

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.511.6:621.371

## Совместные радиозондовые и доплеровские лидарные измерения ветра в пограничном слое атмосферы

В.А. Банах, И.Н. Смалихо, А.В. Фалиц, Б.Д. Белан,  
М.Ю. Аршинов, П.Н. Антохин\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 11.02.2014 г.

Представлены результаты совместных измерений высотных профилей скорости и направления ветра импульсным когерентным доплеровским лидаром «Stream Line» и радиозондом RS92-SGP в Томске с 23 по 27 сентября 2013 г. Установлено, что из лидарных данных, измеренных при угле места  $45^\circ$ , профили ветра можно восстановить до высот от 400 до 1100 м, в зависимости от концентрации аэрозоля в пограничном слое атмосферы. Показано, что коэффициент корреляции лидарных и радиозондовых измерений скорости и направления ветра равен 0,97. Математическое ожидание и стандартное отклонение разности оценок скорости и направления ветра из данных радиозонда и лидара составляют соответственно 0,1 и 0,7 м/с для скорости и 0,8 и  $4^\circ$  для направления ветра.

*Ключевые слова:* пограничный слой атмосферы, ветер, когерентный доплеровский лидар, радиозонд; atmospheric boundary layer, wind, coherent Doppler lidar, radiosonde.

В последнее время для измерений ветра в пограничном слое атмосферы все большее распространение получают когерентные доплеровские лидары (КДЛ), работающие на длине волны 1,5 мкм, в частности импульсный КДЛ «Stream Line» (разработка и производство фирмы HALO Photonics) [1]. В комплект лидара «Stream Line» входит сканирующее устройство, позволяющее изменять направление распространения зондирующего импульса и, следовательно, получать из исходных лидарных данных информацию о скорости и направлении ветра. Возможность получения такой информации во многом зависит от концентрации аэрозоля в пограничном слое атмосферы, определяющей уровень эхосигнала. С целью исследования вопросов, касающихся точности и максимальной дальности измерения скорости и направления ветра, лидар «Stream Line» был задействован в комплексном лидарном эксперименте, проводившемся в Томске осенью 2013 г. В этом эксперименте также применялось радиозондирование, из данных которого восстанавливались высотные профили различных атмосферных параметров, в том числе скорости и направления ветра. Ниже дано описание эксперимента и метода восстановления высотных профилей ветра из лидарных данных, приводятся результаты сравнительного анализа данных совместных лидарных и радиозондовых ветровых измерений.

Эксперименты проводились с 23 по 27 сентября 2013 г. Лидар был установлен на крыше здания блока «А» Института оптики атмосферы (ИОА) им В.Е. Зуева СО РАН (рис. 1), а запуски шаров, наполненных гелием, для радиозондирования осуществлялись с земли возле станции высотного зондирования ИОА. Расстояние между блоком «А» и станцией высотного зондирования ИОА составляет примерно 430 м. В экспериментах был задействован радиозонд RS92-SGP фирмы Vaisala. Скорость подъема шар-зонда во время экспериментов составляла 5 м/с. Соответственно, на высоту 1 км шар поднимался примерно за 3,5 мин. За 5 дней проведения экспериментов было осуществлено 16 запусков шаров. В это же время проводились измерения импульсным когерентным доплеровским лидаром «Stream Line». Основные параметры этого лидара приведены ниже.

Длина волны . . . . .	1,5 мкм
Энергия импульса . . . . .	100 мкДж
Длительность импульса . . . . .	170 нс
Частота повторения импульсов . . . . .	15 кГц
Диаметр телескопа . . . . .	7,5 см
Радиус пучка на выходе из телескопа . . . . .	2 см
Фокусное расстояние . . . . .	$\geq 300$ м
Минимальная дальность измерения . . . . .	100 м
Максимальная дальность измерения . . . . .	0,5–2 км
Полоса пропускания приемника . . . . .	50 МГц

Во время измерения лидаром использовалось коническое сканирование зондирующим пучком. Угол места  $\phi$  направления зондирования задавался равным  $45^\circ$ , а одно полное коническое сканирование осуществлялось примерно за 5 мин. Программное

\* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Игорь Николаевич Смалихо (smalikho@iao.ru); Андрей Вячеславович Фалиц (falits@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (arp@iao.ru).



Рис. 1. Когерентный доплеровский лидар «Stream Line» во время проведения экспериментов на крыше здания ИОА СО РАН

обеспечение, установленное на входящем в комплект лидара компьютере, позволяет кроме задания параметров измерения (угол места, скорость сканирования, число посылок зондирующего импульса, используемых для аккумуляции, и т.д.) осуществлять предварительную обработку исходных лидарных данных. Для аккумуляции мы использовали по 15000 посылок зондирующего импульса в атмосферу. В результате такой обработки мы получали оценки радиальной скорости  $\hat{V}_r$ , отношения сигнал-шум  $S\hat{N}R$  и коэффициента аэрозольного обратного рассеяния  $\hat{\beta}_\pi$  на различных расстояниях от лидара  $R_i = R_0 + i\Delta R$  и при различных азимутальных углах сканирования  $\theta_m = \theta_0 + m\Delta\theta$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, I-1$ ,  $\Delta R$  – разрешение по дальности,  $m = 1, 2, 3, \dots, M$  и  $\Delta\theta$  – разрешение по азимуту. При этом  $|\theta_M - \theta_0| = 360^\circ$ .

На рис. 2 приведен пример измеренного лидаром распределения радиальной скорости на боковой поверхности конуса сканирования зондирующим пучком. Видно, что, начиная с расстояния  $\sim 600$  м, вероятность плохой оценки радиальной скорости становится отличной от нуля и количество плохих оценок за одно полное сканирование возрастает с ростом дальности измерения  $R_i$ . Поэтому для восстановления высотных профилей скорости  $U(h_i)$  и угла направления  $\theta_V(h_i)$  ветра (получение оценок скорости и направления ветра на высотах  $h_i = h_L + R_i \sin \phi$ , где  $h_L$  – высота точки положения лидара над поверхностью Земли) из данных, подобных тем, что показаны на рис. 2, мы применяли метод фильтрованной синусоидальной подгонки (ФСП) [2–4].

Суть метода ФСП заключается в нахождении максимума фильтрующей функции

$$Q(\mathbf{V}) = \frac{100\%}{M} \sum_{m=1}^M \exp \left\{ -\frac{[\hat{V}_r(R_i, \theta_m) - \mathbf{S}_m \cdot \mathbf{V}]^2}{2\sigma_g^2} \right\}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{V} = \{V_z, V_x, V_y\}$  – искомый вектор скорости ветра;  $\mathbf{S}_m = \{\sin \phi, \cos \phi \cos \theta_m, \cos \phi \sin \theta_m\}$  – единичный вектор вдоль направления луча;  $\sigma_g$  – параметр фильтрации хороших оценок радиальной скорости, т.е. для оценки вектора скорости ветра  $\hat{\mathbf{V}} = \{\hat{V}_z, \hat{V}_x, \hat{V}_y\}$  можно записать:  $Q(\hat{\mathbf{V}}) = \max\{Q(\mathbf{V})\}$ . Если  $\sigma_g$  порядка ширины доплеровского спектра (в единицах скорости) и оценка  $\hat{\mathbf{V}}$  получена с высокой точностью, то максимум фильтрующей функции  $Q(\hat{\mathbf{V}})$  представляет собой величину процентного содержания хороших оценок радиальной скорости среди всех оценок  $\hat{V}_r(R_i, \theta_m)$ , полученных за одно полное коническое сканирование зондирующим пучком при фиксированном расстоянии  $R_i$ .

На рис. 3 представлен результат восстановления высотных профилей скорости  $\hat{U} = |\hat{V}_x + j\hat{V}_y|$ , угла направления  $\hat{\theta}_V = \arg\{\hat{V}_x + j\hat{V}_y\}$  ( $j = \sqrt{-1}$ ) и вертикальной составляющей  $\hat{V}_z$  ветра из данных, представленных на рис. 2, с использованием метода ФСП при  $\sigma_g = 2$  м/с. Резкое изменение профилей ветра на высоте примерно 930 м связано с существенным увеличением числа плохих оценок радиальной скорости на этой высоте и в вышележащих слоях, когда использование процедуры фильтрации при оценивании вектора скорости ветра не позволяет получить результат с приемлемой точностью (например, когда погрешность оценки скорости

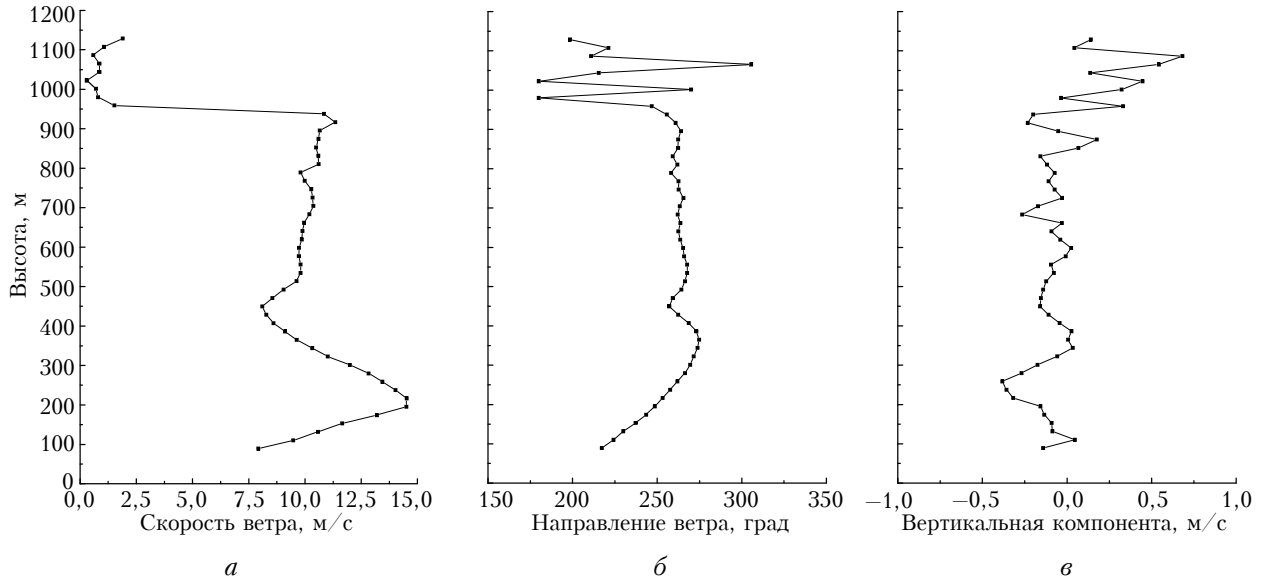


Рис. 3. Высотные профили скорости (а), направления (б) и вертикальной компоненты (в) ветра, восстановленные из данных, представленных на рис. 2, с использованием метода ФСП

не превышает 0,5 м/с). Следовательно, необходимо определить высотный интервал, в пределах которого результаты восстановления профилей ветра с большой вероятностью соответствуют достоверной информации.

Оценка радиальной скорости  $\hat{V}_r(R_i, \theta_m)$  является несмещенной, если вероятность плохой оценки данной величины пренебрежимо мала. При этом несмещенная оценка представима в виде [4–7]:

$$\hat{V}_r(R_i, \theta_m) = \bar{V}_r(R_i, \theta_m) + V_e(R_i, \theta_m), \quad (2)$$

где  $\bar{V}_r$  – радиальная скорость, усредненная по объему зондирования,  $V_e$  – случайная погрешность, обладающая свойствами «белого» шума, т.е.

$$\langle V_e(R_i, \theta_m) V_e(R_i, \theta_k) \rangle = \langle V_e^2 \rangle \delta_{m-k}$$

( $\delta_m$  – символ Кронекера), с  $\langle V_e \rangle = 0$  и  $\langle \bar{V}_r V_e \rangle = 0$ .

В другом предельном случае, когда вероятность плохой оценки близка к единице,  $\hat{V}_r(R_i, \theta_m)$  определяется только вторым слагаемым в правой части формулы (2) и, соответственно, является смещенной оценкой (вне зависимости от величины  $\bar{V}_r$ , среднее значение оценки радиальной скорости равно нулю). С использованием лидарных данных, приведенных на рис. 2, мы получили высотные профили отношения сигнал-шум

$$\text{SNR}(h_i) = M^{-1} \sum_{m=1}^M \text{SNR}(R_i, \theta_m),$$

погрешности лидарной оценки радиальной скорости, рассчитываемой по формуле

$$\sigma_e(h_i) = \left\{ (M-1)^{-1} \sum_{m=1}^{M-1} [\hat{V}_r(R_i, \theta_{m+1}) - \hat{V}_r(R_i, \theta_m)]^2 \right\}^{1/2},$$

и максимума фильтрующей функции  $Q_{\max}(h_i) \equiv Q(\hat{V}(h_i))$ . При этом следует отметить, что в случае несмещенной оценки  $\hat{V}_r(R_i, \theta_m)$  (см. формулу (2)) рассчитываемая величина  $\sigma_e$  несколько превышает истинную погрешность  $[\langle V_e^2 \rangle]^{1/2}$  из-за ветровой турбулентности (так как  $\langle [\hat{V}_r(R_i, \theta_{m+1}) - \bar{V}_r(R_i, \theta_m)]^2 \rangle > 0$ ).

Результаты расчетов  $\text{SNR}(h_i)$ ,  $\sigma_e(h_i)$  и  $Q_{\max}(h_i)$  представлены на рис. 4.

Видно, что до высоты 600 м, когда отношение сигнал-шум не меньше –21 дБ, оценка радиальной скорости, погрешность которой  $\sigma_e$  не превышает 0,5 м/с (рис. 4, б), является несмещенной, так как максимум фильтрующей функции  $Q_{\max}$  близок к 100% (рис. 4, в). С увеличением высоты  $h > 600$  м  $\sigma_e$  растет,  $Q_{\max}$  падает (возрастает число плохих оценок радиальной скорости) и, соответственно, оценка радиальной скорости становится смещенной [4]. Тем не менее использование метода ФСП позволяет получать несмещенную оценку вектора скорости ветра на высотах до 900 м. При этом максимум фильтрующей функции  $Q_{\max}$  не опускается ниже 40%. Поэтому для восстановления высотных профилей ветра с приемлемой точностью (с погрешностью оценки скорости ветра, не превышающей 0,5 м/с), необходимо, чтобы для максимальной высоты восстанавливаемых профилей ветра выполнялось условие  $Q_{\max} \geq 40\%$ . Именно этот критерий использовался при восстановлении всех высотных профилей ветра из лидарных данных, которые затем сравнивались с результатами радиозондовых измерений.

На рис. 5–7 приведены примеры высотных профилей скорости и направления ветра, полученных из данных совместных радиозондовых и доплеровских лидарных измерений в Томске осенью 2013 г. В этих примерах максимальная высота восстановления профилей ветра из данных, измеренных лидаром «Stream Line», составляет 800 (рис. 5),

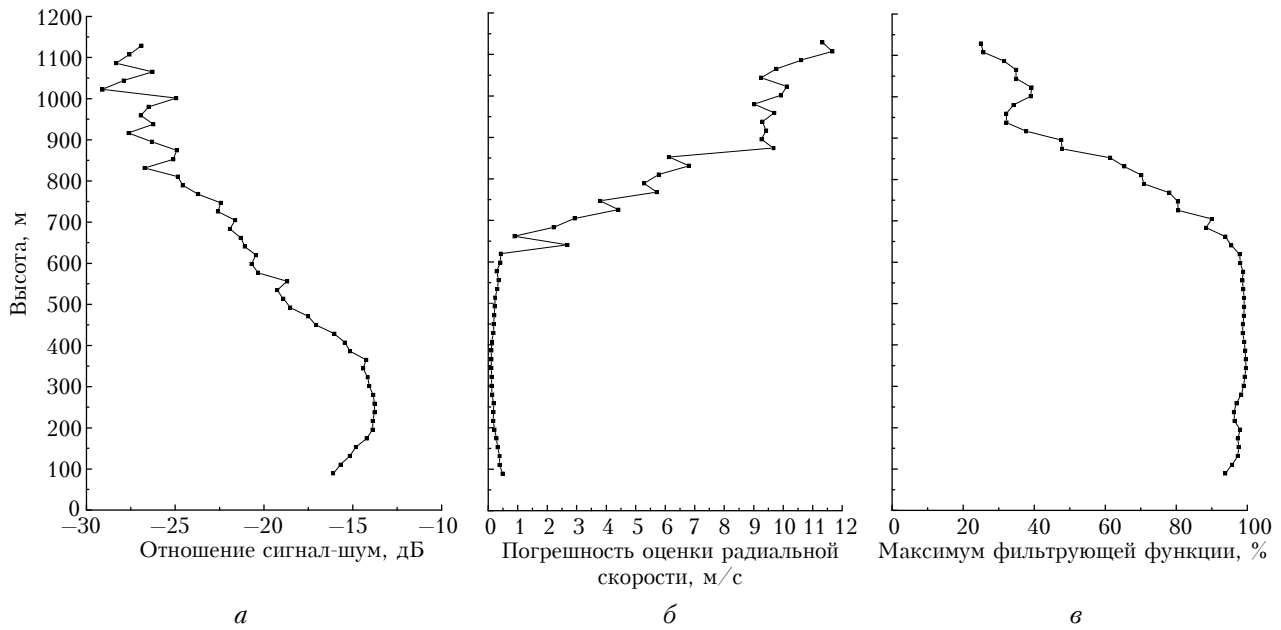


Рис. 4. Высотные профили отношения сигнал-шум (*а*), погрешности оценки радиальной скорости (*б*) и максимума фильтрующей функции (*в*), полученные из данных, представленных на рис. 2

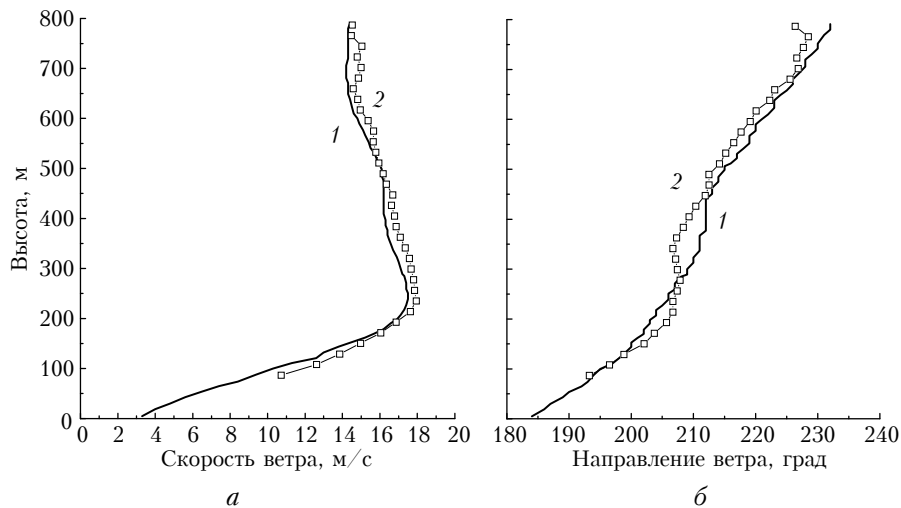


Рис. 5. Высотные профили скорости (*а*) и направления (*б*) ветра, восстановленные из данных радиозондовых и лидарных измерений в Томске 24.09.2013 в 22:30 местного времени. Кривая 1 – данные радиозондирования; 2 – лидарные данные

900 (рис. 6) и 600 м (рис. 7). Видно вполне удовлетворительное согласие результатов измерения двумя различными методами до этих высот, определяемых по выбранному выше критерию ( $Q_{\max} \geq 40\%$ ).

Высотные профили скорости и направления ветра были восстановлены с разрешением по высоте  $\Delta h = 21,2$  м из лидарных данных и  $\Delta h \sim 10$  м из данных радиозондирования. Максимум высоты восстановления профилей ветра из лидарных данных существенно зависит от концентрации атмосферного аэрозоля и, как показали эксперименты, принимает значения от 400 до 1100 м при угле места  $45^\circ$ .

На рис. 8 в виде точек представлены все одиночные оценки скорости и направления ветра из данных совместных радиозондовых и лидарных

измерений на соответствующих высотах во время экспериментов с 23 по 27 сентября 2013 г. Статистический анализ этих результатов показал, что коэффициент корреляции оценок скорости и направления ветра равен 0,97. Математическое ожидание и стандартное отклонение разности оценок скорости и направления ветра из данных радиозонда и лидара составляют соответственно 0,1 и 0,7 м/с для скорости и 0,8 и  $4^\circ$  для направления ветра.

Таким образом, представленные выше результаты совместных радиозондовых и доплеровских лидарных измерений указывают на высокую эффективность использования лидара «Stream Line» для получения оперативной и надежной информации о высотном ходе скорости и направления ветра и расширяют

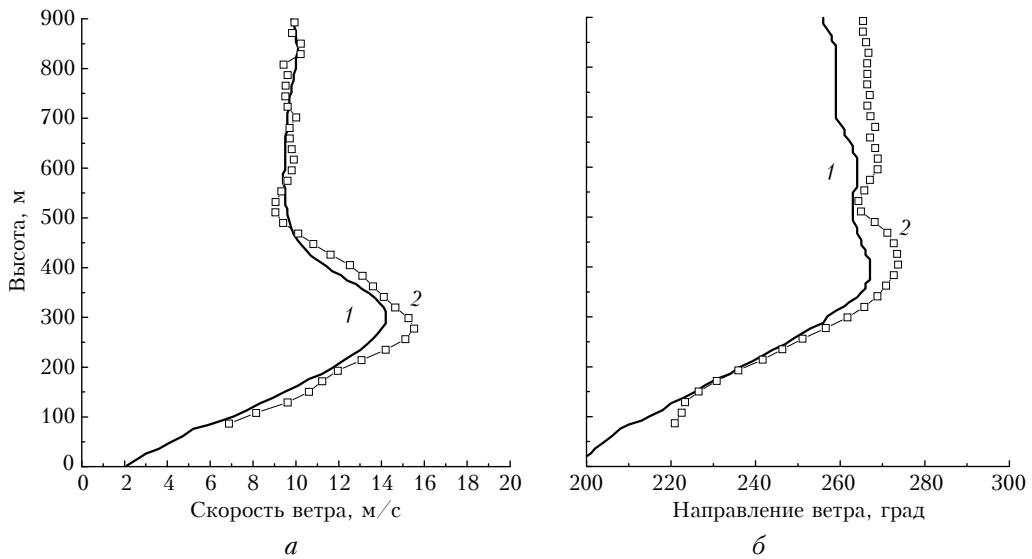


Рис. 6. Высотные профили скорости (а) и направления (б) ветра, восстановленные из данных радиозондовых и лидарных измерений в Томске 25.09.2013 в 08:30 местного времени. Кривая 1 – данные радиозондирования; 2 – лидарные данные

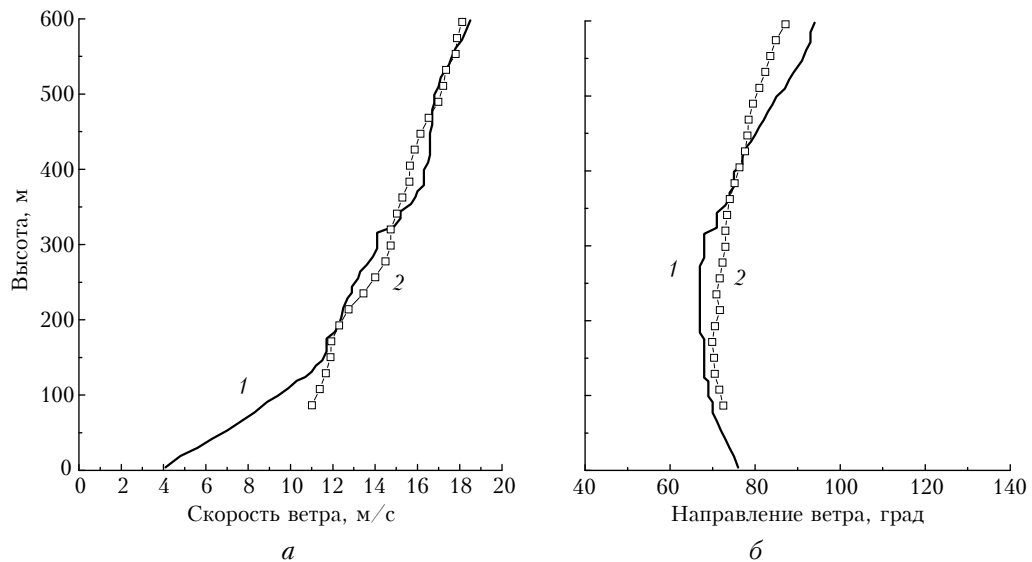


Рис. 7. Высотные профили скорости (а) и направления (б) ветра, восстановленные из данных радиозондовых и лидарных измерений в Томске 26.09.2013 в 18:00 местного времени. Кривая 1 – данные радиозондирования; 2 – лидарные данные

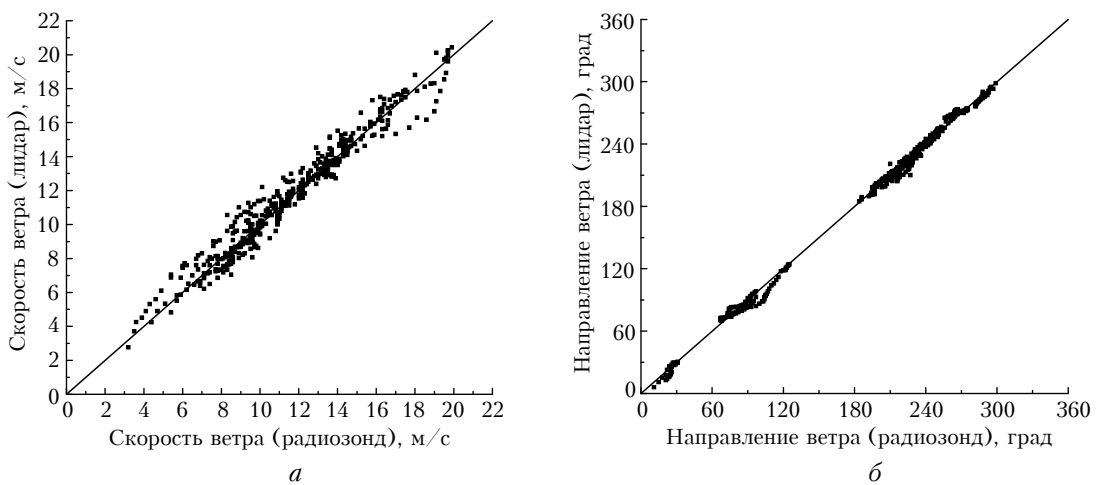


Рис. 8. Сопоставление оценок (точки) скорости (а) и направления (б) ветра, полученных из данных совместных радиозондовых и лидарных измерений в Томске с 23 по 27 сентября 2013 г.

диапазон задач лазерного зондирования атмосферы [8, 9]. Применение метода ФСП для обработки исходных ветровых данных (радиальных скоростей), измеренных этим лидаром, позволяет в большинстве случаев восстанавливать вертикальные профили компонент вектора скорости ветра почти во всем пограничном слое атмосферы (до высоты ~1 км). В будущем мы планируем проведение теоретических и экспериментальных исследований возможности извлечения информации об атмосферной турбулентности из данных, измеряемых лидаром «Stream Line».

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00458).

1. *Pierson G., Davies F., Collier C.* An analysis of performance of the UFAM Pulsed Doppler lidar for the observing the boundary layer // *J. Atmos. and Ocean. Technol.* 2009. V. 26, N 2. P. 240–250.
2. *Smalikho I.N.* Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar // *J. Atmos. and Ocean. Technol.* 2003. V. 20, N 2. P. 276–291.

3. *Банах В.А., Брюер А., Пичугина Е.Л., Смалихо И.Н.* Измерения скорости и направления ветра когерентным доплеровским лидаром в условиях слабого эхосигнала // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 5. С. 333–340.
4. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2013. 304 с.
5. *Frehlich R.G.* Estimation of velocity error for Doppler lidar measurements // *J. Atmos. and Ocean. Technol.* 2001. V. 18, N 10. P. 1628–1639.
6. *Frehlich R.G., Cornman L.B.* Estimating spatial velocity statistics with coherent Doppler lidar // *J. Atmos. and Ocean. Technol.* 2002. V. 19, N 3. P. 355–366.
7. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Оценивание скорости диссипации турбулентной энергии из данных импульсного доплеровского лидара // *Оптика атмосфер. и океана.* 1997. Т. 10, № 12. С. 1524–1538.
8. *Матвиенко Г.Г., Погодаев В.А.* Оптика атмосферы и океана – неоконченный урок взаимодействия оптического излучения со средой распространения // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 1. С. 5–10.
9. *Разенков И.А.* Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 1. С. 52–63.

*V.A. Banakh, I.N. Smalikho, A.V. Falits, B.D. Belan, M.Yu. Arshinov, P.N. Antokhin.* **Joint radiosonde and Doppler lidar measurements of wind in the atmospheric boundary layer.**

The results of joint measurements of height profiles of speed and direction of the wind by a pulsed coherent Doppler lidar “Stream Line” and radiosonde RS92-SGP in Tomsk from 23 to 27 September 2013 are presented. It has been found out that from the lidar data, measured at elevation angle of 45 deg, the wind profiles are retrieved up to heights from 400 m to 1100 m, depending on aerosol concentration in the atmospheric boundary layer. It is shown that the correlation coefficient for velocity and direction of the wind measured by lidar and radiosonde equals 0.97. Mathematical expectation and standard deviation of differences of wind velocity and direction estimates from data of the radiosonde and Doppler lidar are, respectively, 0.1 m/s and 0.7 m/s for velocity and 0.8 deg and 4 deg for direction of the wind.

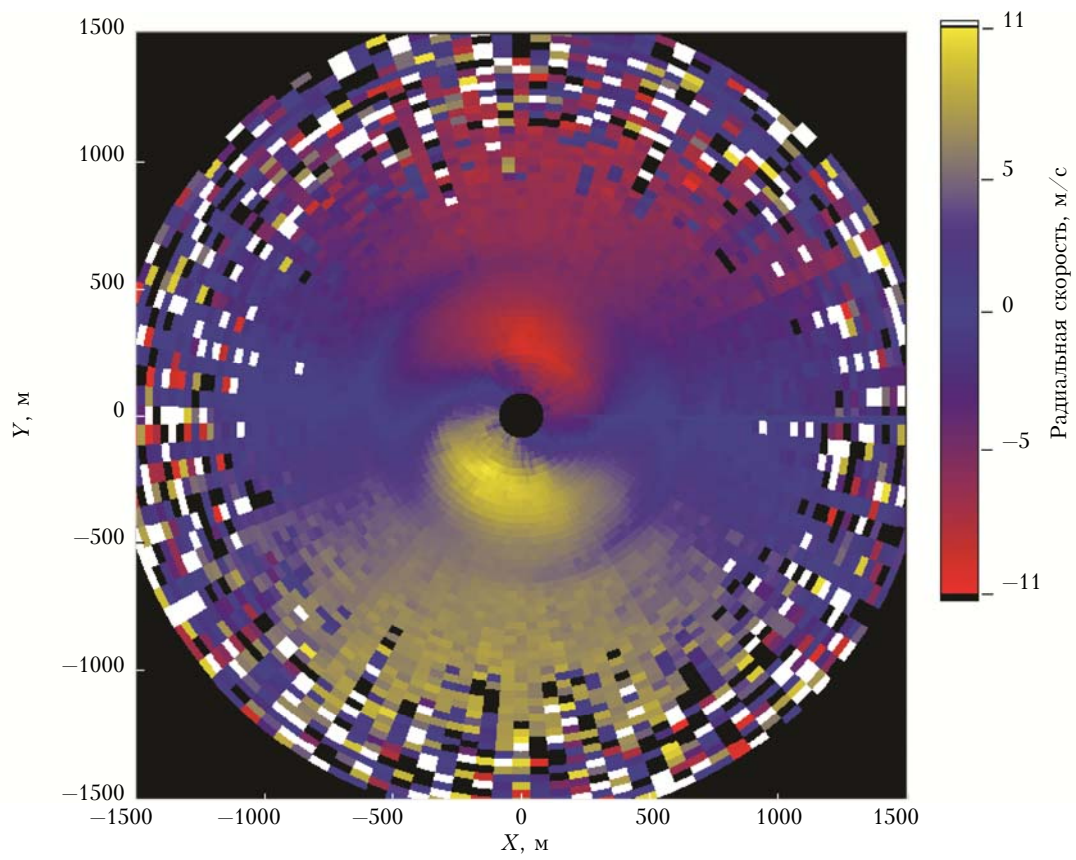


Рис. 2. Распределение радиальной скорости ветра на боковой поверхности конуса сканирования, измеренное лидаром «Stream Line» в Томске 25.09.2013 с 09:00 до 09:05 местного времени