{2} \hat{c}), \\ \delta c &= - \left[ 3 \begin{pmatrix} -2 & -2 \\ v_x + v_y \end{pmatrix} + v_z \right] / (8 \hat{c}). \end{aligned} \quad (9)$$

При этом истинными значениями считаются величины  $v_x = \hat{v}_x + \delta v_x$ ,  $v_y = \hat{v}_y + \delta v_y$ ,  $v_z = \hat{v}_z + \delta v_z$  и  $c = \hat{c} + \delta c$ , а температура воздуха вычисляется из  $c$  с использованием (3).

Для учета влажности воздуха и атмосферного давления в (3) используются показания промышленных метеорологических датчиков с электрическим выходом, дополнительно подключаемых к ультразвуковой системе. Кроме этих датчиков, в БМК-01 предусмотрено подключение еще одной пары датчиков, измеряющих углы наклона метеомачты в двух ортогональных плоскостях. Их показания учитываются при расчете ортогональных компонент скорости ветра  $v_x, v_y, v_z$ . Также выполняются автоматический учет температурного расширения конструкции измерительной системы (изменения расстояний  $S_i$  с ростом температуры) и учет затенения габаритами пьезокерамических датчиков для ветрового потока воздуха [23, 24].

В метеостанции БМК-01 компоненты  $v_x, v_y, v_z$  вычисляются из разностей средних (интегральных) значений групповой скорости звука вдоль путей, ориентированных под углом друг к другу и большей частью не совпадающих в пространстве (см. (8) и рис. 1). Это может привести к методическим ошибкам оценивания турбулентных пульсаций проекций ветра на направления декартовых осей  $x, y, z$ , если в атмосфере наблюдаются заметные нарушения изотропности поля скорости ветра для пространственных масштабов, сравнимых с расстояниями между ультразвуковыми датчиками. В аналогичных метеостанциях, описанных в [14–17], применяется переизлучение сигналов в обратном направлении вдоль каждого из трех путей их распространения, ориентированных непосредственно вдоль осей  $x, y, z$ . Такая методика измерений может уменьшить указанные выше ошибки. Однако она не устраняет аналогичные ошибки, обусловленные анизотропностью метеорологических полей, для турбулент-

ных пульсаций других компонент скорости ветра, обычно вычисляемых из мгновенных значений  $v_x, v_y, v_z$  при определении ряда параметров атмосферной турбулентности (см. ниже).

### Статистические данные

Статистическая обработка временных рядов мгновенных значений  $v_x, v_y, v_z$  и  $T$ , измеряемых ультразвуковой системой, включает следующие этапы. Вначале вычисляются средние значения всех измеряемых метеовеличин, а также модуля и углов направления как полного вектора скорости ветра  $v$ , так и его горизонтальной компоненты ( $v_h$  и  $\varphi$ ). Второй этап заключается в расчете из мгновенных значений  $v_x, v_y, v_z$  и  $T$  временных рядов турбулентных пульсаций температуры  $T'$  и компонент скорости ветра (вертикальных  $w'$ , продольных  $u'$  и поперечных  $v'$  относительно направления среднего вектора горизонтального ветра  $v_h$ , продольных  $v'_\parallel$  и поперечных  $v'_\perp$  относительно полного вектора среднего ветра  $v$ ). На следующем этапе, используя стандартные формулы теории вероятностей (см., например, [25]), вычисляются различные числовые характеристики всех перечисленных случайных величин. При этом наиболее часто вычисляют их среднеквадратические отклонения, коэффициенты корреляции, асимметрии и эксцесса. Последний этап включает расчет различных статистических функций турбулентных пульсаций метеовеличин: автокорреляции и взаимной корреляции, распределений плотности вероятности (гистограмм), структурных функций и энергетических спектров (рис. 2).

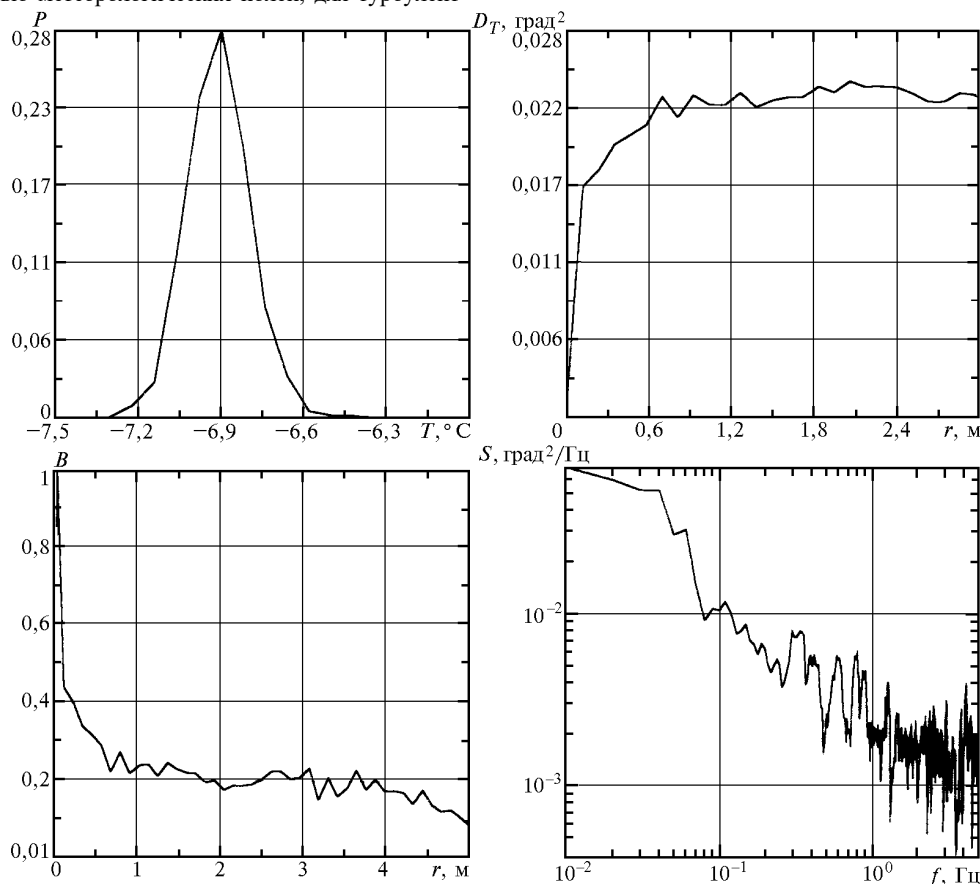


Рис. 2. Гистограмма ( $P$ ), структурная функция ( $D_T$ ), нормированная автокорреляционная функция ( $B$ ) и энергетический спектр ( $S$ ) турбулентных пульсаций температуры воздуха из данных ультразвуковой метеостанции БМК-01

Данные функции могут рассчитываться как во временном масштабе, так и в пространственном (используя гипотезу «замороженной» турбулентности).

### Оценивание параметров атмосферной турбулентности

К главному достоинству ультразвуковых метеостанций можно отнести то, что из их данных непосредственно вычисляются различные параметры температурной и ветровой турбулентности для приземного слоя атмосферы. Указанные вычисления производятся по хорошо известным формулам из теории атмосферной турбулентности (см., например, [26–30]). В частности, в БМК-01 определяются следующие параметры ( $\langle \dots \rangle$  – символ статистического усреднения):

$E_{\Pi} = \sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2$  – полная энергия турбулентных движений ( $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$  – дисперсии);

$\tau = \langle u' w' \rangle$  – поток импульса (касательное напряжение);

$H = \langle u' T \rangle$  – поток тепла (поток температуры);

$v^* = \sqrt{-\tau}$  – скорость трения (масштаб ветра);

$T^* = -H/v^*$  – масштаб температуры;

$L^* = \langle T \rangle (v^*)^2 / (\chi g T^*)$  – масштаб Монина–Обухова ( $\chi = 0,4$  и  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>);

$C_d = (v^* / \langle v \rangle)^2$  – коэффициент сопротивления потоку;

$C_T^2 = \langle [T(t + \Delta t) - T(t)]^2 \rangle / (\langle |v| \rangle \Delta t)^{-2/3}$  – структурная постоянная температурных флуктуаций ( $\Delta t$  – временной интервал между измерениями мгновенных метеовеличин);

$C_v^2 = \langle [v_{||}(t + \Delta t) - v_{||}(t)]^2 \rangle / (\langle |v| \rangle \Delta t)^{-2/3}$  – структурная постоянная ветровых флуктуаций;

$C_n^2 = C_T^2 / (2 \langle T \rangle)^2 + C_v^2 / c^2$  – структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления ( $c$  – скорость звука из (3)).

Перечисленных параметров достаточно для оценивания динамического режима турбулентности в приземном слое атмосферы, в том числе для определения класса устойчивости атмосферной стратификации. Применяя теорию подобия Монина–Обухова, можно выполнять прогностические оценки значений следующей группы параметров (здесь  $\varphi_v$  и  $\varphi_T$  – универсальные функции подобия от безразмерной высоты  $\xi = z/L^*$  для ветровой и температурной стратификации соответственно):

$H_{\text{пр}}$  – высоты верхней границы приземного слоя атмосферы;

$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{v^*}{\chi z} \varphi_v \left( \frac{z_m}{L^*} \right)$  – локального градиента скорости ветра на высоте измерений  $z_m$ ;

$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{T^*}{\chi z} \varphi_T \left( \frac{z_m}{L^*} \right)$  – локального градиента потенциальной температуры на высоте  $z_m$ ;

$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial z} - 0,0098$  – локального градиента температуры на высоте  $z_m$ ;

$K_m = (v^*)^2 / (\partial u / \partial z)$  – коэффициента турбулентного обмена количества движения;

$K_h = v^* T^* / (\partial \theta / \partial z)$  – коэффициента турбулентного обмена тепла;

$L_0 = (K_m / (\partial u / \partial z))^{1/2}$  – внешнего масштаба турбулентности;

$\varepsilon = K_m (\partial u / \partial z)^2 - (g / \langle T \rangle) K_h (\partial \theta / \partial z)$  – скорости диссипации энергии ветровых флуктуаций;

$N = K_h (\partial \theta / \partial z)^2$  – скорости диссипации энергии температурных флуктуаций;

$Ri = (g / \langle T \rangle) (\partial \theta / \partial z) (\partial u / \partial z)$  – градиентного числа Ричардсона.

### Восстановление профилей атмосферных параметров

Универсальные функции подобия от безразмерного параметра  $\xi = z/L^*$  для приземного слоя атмосферы выглядят следующим образом [29]:

$$\varphi_v(\xi) = \begin{cases} 1 + 4,7\xi, & \xi > 0 \\ (1 - 15\xi)^{-1/4}, & \xi < 0 \end{cases}, \quad (10)$$

$$\varphi_T(\xi) = \begin{cases} 0,74 + 4,7\xi, & \xi > 0 \\ 0,74 (1 - 9\xi)^{-1/2}, & \xi < 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Случай  $\xi > 0$  (или  $L^* > 0$ ) здесь соответствует устойчивой температурной и ветровой стратификации в приземном слое атмосферы, а случай  $\xi < 0$  (или  $L^* < 0$ ) – неустойчивой. Высота приземного слоя атмосферы  $H_{\text{пр}}$ , до которой теоретически обосновано применение (10) и (11), в большинстве случаев не превышает нескольких десятков метров. Только в редких случаях, стратификация атмосферы близка к нейтральной,  $H_{\text{пр}}$  больше 100 м. Учитывая опытные данные, обычно полагают, что при устойчивой стратификации  $H_{\text{пр}}$  является величиной, сравнимой с  $L^*$  ( $H_{\text{пр}} \sim L^*$ ), а при неустойчивой стратификации –  $H_{\text{пр}} \sim 5|L^*|$ . Восстановление профилей атмосферных параметров из данных ультразвуковых метеостанций, полученных на одной фиксированной высоте  $z_m < H_{\text{пр}}$ , корректно производить только до высоты  $H_{\text{пр}}$ .

Учитывая формулы из теории атмосферной турбулентности, приведенные выше, нетрудно заметить: функции подобия (10) и (11) позволяют непосредственно рассчитывать высотные профили коэффициентов турбулентного обмена тепла  $K_h$  и количества движения  $K_m$ , скоростей диссипации энергии температурных  $N$  и ветровых  $\varepsilon$  флуктуаций, внешнего масштаба турбулентности  $L_0$  и градиентного числа Ричардсона  $Ri$ . В то же время, чтобы восстановить профили температуры  $T(z)$  и скорости горизонтального ветра  $v_h(z)$  (в приземном слое полагается  $\varphi(z) = \text{const}$ ), необходимо выполнить интегрирование по  $z$  функций:

$$\frac{\partial T(z)}{\partial z} = \frac{T^*}{\chi z} \varphi_T \left( \frac{z_m}{L^*} \right) + \gamma_a, \quad (12)$$

$$\frac{\partial v_h(z)}{\partial z} = \frac{v^*}{\chi z} \varphi_v \left( \frac{z_m}{L^*} \right), \quad (13)$$

где  $\gamma_a = -0,0098$  К/м – сухоадиабатический градиент температуры. Интегрирование (12) и (13) выполняется аналитически с учетом граничных условий (значений  $T$  и  $v_h$  на поверхности или в точке измерений). Полученные при этом соотношения используются для прямых расчетов профилей  $T(z)$  и  $v_h(z)$ . В БМК-01 имеется возможность восстанавливать профили всех перечисленных выше параметров, а также профили  $C_T^2(z)$  и  $C_v^2(z)$ . В последнем случае для привязки по абсолютным значениям используются значения  $C_T^2$  и  $C_v^2$ , измеренные на высоте

$z_m$ , а их изменения с высотой определяются из взаимосвязи  $C_T^2$  с  $N$  и  $C_v^2$  с  $\epsilon$ . На рис. 3 приведен пример восстановления профилей  $T(z)$ ,  $v_h(z)$ ,  $C_T^2$  и  $C_v^2$  из реальных дан-

ных ультразвуковой метеостанции для случая устойчивой стратификации.

Рассмотренные выше алгоритмы были полностью реализованы в Windows-приложении «МЕТЕО 2.0».

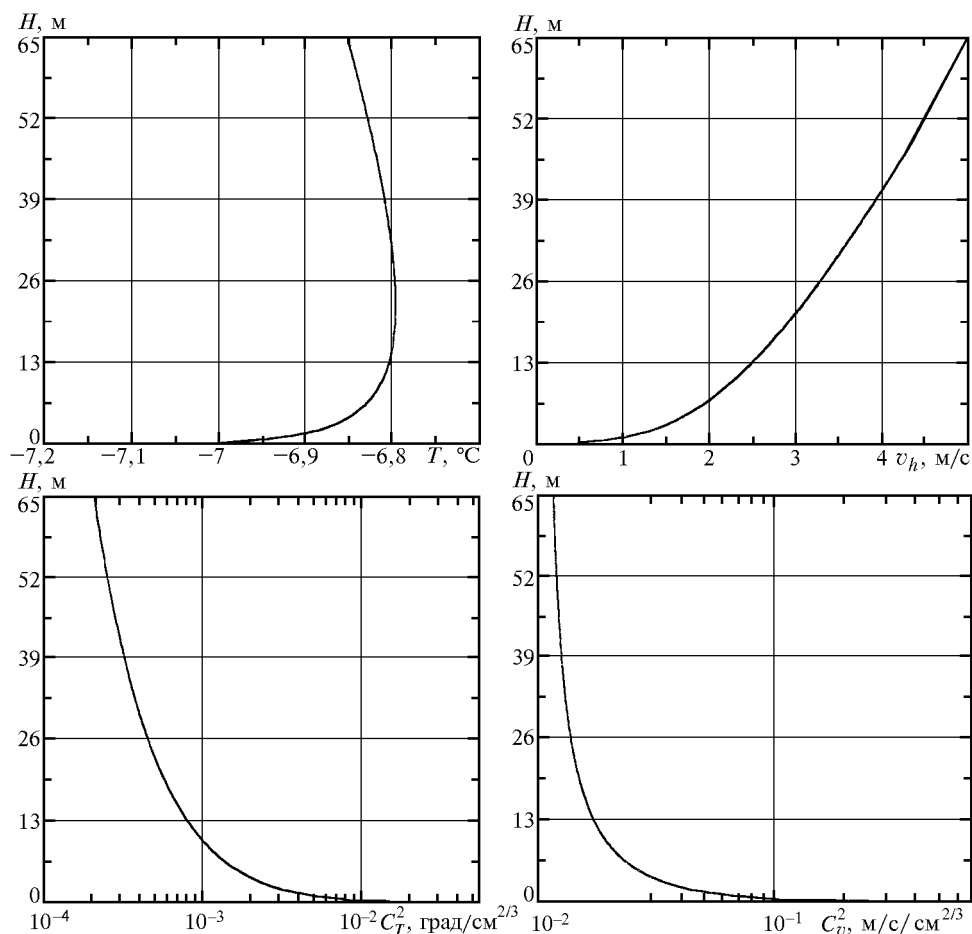


Рис. 3. Восстановленные профили температуры воздуха ( $T$ ), скорости горизонтального ветра ( $v_h$ ), структурных постоянных флуктуаций температуры ( $C_T^2$ ) и ветра ( $C_v^2$ ) из данных ультразвуковой метеостанции БМК-01 в случае устойчивой стратификации в приземном слое атмосферы ( $L^* = +65,2$  м)

Работа выполнена при поддержке РФФИ, код проекта № 98-05-03177.

1. Barret W., Suomi E. // J. Meteorol. 1949. V. 6. N 4.
2. Фатеев Н.П. // Труды ГГО. 1955. Вып. 52. С. 114.
3. Бовшверов В.М., Воронов В.П. // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. № 6. С. 882.
4. Мордохович М.И., Бовшверов В.М. // Вестник АН СССР. 1961. № 9.
5. Мордохович М.И. // Труды ИФА АН. 1962. № 4. С. 30–80.
6. Гурвич А.С. // Акустич. ж. 1959. Т. 5. Вып. 3. С. 368.
7. Бовшверов В.М., Гурвич А.С., Мордохович М.И., Цванг Л.Р. // Труды ИФА АН СССР. 1962. № 4. С. 21.
8. Kaimal J.C., Businger J.A. // J. Appl. Meteorol. 1963. V. 2. № 2. P. 156–164.
9. Mitsuta Y. // J. Meteorol. Soc. Japan. 1966. V. 44. № 1. P. 12–23.
10. Kaimal J.C., Wyngard J.C., Haugen D.A. // J. Appl. Meteorol. 1968. V. 5. № 10. P. 827–837.
11. Kaimal J.C. // Radio Sci. 1969. V. 4. P. 1147–1153.
12. Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Суконкина В.М., Хацко В.В., Янков А.П. // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 3. С. 240–241.

13. Антошкин Л.В., Лукин В.П. // 3-й Болгаро-Советский семинар «Лазерные и радиометоды контроля окружающей среды» (Тезисы докл.). 1990. С. 383–388.
14. Hanafusa T., Fujitani T., Koboi Y., Mitsuta Y. // Pap. Meteorol. Geophys. 1982. V. 33. P. 1–19.
15. Анисимов М.В., Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 4. С. 196–199.
16. Fairall C.W., Edson J.B., Larsen S.E., Mestayer P.G. // J. Atmosph. and Oceanic Technology. 1990. V. 7. N 6. P. 425–453.
17. Патрушев Г.Я., Ростов А.П., Иванов А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 11–12. С. 1636–1638.
18. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Бурков В.В. и др. // 3-й Межреспубл. симп. «Оптика атмосферы и океана» (Тезисы докл.). Томск: ИОА СО РАН, 1996. С. 160.
19. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // 3-й Межреспубл. симп. «Оптика атмосферы и океана» (Тезисы докл.). Томск: ИОА СО РАН, 1996. С. 167.
20. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М: Наука, 1981. 206 с.
21. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М: Гостехтеоретиздат, 1954. 795 с.

22. *Остаев В.Е.* Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 206 с.
23. *Wyngard J.C., Zhang S.F.* // J. Atmosph. and Oceanic Technology. 1985. V. 2. N 12. P. 548–558.
24. *Zhang S.F., Wyngard J.C., Businger J.A., Oncley J.C.* // J. Atmosph. and Oceanic Technology. 1986. V. 3. N 12. P. 315–323.
25. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
26. *Обухов А.М.* Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 413 с.
27. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 263 с.
28. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
29. *Браун Р.А.* Аналитические методы моделирования планетарного пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 150 с.
30. *Атмосфера: Справочник.* Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.

*A.Ya. Bogushevich.* **The Estimation Ultrasonic Methods of the Meteorological and Turbulence Parameters of the Atmosphere.**

The information possibilities of the ultrasonic systems for measurements of the meteorological and turbulence parameters in the surface layer of the atmosphere are described. The algorithms and technique for the measured data processing are presented which have been successfully in the sonic anemometer–thermometer «ВМК-01».