

И.Н. Смалихо, В.А. Банах, Ф. Копп, Х. Вернер

Лидарные измерения среднего ветра

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия
Институт физики атмосферы Немецкого авиакосмического центра, Оберпфaffenхофен, Германия*

Поступила в редакцию 19.02.2002 г.

Теоретически и экспериментально исследуется репрезентативность лидарных измерений ветра в пограничном слое атмосферы. Анализируется погрешность измерений среднего ветра в зависимости от температурной стратификации воздуха и шероховатости подстилающей поверхности. Проводится сравнение точности определения средней скорости из лидарных данных, получаемых при коническом сканировании лазерным пучком вокруг вертикальной оси и при трехугольной схеме измерений.

Введение

В настоящее время наряду с радарами [10] все более широкое применение в исследованиях динамики атмосферы находят лидары.

Доплеровский лидар измеряет так называемую радиальную компоненту скорости ветра вдоль линии визирования лазера. Чтобы определить трехмерный вектор скорости ветра из радиальной скорости, измерения осуществляются под разными углами либо используют сканирование лазерным пучком вокруг вертикальной оси [5, 9]. Схема измерений показана на рис. 1.

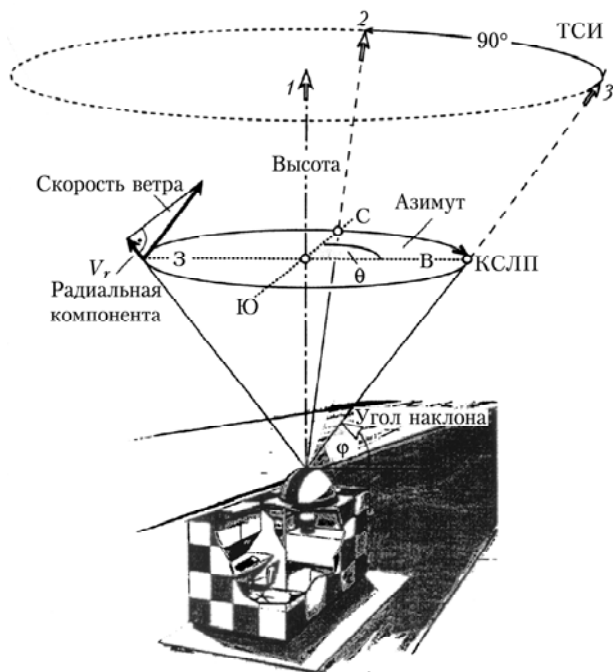


Рис. 1. Схема доплеровского лидара

Наземный лидар, оснащенный сканером, в принципе позволяет измерять скорость и направление ветра во всей тропосфере. Необходимым предположением при этом является однородность ветра в объеме зондирования. Основным источником статистической неопределенности изме-

рений среднего ветра с помощью лидаров является турбулентность атмосферы, что обязательно должно приниматься во внимание при анализе экспериментальных результатов. Данная статья посвящена рассмотрению проблемы репрезентативности лидарных измерений ветра в пограничном слое атмосферы.

1. Доплеровский лидар

В лидарах генерируемое одночастотным импульсным или непрерывным лазером излучение на частоте f_0 направляется через оптическую систему в исследуемую область атмосферы. Временной контур импульса имеет либо гауссову (для твердотельного лазера), либо пиковую форму (для CO_2 -лазера). Для лазерной системы с непрерывным источником излучения, называемой еще доплеровским анемометром, зондируемый объем формируется областью максимальной фокусировки лазерного пучка на заданном расстоянии. Часть излучения рассеивается в обратном направлении аэрозольными частицами, которые движутся со скоростью доминирующего ветра через зондируемый объем (область фокусировки лазерного излучения [9]).

Компонента ветра вдоль линии визирования (ЛВ) лазерного источника называется радиальной скоростью V_r ; она обеспечивает доплеровский сдвиг частоты Δf_D , определяемый по формуле

$$\Delta f_D = 2 \frac{V_r}{c} f_0,$$

где c – скорость света; $f_0 = c/\lambda$. На длине волны CO_2 -лазера $\lambda \approx 10,6$ мкм скорость ветра 1 м/с вызывает доплеровский сдвиг $\Delta f_D = 189$ кГц.

Осуществляя измерения под азимутальным углом θ и углом наклона ϕ , находят радиальную скорость V_r , которая зависит от компонент вектора скорости ветра u , v и w следующим образом:

$$V_r = u \sin \theta \cos \phi + v \cos \theta \cos \phi + w \sin \phi.$$

Частотный сдвиг измеряется в рассеянном назад сигнале, принимаемом с использованием того же оптического тракта, что и при формировании зондирующего сигнала. С помощью поляризационной пластины рассеянное излучение отделяется от зондирующего. На детекторе рассеянное из-

лучение смешивается с излучением гетеродинного лазера. При помощи синхронизирующей обратной связи частота гетеродинного лазера и частота лазера, генерирующего зондирующее излучение, удерживаются в пределах выбранной полосы.

1.1. Коническое сканирование лазерным пучком (КСЛП)

Чтобы определить величину и направление горизонтального ветра из измерений радиальной компоненты скорости, требуется определенная форма сканирования по азимуту и в вертикальном направлении [5]. В [13] было показано, что средняя скорость и направление горизонтального ветра могут быть найдены на основе данных о радиальной скорости, измеренной на окружности образующей поверхности конуса с центром на вертикальной оси и вершиной в точке расположения сканера (см. рис. 1). Такой тип сканирования называется коническим. В идеальном случае однородной атмосферы измеренные при коническом сканировании значения радиальной скорости подчиняются синусоидальной зависимости от азимутального угла (рис. 2). В случае турбулентной атмосферы происходят случайные отклонения измеренных значений от синусоидальной зависимости. Экспериментальное исследование репрезентативности ветровых значений, найденных из сканирования по неполной окружности, принималось в [5].

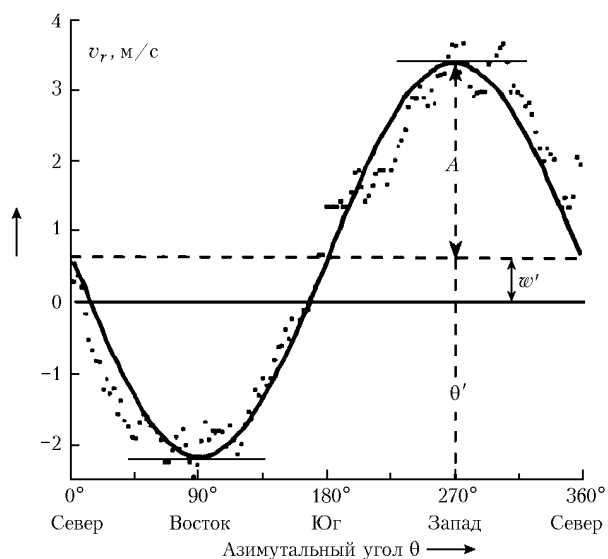


Рис. 2. Пример подгонки радиальной скорости ветра, полученной в результате численного моделирования для методики КСЛП, к синусоидальной зависимости

Из метеорологического определения ветра (скорости и направления) мы имеем

$$V_r = -u \sin \theta \cos \varphi - v \cos \theta \cos \varphi - w \sin \varphi, \quad (1)$$

где u – компонента вектора скорости ветра в направлении с запада на восток; v – компонента ветра в направлении с юга на север; w – вертикальная компонента ветра; θ – азимутальный угол (отсчитываемый в направлении по часовой стрелке от севера); φ – угол наклона (см. рис. 1).

Измеренные при коническом сканировании значения радиальной скорости аппроксимируются методом наи-

меньших квадратов синусоидальной кривой, в результате которой определяются параметры: сдвиг w' , амплитуда A и фаза θ' . Откуда находят:

- направление ветра θ' (см. рис. 2),
- скорость горизонтального ветра

$$v_{\text{hor}} = \frac{A}{\cos \varphi} = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (2)$$

- скорость вертикального ветра

$$w = -w' / \sin \varphi, \quad (3)$$

- компоненты горизонтального ветра

$$u = \frac{A}{\cos \varphi} \sin \theta; \quad (4)$$

$$v = \frac{A}{\cos \varphi} \cos \theta. \quad (5)$$

1.2. Треугольная схема измерений

Треугольная схема измерений (ТСИ) позволяет определять компоненты скорости ветра из измерений радиальной скорости лишь в трех направлениях (см. рис. 1). Будем полагать, что луч 1 направлен вертикально вверх, луч 2 – на север и луч 3 – на восток. Тогда при условии, что $V_{r1} = w$, V_{r2} – компонента радиальной скорости в направлении с севера на юг, а V_{r3} – компонента радиальной скорости в направлении с востока на запад, справедливыми являются следующие соотношения:

$$u = \frac{V_{r2} - V_{r1} \sin \varphi}{\cos \varphi}; \quad (6)$$

$$v = \frac{V_{r3} - V_{r1} \sin \varphi}{\cos \varphi}. \quad (7)$$

2. Оценка влияния турбулентности на точность измерений

Уравнение (1) применимо, когда компоненты скорости u , v и w являются постоянными во времени и пространстве. Турбулентность атмосферы вызывает флуктуации измеряемой скорости, так что радиальная скорость V_r является случайной функцией расстояния R , направления (φ и θ) и времени t . Пространственное и временное усреднение скорости ветра, оцененной на основе измерений V_r , позволяет получить информацию о среднем ветре. При измерении непрерывным доплеровским лидаром в пограничном слое атмосферы турбулентные флуктуации V_r являются основным источником ошибок в определении среднего ветра.

В пограничном слое атмосферы статистические параметры ветровой турбулентности зависят в основном от высоты, геострофического ветра, термической стратификации и шероховатости подстилающей поверхности. В данной статье рассматривается репрезентативность измерений средней скорости ветра лазерным доплеровским анемометром (ЛДА) с использованием двух методик (КСЛП и ТСИ) в пограничном слое атмосферы при различных типах атмосферной термической стратификации и шероховатости земной поверхности. В статье дается ответ на вопрос: сколько необходимо сделать сканирований и какой должна быть продолжитель-

ность измерений для нахождения среднего ветра с требуемой точностью? Обычно средний ветер измеряется точечным датчиком с 10-минутным усреднением. Как показано на рис. 1, ЛДА осуществляет измерения с усреднением по большому пространственному объему. Следует ожидать в этом случае, что необходимое время измерения средней скорости с использованием ЛДА намного меньше 10 мин [1].

2.1. Теория

Вектор скорости ветра в атмосфере $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = \{V_z, V_x, V_y\} \equiv \{V_1, V_2, V_3\}$ является случайной функцией координат $\mathbf{r} = \{z, x, y\} \equiv \{r_1, r_2, r_3\}$ и времени t , где V_z, V_x и V_y – соответственно вертикальная, продольная и поперечная компоненты мгновенной скорости ветра. В дальнейшем предположим, что случайные флуктуации скорости ветра обусловлены только атмосферной турбулентностью, что турбулентное поле скорости статистически однородно и изотропно и что можно использовать гипотезу замороженной турбулентности

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{V}(\mathbf{r} + \langle \mathbf{V} \rangle t),$$

где $\langle \mathbf{V} \rangle = \{0, U, 0\}$, U – средняя скорость.

Пусть $\hat{\mathbf{V}} = \{\hat{V}_z, \hat{V}_x, \hat{V}_y\}$ – вектор скорости ветра, определенный на основе данных измерений. Для несмещенной оценки имеем $\langle \hat{\mathbf{V}} \rangle = \langle \mathbf{V} \rangle$ и $\langle \hat{V}_x \rangle = U$, а $E = [(\hat{V}_x - U)^2]^{1/2}$ и $\varepsilon = E/U$ – соответственно абсолютная и относительная ошибки измерения средней скорости ветра. Ниже будем использовать обозначения $\varepsilon_{т.д.}$, $\varepsilon_{к.с.}$, $\varepsilon_{т.с.}$ в качестве относительных и $E_{т.д.}$, $E_{к.с.}$, $E_{т.с.}$ в качестве абсолютных ошибок измерения скорости среднего ветра при помощи точечного датчика ($\varepsilon_{т.д.}$, $E_{т.д.}$), непрерывного доплеровского лидара с коническим сканированием ($\varepsilon_{к.с.}$, $E_{к.с.}$) и по трехугольной схеме ($\varepsilon_{т.с.}$, $E_{т.с.}$).

Для точечного датчика продольная компонента скорости ветра \hat{V}_x , усредненная по времени измерения T , определяется следующим образом:

$$\hat{V}_x = \frac{1}{T} \int_0^T dt V_x(0, Ut, 0). \quad (8)$$

Оценка (8) является несмещенной ($\langle \hat{V}_x \rangle = U$). Для среднеквадратичной ошибки $\varepsilon_{т.д.}^2$ имеем

$$\varepsilon_{т.д.}^2 = \frac{2}{U^2 T^2} \int_0^T d\tau (T - \tau) B_{22}(0, U\tau, 0), \quad (9)$$

где $B_{ik}(\mathbf{p}) = \langle V'_i(\mathbf{r} + \mathbf{p}) V'_k(\mathbf{r}) \rangle$ – корреляционный тензор скорости ветра, $V'_i = V_i - \langle V_i \rangle$.

В уравнении (9) воспользуемся кармановской моделью для продольной корреляционной функции флуктуаций скорости ветра [7]:

$$B_V(p) = \int_0^\infty d\kappa \Phi_V(\kappa) \cos(\kappa p), \quad (10)$$

где $\Phi_V(\kappa) = \frac{2}{\pi} \frac{\sigma_V^2 L_V}{(1 + 1,8 L_V^2 \kappa^2)^{5/6}}$ – спектр скорости; $\sigma_V^2 = \langle (V_x - U)^2 \rangle$ – дисперсия скорости; L_V – интегральный

масштаб корреляции скорости (внешний масштаб турбулентности); $p = |\mathbf{p}|$. В результате для $\varepsilon_{т.д.}^2$ получаем

$$\varepsilon_{т.д.}^2 = \frac{1}{U^2} \int_0^\infty d\kappa \Phi_V(\kappa) \sin^2\left(\frac{\kappa U T}{2}\right). \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что в предельном случае $T \ll L_V/U$ для относительной ошибки измерения средней скорости точечным датчиком имеем

$$\varepsilon_{т.д.}^2 = \int_0^\infty d\kappa \Phi_V(\kappa) / U^2 = \sigma_V^2 / U^2.$$

Для длинных периодов усреднения, таких, что $T \gg L_V/U$, находим

$$\varepsilon_{т.д.}^2 \approx (\pi \Phi_V(0) / U^2) / (UT) = (\sigma_V / U)^2 2L_V / (UT),$$

откуда следует, что для $T \gg L_V/U$ ошибка $\varepsilon_{т.д.}$ меньше, чем σ_V / U .

Оценка скорости ветра $V_D(\theta, t) \equiv V_r$, получаемая из измерений лидаром с источником непрерывного излучения в момент времени t под азимутальным углом θ , определяется выражением

$$V_D(\theta, t) = \int_0^\infty dz' Q_s(z') \mathbf{V}(z' \mathbf{S}(\theta) + \langle \mathbf{V} \rangle t) \mathbf{S}(\theta), \quad (12)$$

где

$$Q_s(z) = \{\pi k a_0^2 [(1 - z/R)^2 + (z/ka_0)^2]\}^{-1}$$

– функция, характеризующая пространственное разрешение; R – расстояние зондирования (фокусное расстояние); a_0 – начальный радиус пучка;

$$k = 2\pi/\lambda;$$

$$\mathbf{S}(\theta) = \{\sin \varphi, \cos \varphi \cos \theta, \cos \varphi \sin \theta\} \equiv \{S_1(\theta), S_2(\theta), S_3(\theta)\}.$$

Из уравнения (12) следует, что проводится пространственное усреднение флуктуаций скорости ветра вдоль оси пучка. Усредняемый объем расположен в окрестности точки $z' = R$ и при выполнении условия $R \ll 2\pi a_0^2 / \lambda$ имеет продольный размер $\Delta z = (\lambda/2) \times (R/a_0)^2$ [1].

При использовании методики КСЛП азимутальный угол θ является функцией времени: $\theta = \omega_0 t$, где ω_0 – скорость вращения лазерного пучка вокруг вертикальной оси конуса сканирования. Оценка вектора скорости ветра по методике КСЛП $\hat{\mathbf{V}} = \{\hat{V}_z, \hat{V}_x, \hat{V}_y\}$ определяется выражением [1]:

$$\hat{\mathbf{V}} = \frac{1}{T} \int_0^T dt V_D(\omega_0 t, t) \mathbf{F}(t), \quad (13)$$

где время усреднения $T = (2\pi/\omega_0)N$, N – число оборотов пучка, и

$$\mathbf{F}(t) = \left\{ \frac{1}{\sin \varphi}, \frac{2 \cos \omega_0 t}{\cos \varphi}, \frac{2 \sin \omega_0 t}{\cos \varphi} \right\}.$$

Уравнения (12) и (13) позволяют записать следующую формулу для среднеквадратической ошибки оценки скорости ветра по методике КСЛП:

$$\varepsilon_{\text{к.с.}}^2 = \frac{4}{U^2 T^2 \cos^2 \varphi} \int_0^T dt_1 dt_2 \cos \omega_0 t_1 \cos \omega_0 t_2 \times \int_0^\infty dz_1 dz_2 Q_s(z_1) Q_s(z_2) \sum_{i,k=1}^3 S_i(\omega_0 t_1) S_k(\omega_0 t_2) B_{ik}(\mathbf{p}), \quad (14)$$

где

$$\mathbf{p} = z_1 \mathbf{S}(\omega_0 t_1) - z_2 \mathbf{S}(\omega_0 t_2) + \langle \mathbf{V} \rangle (t_1 - t_2).$$

Когда используется ТСИ, вектор скорости ветра оценивается на основе следующего соотношения:

$$\hat{\mathbf{V}} = \frac{1}{T} \int_0^T dt \mathbf{V}_D(t) A, \quad (15)$$

где

$$\mathbf{V}_D(t) = \{V_D(\theta_1, t), V_D(\theta_2, t), V_D(\theta_3, t)\},$$

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – азимутальные углы; $A = \{A_{mn}\}$ – матрица с элементами:

$$A_{11} = a_{32}, A_{12} = a_{13}, A_{13} = a_{21}, A_{21} = b_{32}, A_{22} = b_{13},$$

$$A_{23} = b_{21}, A_{31} = c_{32}, A_{32} = c_{13}, A_{33} = c_{21},$$

$$a_{ik} = (D \sin \varphi)^{-1} \sin(\theta_i - \theta_k),$$

$$b_{ik} = -(D \cos \varphi)^{-1} (\sin \theta_i - \sin \theta_k),$$

$$c_{ik} = (D \cos \varphi)^{-1} (\cos \theta_i - \cos \theta_k),$$

$$D = \sin(\theta_3 - \theta_2) + \sin(\theta_1 - \theta_3) + \sin(\theta_2 - \theta_1).$$

Подставляя (12) в (15), для среднеквадратической ошибки оценки скорости ветра по методике ТСИ, получаем

$$\varepsilon_{\text{т.с.}}^2 = \frac{2}{U^2 T^2} \int_0^T d\tau (T - \tau) \iint_0^\infty dz_1 dz_2 Q_s(z_1) Q_s(z_2) \times$$

$$\times \sum_{i,k=1}^3 b'_i b'_k \sum_{l,m=1}^3 S_l(\theta_i) S_m(\theta_k) B_{lm}(\mathbf{p}), \quad (16)$$

где

$$b'_1 = b_{32}, b'_2 = b_{13}, b'_3 = b_{21};$$

$$\mathbf{p} = z_1 \mathbf{S}(\theta_i) - z_2 \mathbf{S}(\theta_k) + \langle \mathbf{V} \rangle \tau.$$

Корреляционный тензор $B_{ik}(\mathbf{p})$ в (14) и $B_{lm}(\mathbf{p})$ в (16) определяется в соответствии с предположением изотропной турбулентности как

$$B_{ik}(\mathbf{p}) = B_V(p) \delta_{ik} + \frac{1}{2} p \frac{dB_V(p)}{dp} \left(\delta_{ik} - \frac{p_i p_k}{p^2} \right), \quad (17)$$

где δ_{ik} – дельта-символ Кронекера, а $B_V(p)$ определяется кармановской моделью (10).

2.2. Расчеты

Чтобы рассчитать ошибки $\varepsilon_{\text{т.д.}}$, $\varepsilon_{\text{к.с.}}$ и $\varepsilon_{\text{т.с.}}$, необходимо знать параметры U , σ_V^2 и L_V как функции высоты h . Из теории пограничного слоя атмосферы следует, что в общем случае они определяются параметром шероховатости z_0 , скоростью геострофического ветра G , параметром Кориолиса f и вертикальным турбулентным потоком тепла H . Существует несколько моделей высотных зависимостей $U(h)$, $\sigma_V^2(h)$ и $L_V(h)$ [1–3, 6–8, 12]. Здесь использовались модели [1], для которых входным параметром является длина Монина–Обухова $L = -U_*^2 / (0,4g H / T_0 \rho_0 C_p)$, где U_* – скорость трения, g – ускорение свободного падения, C_p – теплоемкость воздуха, T_0 – средняя температура и ρ_0 – плотность воздуха. Скорость трения U_* как функция параметров z_0 , G и H рассчитывается с привлечением теории [12].

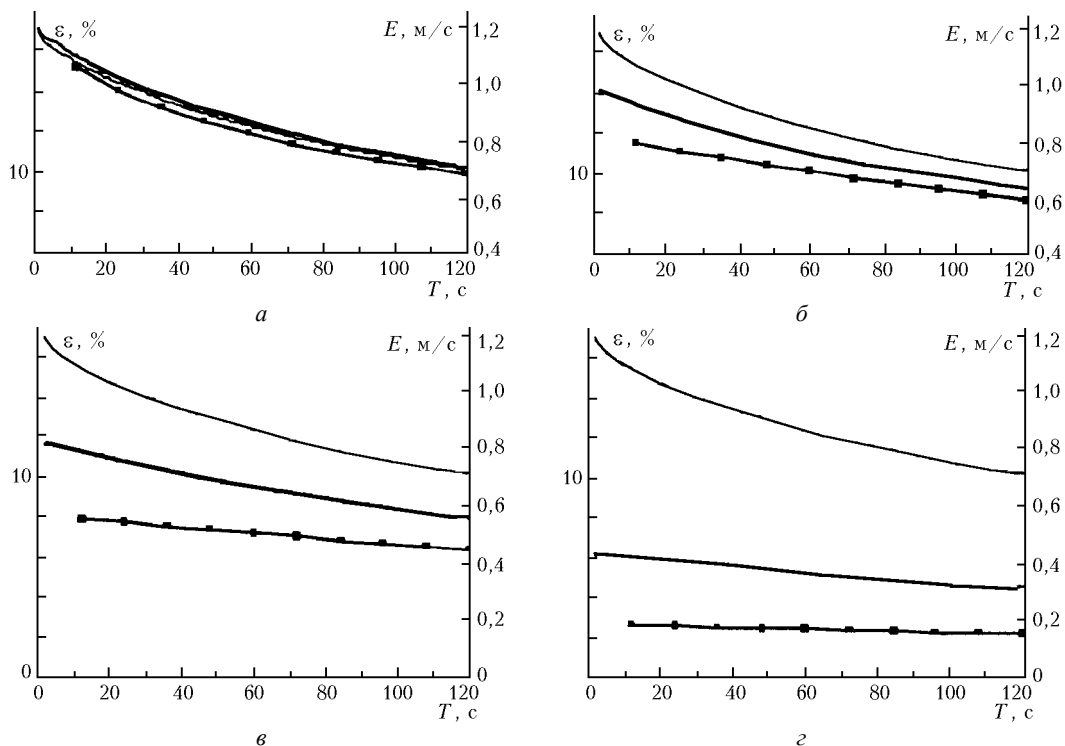


Рис. 3. Расчет временных зависимостей относительной и абсолютной ошибок определения средней скорости ветра: — $\varepsilon_{\text{т.д.}}$, $E_{\text{т.д.}}$; ■ — $\varepsilon_{\text{к.с.}}$, $E_{\text{к.с.}}$; — $\varepsilon_{\text{т.с.}}$, $E_{\text{т.с.}}$; $U = 7$ м/с, $\sigma_V = 1,2$ м/с, $L_V = 200$ м; $R = 70$ м, $\Delta z = 4,5$ м (а); $R = 150$ м, $\Delta z = 21$ м (б); $R = 300$ м, $\Delta z = 83$ м (в); $R = 1000$ м, $\Delta z = 920$ м (г); $h = 50$ м, $\varphi = \arcsin(h/R)$; $2\pi/\omega_0 = 12$ с

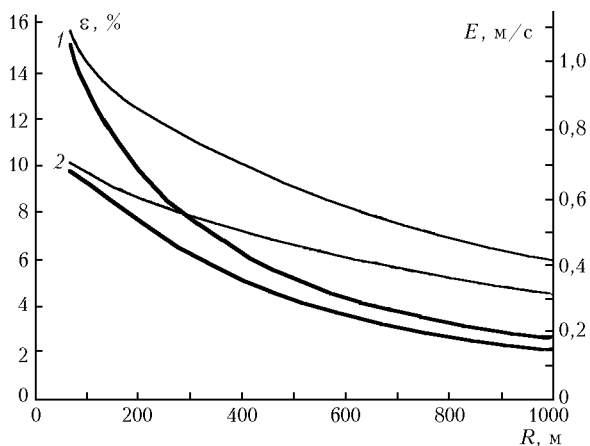


Рис. 4. Зависимость ошибок $\varepsilon_{к.с.}$, $E_{к.с.}$ — и $\varepsilon_{т.с.}$, $E_{т.с.}$ — от расстояния. Время измерений $T = 12$ с (1) и 120 с (2). Параметры h , U , σ_T , L_T и ω_0 те же, что и на рис. 3

На рис. 3 приведены результаты расчетов относительных ε ($\varepsilon_{т.д.}$, $\varepsilon_{к.с.}$ и $\varepsilon_{т.с.}$) и абсолютных E ($E_{т.д.}$, $E_{к.с.}$ и $E_{т.с.}$) ошибок определения средней скорости в зависимости от времени измерения T для высоты $h = 50$ м в приземном

слое атмосферы. Ошибки $\varepsilon_{к.с.}$, $E_{к.с.}$ и $\varepsilon_{т.с.}$, $E_{т.с.}$ рассчитаны для расстояний $R = 70$ м (а), 150 м (б), 300 м (в) и 1000 м (г). В расчетах $\varepsilon_{т.с.}$ и $E_{т.с.}$ мы задавали $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 120^\circ$ и $\theta_3 = 240^\circ$. Рис. 4 иллюстрирует зависимость от дальности зондирования относительных и абсолютных ошибок в методиках КСЛП и ТСИ. Из рис. 3 и 4 видно, что, благодаря пространственному усреднению флуктуаций скорости, точность измерений доплеровским лидаром выше, чем точность измерений с помощью точечного датчика. Методика КСЛП более точна, чем методика ТСИ, благодаря дополнительному пространственному усреднению по конусу сканирования.

Все расчеты ошибки определения средней скорости ветра для высот, превышающих 50 м, проводились для угла наклона 30° . На рис. 5 показаны высотные зависимости ошибок $\varepsilon_{т.д.}$, $E_{т.д.}$, $\varepsilon_{к.с.}$, $E_{к.с.}$ и $\varepsilon_{т.с.}$, $E_{т.с.}$, рассчитанных для различных типов температурной стратификации пограничного слоя атмосферы. Из рисунка видно, что в случае неустойчивой стратификации время усреднения 120 с недостаточно для получения $\varepsilon \leq 10\%$ с использованием точечного ветрового датчика. В то же время, чтобы получить точность $\varepsilon < 10\%$ с использованием методики КСЛП, достаточно одного сканирования, т.е. 12 с.

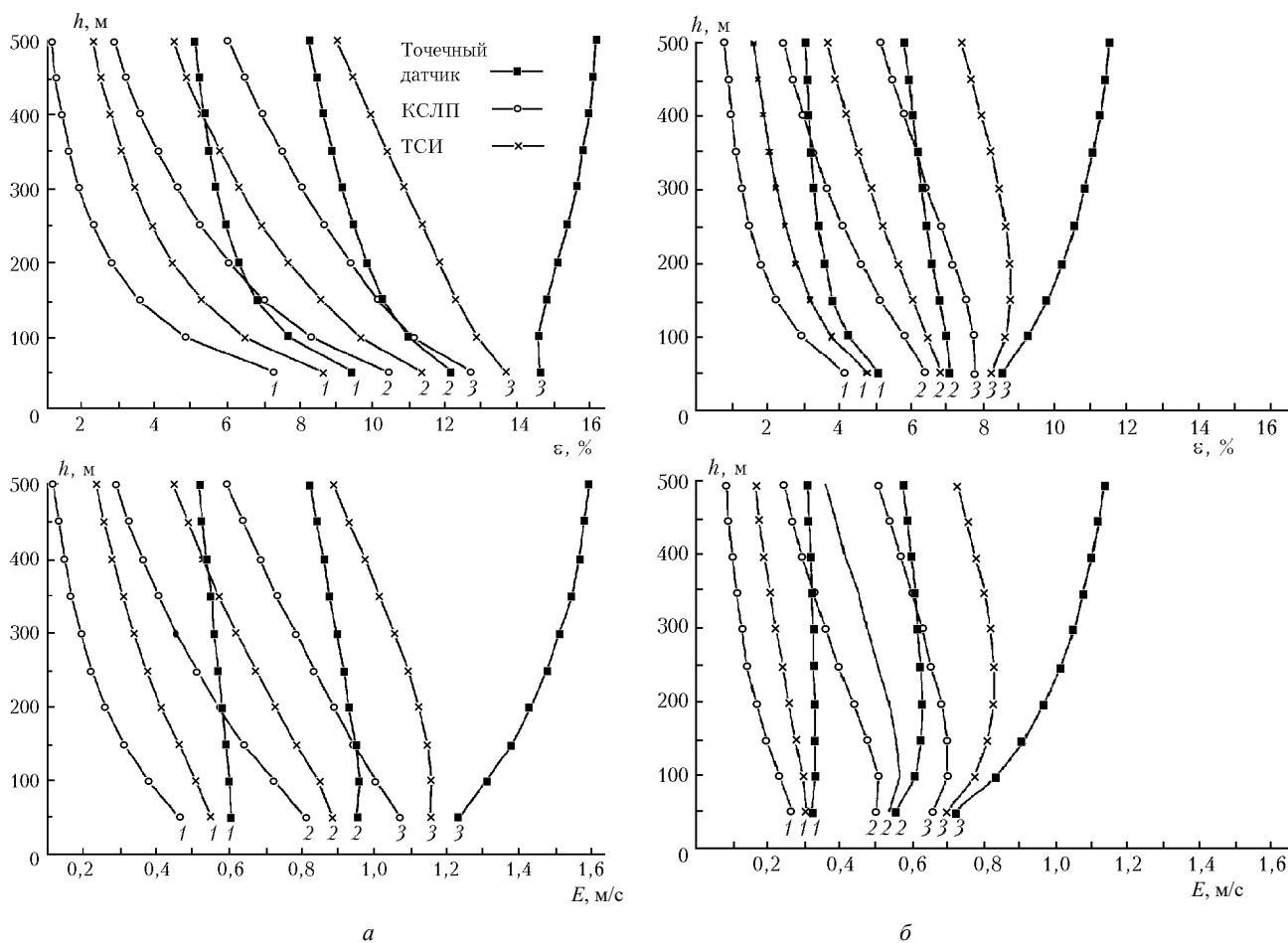


Рис. 5. Рассчитанные высотные зависимости относительных $\varepsilon_{т.д.}$, $\varepsilon_{к.с.}$, $\varepsilon_{т.с.}$ и абсолютных $E_{т.д.}$, $E_{к.с.}$, $E_{т.с.}$ ошибок измерения средней скорости для устойчивой (кривая 1, $H = -20$ Вт/м²), нейтральной (кривая 2, $H = 0$) и неустойчивой (кривая 3, $H = 200$ Вт/м²) стратификаций; $z_0 = 10$ см, $G = 10$ м/с, $\varphi = 30^\circ$, $2\pi/\omega_0 = 12$ с, $T = 12$ с (а), 120 с (б)

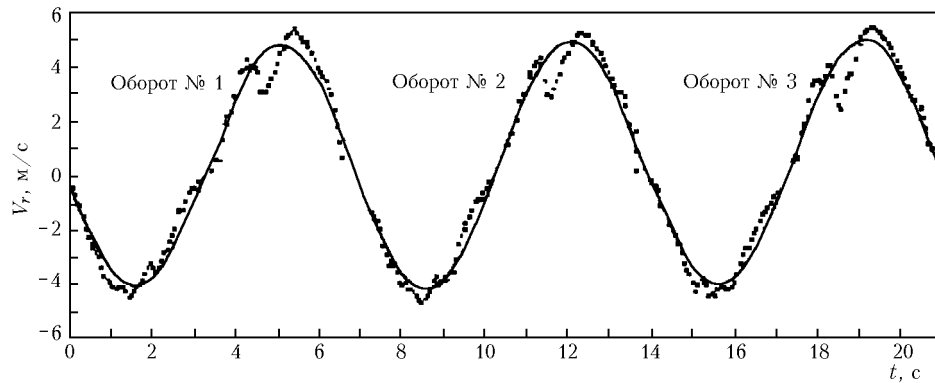


Рис. 6. Пример подгонки к синусоидальной зависимости (кривая) радиальной скорости ветра (значки), измеренной с использованием методики КСЛП. Измерение 04.11.99

3. Измерения

Одновременные измерения средней скорости ветра чашечным анемометром, который может рассматриваться как точечный датчик, и сканирующим доплеровским лидаром были проведены нами в начале 1992 г. в Лихтенау. Результаты этих экспериментов опубликованы в [1]. Экспериментальные значения $\varepsilon_{т.д}$ и $\varepsilon_{к.с}$ из [1] находятся в хорошем согласии с нашими оценками, полученными в разд. 2.2.

Чтобы сравнить точность определения средней скорости в помощью КСЛП и ТСИ, мы провели эксперименты 20 октября и 4 ноября 1999 в Оберпфaffenхофене. В этих экспериментах был использован доплеровский лидар на основе непрерывного CO₂-лазера Лидарной группы Института физики атмосферы. Эксперимент начинался (t_{start}) в 15:40 местного времени 20 октября и в 9:40 4 ноября. Все измерения проводились для дальности $R = 150$ м и угла наклона $\varphi = 30^\circ$ (высота 75 м). Мы измеряли радиальную скорость попеременно при фиксированных азимутальных углах $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и с использованием конического сканирования лазерного пучка вокруг вертикальной оси. Каждое измерение при фиксированном азимутальном угле θ_i занимало 21 с, а каждый оборот занимал 7 с, и мы выполняли три оборота. После этого вышеописанная процедура повторялась.

На рис. 6 приводится пример подгонки результатов измерения радиальной скорости по методике КСЛП (точки) к синусоидальной зависимости (сплошная линия). Видно, что скорость ветра была неоднородной и эта неоднородность сохранялась в течение всех трех оборотов.

На рис. 7 демонстрируется временная зависимость радиальной скорости, измеренной по методике ТСИ. Измерения проводились при $\theta_1 = 98^\circ$ ($t_{start} = 09:55$, пучок № 1), $\theta_2 = 222^\circ$ ($t_{start} = 09:56$, пучок № 2) и $\theta_3 = 331^\circ$ ($t_{start} = 09:57$, пучок № 3). Внизу на рис. 7 приведена временная зависимость компонент скорости V_z, V_x и V_y , полученных из этих данных о радиальной скорости в предположении, что измерения при углах θ_1, θ_2 , и θ_3 проводились одновременно. Видно, что компонента V_z во время измерений изменялась в пределах ± 1 м/с. Тем не менее после усреднения по времени данных, приведенных на рис. 7

$$\left\langle \hat{V} = \frac{1}{T} \int_0^T dt \mathbf{V}(t) \right\rangle, \text{ имеем:}$$

$$\hat{V}_z = 0,07 \text{ м/с}, \hat{V}_x = -4,18 \text{ м/с} \text{ и } \hat{V}_y = -0,16 \text{ м/с}.$$

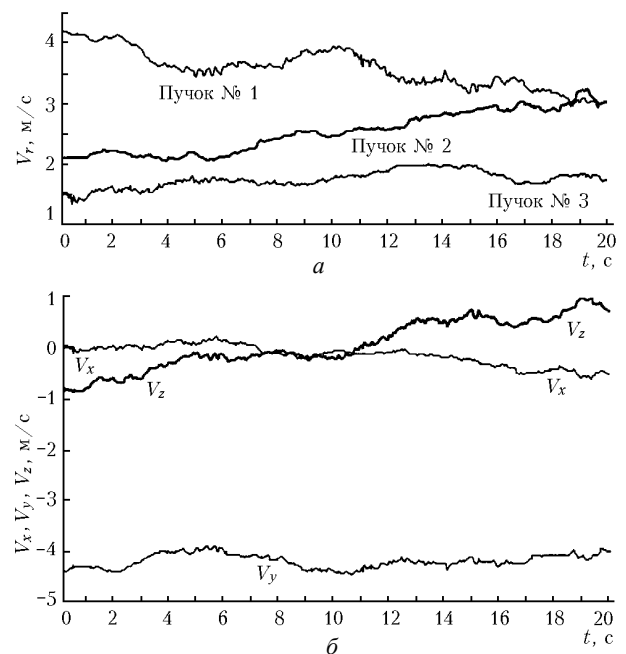


Рис. 7. Пример временной зависимости радиальной скорости ветра (а) и трех компонент скорости ветра (б), измеренных с использованием методики ТСИ. Измерение 04.11.99

В методике КСЛП пространственное усреднение флуктуаций скорости больше, чем в методике ТСИ. Однако суммарное время на одно измерение по методике ТСИ в этом эксперименте в три раза превышает время, затрачиваемое на один оборот в методике КСЛП. Таким образом, следует ожидать, что точность измерений средней скорости обоими методами должна быть примерно одинаковой.

На рис. 8, 9 приведены результаты измерений средней скорости, направления и вертикальной компоненты ветра. Результаты, полученные с использованием методики КСЛП, показаны светлыми квадратами, а темные квадраты соответствуют данным, полученным с использованием методики ТСИ. Видно, что оба метода дают близкие результаты. Вариации компонент скорости ветра обусловлены крупномасштабной неоднородностью ветра и, вероятно, мезомасштабными процессами в атмосфере.

Таблица 1

Ошибка измерений в зависимости от параметра шероховатости поверхности z_0 для нейтральной стратификации ($H = 0$). $G = 10$ м/с, $\Delta z = 100$ м, $R = 250$ м

Параметр шероховатости z_0 , см	ε , %		E , м/с	
	КСЛП	ТСИ	КСЛП	ТСИ
0,1	2,6	6	0,23	0,53
1	3,5	7,9	0,3	0,67
5	4,4	9,9	0,36	0,8

Таблица 2

Ошибка измерений в зависимости от термической стратификации атмосферы. $z_0 = 1$ см, $G = 10$ м/с, $\Delta z = 100$ м, $R = 250$ м

Стратификация	ε , %		E , м/с	
	КСЛП	ТСИ	КСЛП	ТСИ
Устойчивая ($H = -40$ Вт/м ²)	0,6	1,5	0,05	0,13
Нейтральная ($H = 0$)	3,5	7,9	0,3	0,67
Неустойчивая ($H = 400$ Вт/м ²)	5,1	11,2	0,5	1,09

Таблица 3

Ошибка измерений в зависимости от продольного размера зондируемого объема (пространственного разрешения). $z_0 = 1$ см, $G = 10$ м/с, нейтральная стратификация ($H = 0$)

Пространственное разрешение Δz , м	ε , %		E , м/с	
	КСЛП	ТСИ	КСЛП	ТСИ
100 ($R = 250$ м)	3,5	7,9	0,3	0,67
250 ($R = 400$ м)	2,3	5,9	0,2	0,5
1000 ($R = 750$ м)	1,2	3,3	0,1	0,28

Из таблиц видно, что для достижения абсолютной погрешности оценки среднего ветра из лидарных данных < 1 м/с во всех рассмотренных ситуациях достаточно осуществлять измерения в течение 12 с. Исключение составляет случай неустойчивой стратификации с использованием методики ТСИ (см. табл. 2) и с пространственным разрешением 100 м. Для более высокого пространственного разрешения (например, 250 м) предел в 1 м/с выполняется для всех рассмотренных случаев в пограничном слое атмосферы.

Авторы из Института оптики атмосферы выражают признательность за финансовую поддержку германскому правительству (Международное бюро, проект № Ru-138) и Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 00-05-64033).

1. Banakh V.A., Smalikho I.N., Kopp F., Werner Ch. Representativity of the wind measurements by a CW Doppler Lidar in the Atmospheric Boundary Layer // Appl. Opt. 1995. V. 34. P. 2055–2067.
2. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 263 с.
3. Вагер Б.Г. и Надеждина Е.Д. Пограничный слой атмосферы в условиях горизонтальной неоднородности. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 192 с.
4. Hall F.F.Jr., Huffaker R.M., Hardesty R.M., Jackson M.E., Lawrence T.R., Post M.J., Richter R.A., and Weber B.F. Wind Measurement Accuracy of the NOAA Pulsed Infrared Doppler Lidar // Appl. Opt. 1984. V. 23. P. 2503.
5. Schwiesow R.L., Kopp F., and Werner Ch. Comparison of cw-Lidar Measured Wind Values Obtained by Full Conical Scan and Two-Point Techniques // J. Atmos. and Ocean. Technol. 1985. V. 2. P. 3–14.

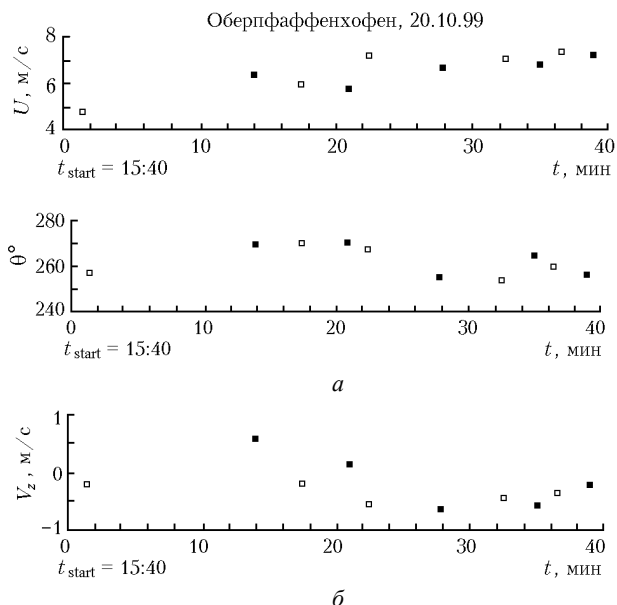


Рис. 8

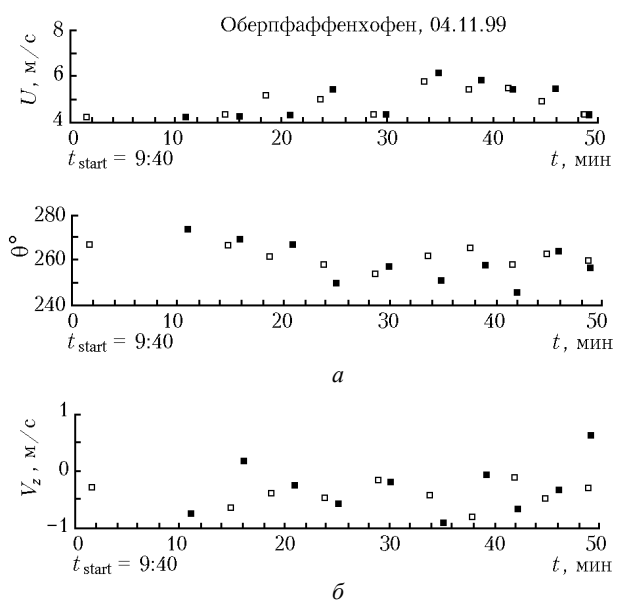


Рис. 9

Зачастую при планировании экспериментов необходимо знать, с какой погрешностью будет измеряться средний ветер лидаром при заданных параметрах системы, геометрии зондирования (пространственного разрешения) и времени измерений в зависимости от турбулентных условий в атмосфере (термической стратификации, параметра шероховатости).

В табл. 1–3 приводятся такие расчетные данные для времени измерения 12 с. Время 12 с при обычно используемых частотах повторения импульсов для импульсных лидаров и частотах дискретизации для непрерывных лидаров оказывается достаточным для накопления необходимого количества лидарных данных для обработки по методикам КСЛП и ТСИ.

6. Лайтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 215 с.
7. Lumley J.L. and Panofsky H.A. The Structure of Atmospheric Turbulence. New York: Interscience, 1964. 263 p.
8. Монин А.С. и Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1, 2. М.: Наука, 1965, 765 с.; 1967, 683 с.
9. Post M.J. and Cupp R.E. Optimizing a Pulsed Doppler Lidar // Appl. Opt. 1990. V. 29. P. 4145–4158.
10. Steinhagen H., Dibbern J., Engelbart D., Görsdorf U., Lehmann V., Neisser J. and Neuschaefer J. Performance of the first European 482 MHz Wind Profiler Radar with RASS under operational conditions // Meteorolog. Zeitschrift. 1998. N. F.7. P. 248–261.
11. Werner Ch., Rahm S., Lehner S., Buchhold M., Banakh V. and Smalikho I. Intercomparison of laser Doppler wind measurements with other methods and a forecast model // Pure and Appl. Opt. 1998. V. 7. P. 1473–1487.
12. Зилитинкевич С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 290 с.
13. Lhermitte R.M. and Atlas D. Precipitation Motion by Pulse Doppler: Reprints Ninth Weather Radar Conference, Kansas City // Amer. Meteorol. Soc. 1961. P. 218–223.

I.N. Smalikho, V.A. Banakh, F. Kopp, Ch. Werner. Laser remote sensing of the mean wind.

The representativeness and accuracy of laser Doppler anemometer (LDA) for mean wind velocity measurements in the atmospheric boundary layer under different atmospheric conditions and earth surface roughnesses is studied both theoretically and experimentally for two measurement techniques: velocity azimuth display (VAD) and Doppler beam swinging (DBS). In many instances LDA measurements better represent the true mean wind velocity than the traditional point measurements due to the spatial-temporal averaging.