

Измерения скорости и направления ветра с помощью двухлучевого метода доплеровским лидаром Stream Line в приземном слое атмосферы

В.А. Банах, И.Н. Смалихо, А.В. Фалиц, Е.В. Гордеев, А.А. Сухарев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 17.02.2017 г.

Проведено экспериментальное сравнение оценок скорости и направления ветра, получаемых из измерений радиальной скорости импульсным когерентным доплеровским лидаром с помощью двухлучевого метода и метода конического сканирования. Полученные результаты измерений сравниваются с данными точечного измерителя вектора скорости ветра — акустической метеостанции.

Ключевые слова: когерентный доплеровский лидар, акустический анемометр, ветер, двухлучевой метод; coherent Doppler lidar, sonic anemometer, wind, duo-beam method.

Введение

Когерентные доплеровские ветровые лидары — эффективный инструмент для получения информации о динамике воздушных масс в атмосфере Земли [1]. Сканирование зондирующим пучком позволяет из измерений радиальной скорости когерентными ветровыми лидарами восстанавливать высотные профили скорости и направления ветра, получать оценки параметров ветровой турбулентности [2–9], атмосферных гравитационных волн [10], самолетных вихрей и ветровых шлейфов за ветровыми турбинами [11–14].

Как правило, при изучении движения воздушных масс в атмосфере с помощью импульсных когерентных доплеровских лидаров используется коническое сканирование зондирующим пучком вокруг вертикальной оси, при этом угол места φ направления зондирования (образующий конус) не должен превышать 60° [1–4], так как при значениях φ , стремящихся к 90° , ошибка восстановления скорости горизонтального ветра неограниченно возрастает. Выбор угла места при задании геометрии измерений определяет высоту профиля ветра и возможность осуществления полного конического сканирования в диапазоне углов от 0 до 360° .

Особенностью импульсных когерентных доплеровских лидаров является наличие так называемой

«мертвой» зоны, т.е. минимального расстояния от лидара вдоль зондирующего луча, начиная с которого можно измерять скорость ветра. По этой причине при оптимальных для зондирования углах места (от 45° до 60°) оценить вектор скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы с помощью доплеровского лидара невозможно. Стратегия измерения, при которой коническое сканирование осуществляется последовательно при малых и больших значениях угла места, не всегда реализуема. Особенности рельефа в месте проведения измерений, близстоящие высокие деревья и строения могут не позволить провести полное сканирование зондирующим лучом. Поэтому для измерений ветра вблизи подстилающей поверхности нужно применять другие геометрии сканирования, например двухлучевой метод.

В [6] этот метод использовался для оценки профилей скорости и направления ветра из данных импульсного когерентного доплеровского лидара на горизонтальной трассе над руслом реки в черте большого города. Полученные оценки после 30-минутного усреднения сопоставлялись с данными акустической метеостанции, расположенной на берегу на той же высоте, что и лидарная трасса. Обнаружена хорошая корреляция (коэффициент корреляции 0,85) найденных с помощью двухлучевого метода значений скорости и направления ветрового потока для участка трассы, на котором расположена метеостанция, с ее данными. Это подтверждает возможность использования двухлучевого метода для получения оценок скорости и направления ветра из измерений импульсным ветровым лидаром при малых углах места и на горизонтальных трассах.

* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Игорь Николаевич Смалихо (smalikh@iao.ru); Андрей Вячеславович Фалиц (falits@iao.ru); Евгений Викторович Гордеев (gordeev@iao.ru); Артем Андреевич Сухарев (sukharev@iao.ru).

В работе представлены результаты сравнения скорости и направления ветра, получаемых из данных доплеровского лидара при использовании двухлучевого метода и метода конического сканирования и различных временах усреднения. Измерения выполнялись с помощью импульсного когерентного доплеровского ветрового лидара Stream Line (HALO Photonics, Великобритания); результаты лидарных измерений сравниваются с данными метеостанции АМК-03 («Сибаналитприбор», Россия).

1. Методика экспериментальных измерений

Измерения проводились в июне 2016 г. на территории Базового экспериментального комплекса Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Лидар Stream Line был установлен в центральной части комплекса. Основные характеристики доплеровского лидара даны в [4].

С помощью программного обеспечения лидара последовательно измерялись радиальные скорости $V_r(R, \theta, \varphi)$ (где R – расстояние от лидара до центра объема зондирования, θ – азимутальный угол, φ – угол места) при коническом сканировании зондирующим лучом вокруг вертикальной оси и вдоль двух фиксированных направлений луча при заданных значениях азимутального угла θ . Угол места φ для всего цикла измерений был неизменным и равным 12° .

Одновременно с работой лидара измерения скорости и направления горизонтального ветра проводились с помощью метеостанции АМК-03. Метеостанция на выносной штанге была закреплена на вышке оператора сотовой связи, на высоте 38 м от поверхности земли. Регистрация значений скорости ветра осуществлялась с частотой 80 Гц. Из полученных данных рассчитывались средние значения для временных интервалов усреднения 18,3 с; 2 и 10 мин. На рис. 1 показана геометрия измерения вектора скорости ветра во время эксперимента.

Процедура измерений массивов радиальных скоростей $V_r(R, \theta, \varphi)$ схематично представлена на рис. 2. Измерение радиальных скоростей при коническом сканировании выполнялось для 72 дискретных значений азимутального угла с шагом 5° . Оценка радиальной скорости $V_r(R, \theta, \varphi)$ вдоль фиксированного направления осуществлялась за 1 с. Это соответствует аккумуляции 15000 эхосигналов зондирующего импульса лидара. Полный оборот сканера вокруг вертикальной оси занимал примерно 3,3 мин. Для каждого полного сканирования из измеренных оценок радиальных скоростей $V_r(R, \theta, \varphi)$ рассчитывался высотный профиль скорости $U(h)$ и угла направления $\varphi(h)$ ветра на высотах $h = R \sin \varphi$ с использованием метода фильтрованной синусоидальной подгонки [2].

При двухлучевом методе измерения радиальных скоростей $V_r(R, \theta, \varphi)$ выполнялись последовательно

для двух положений зондирующего пучка A и B (рис. 1) при значениях азимутальных углов $\theta_A = 150^\circ$ и $\theta_B = 170^\circ$, отсчитываемых относительно направления на север. Время оценки радиальных скоростей лидаром вдоль заданного направления составляло также 1 с. При этом измерения проводились последовательно для 15 пар положений зондирующего луча, что требовало примерно 1,76 мин (рис. 2).

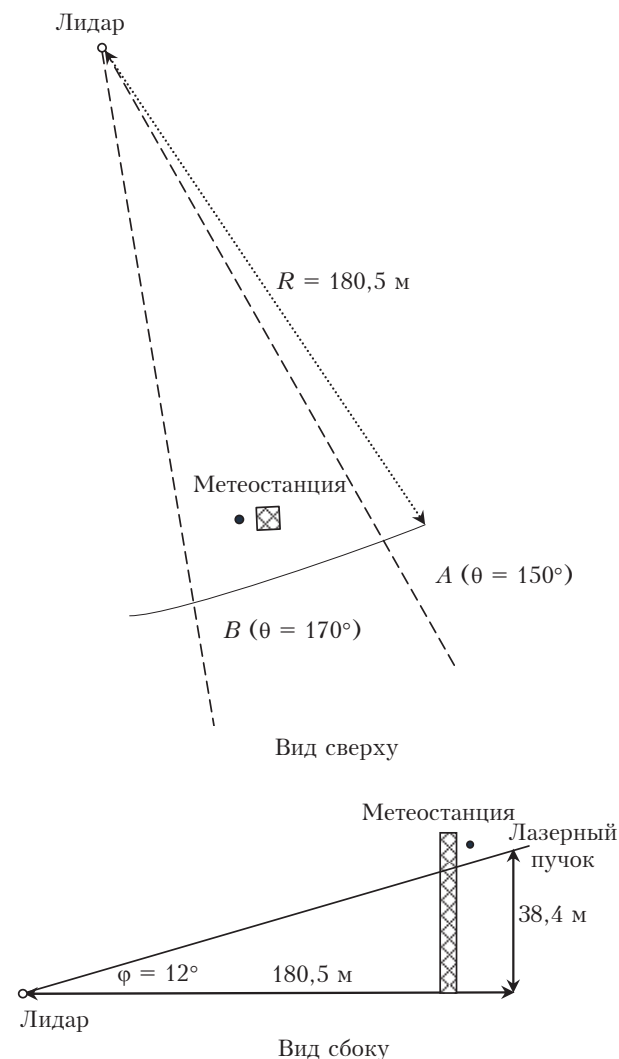


Рис. 1. Геометрия экспериментальных измерений скорости и направления ветрового потока

Значения оценок радиальных скоростей вдоль заданного направления использовались для расчета средних значений компонент V_A и V_B на соответствующих высотах:

$$V_A(h) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M V_{r_m}(R, \theta_A, \varphi), \quad (1)$$

$$V_B(h) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M V_{r_m}(R, \theta_B, \varphi). \quad (2)$$

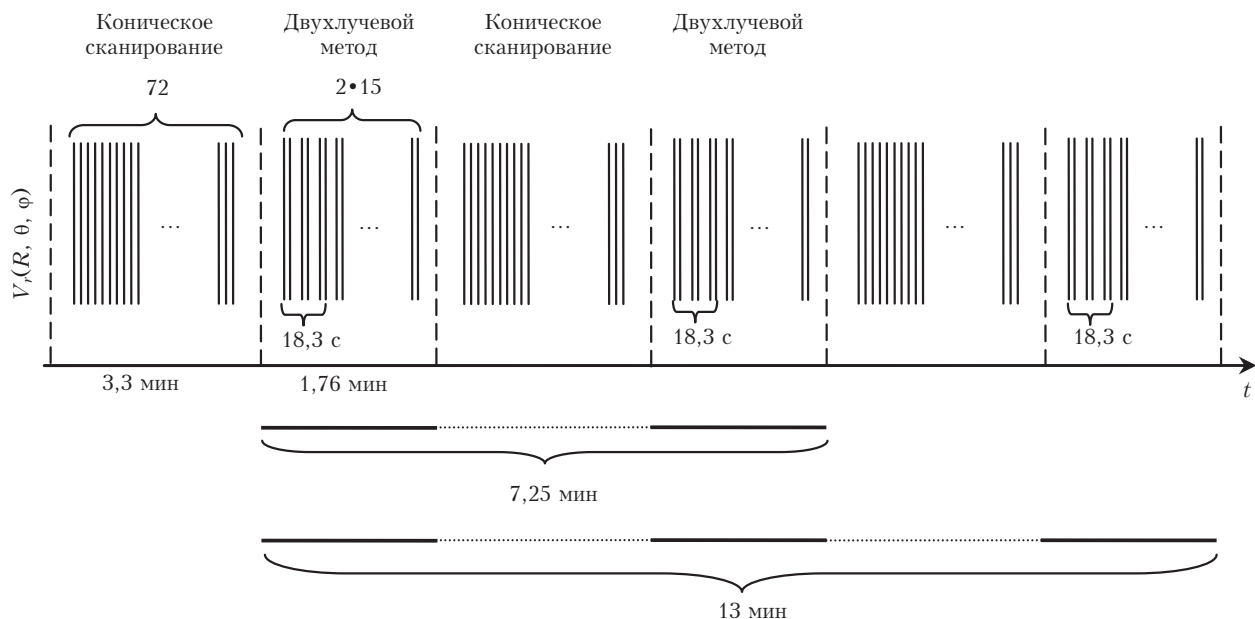


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая методику измерений массивов радиальных скоростей с помощью импульсного когерентного доплеровского лидара

С помощью простых геометрических построений можно показать, что угол направления ветра $\phi(h)$ определяется формулой

$$\phi(h) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{V_A(h) \cos \theta_B - V_B(h) \cos \theta_A}{V_B(h) \sin \theta_A - V_A(h) \sin \theta_B} \right), \quad (3)$$

а горизонтальная скорость ветра $U(h)$ связана с радиальной скоростью соотношением

$$V_r(h) = U(h)(\cos \phi(h) + \pi - \theta_r), \quad (4)$$

где θ_r — азимутальный угол зондирующего пучка вдоль луча A или B .

Параметр M в выражениях (1) и (2) определяет временной интервал усреднения при получении оценок компонент V_A и V_B .

2. Результаты эксперимента

На рис. 3 и 4 представлены оценки скорости и направления ветра на высоте 38 м, рассчитанные из данных лидара и акустической метеостанции при различных временах усреднения.

Результаты, полученные для скорости и направления ветра из лидарных данных двухлучевым методом и данных акустического анемометра при 18,3-секундном усреднении в обоих случаях, показаны на рис. 3, *a* и 4, *a*. Оценки скорости и направления ветра, рассчитанные из тех же данных измерений при 1,76-минутном усреднении лидарных данных и 2-минутном усреднении акустических данных, представлены на рис. 3, *б* и 4, *б*; здесь же приведены оценки скорости и направления ветра, полученные из лидарных данных при кони-

ческом сканировании за время полного оборота зондирующего пучка вокруг вертикальной оси в течении 3,3 мин. На рис. 3, *в* и 4, *в* показаны скорость и направление ветра, оцениваемые из данных лидарных измерений двухлучевым методом при времени усреднения 7,25 и 13 мин в сравнении с данными метеостанции при 10-минутном усреднении.

Из рис. 3 и 4 видно, что оценки вектора скорости, получаемые из лидарных данных с помощью двухлучевого метода, хорошо согласуются с результатами измерений акустической метеостанции при временах усреднения 2 и 10 мин, принятые в метеорологии за стандарт. Также они согласуются с оценками вектора ветра, получаемыми из лидарных измерений с использованием конического сканирования, при котором, помимо временного усреднения турбулентных флуктуаций скорости, обусловленного переносом турбулентных вихрей ветровым потоком через объем зондирования, происходит их пространственное усреднение по окружности основания конуса сканирования [1–4].

Наибольшее число отклонений средних оценок скорости и направления ветра, восстановленных из лидарных данных двухлучевым методом, от оценок, получаемых из данных акустической метеостанции и лидарных данных с использованием конического сканирования, наблюдается в промежуток времени от 12:00 до 20:00, когда, как следует из рис. 3 и 4, скорость и направление ветрового потока эпизодически изменялись в больших пределах, что свидетельствует о сильной крупномасштабной турбулентности. Наличие крупномасштабных движений воздушных масс не позволяет достаточно точно оценивать компоненты V_A и V_B при относительно небольших временах усреднения.

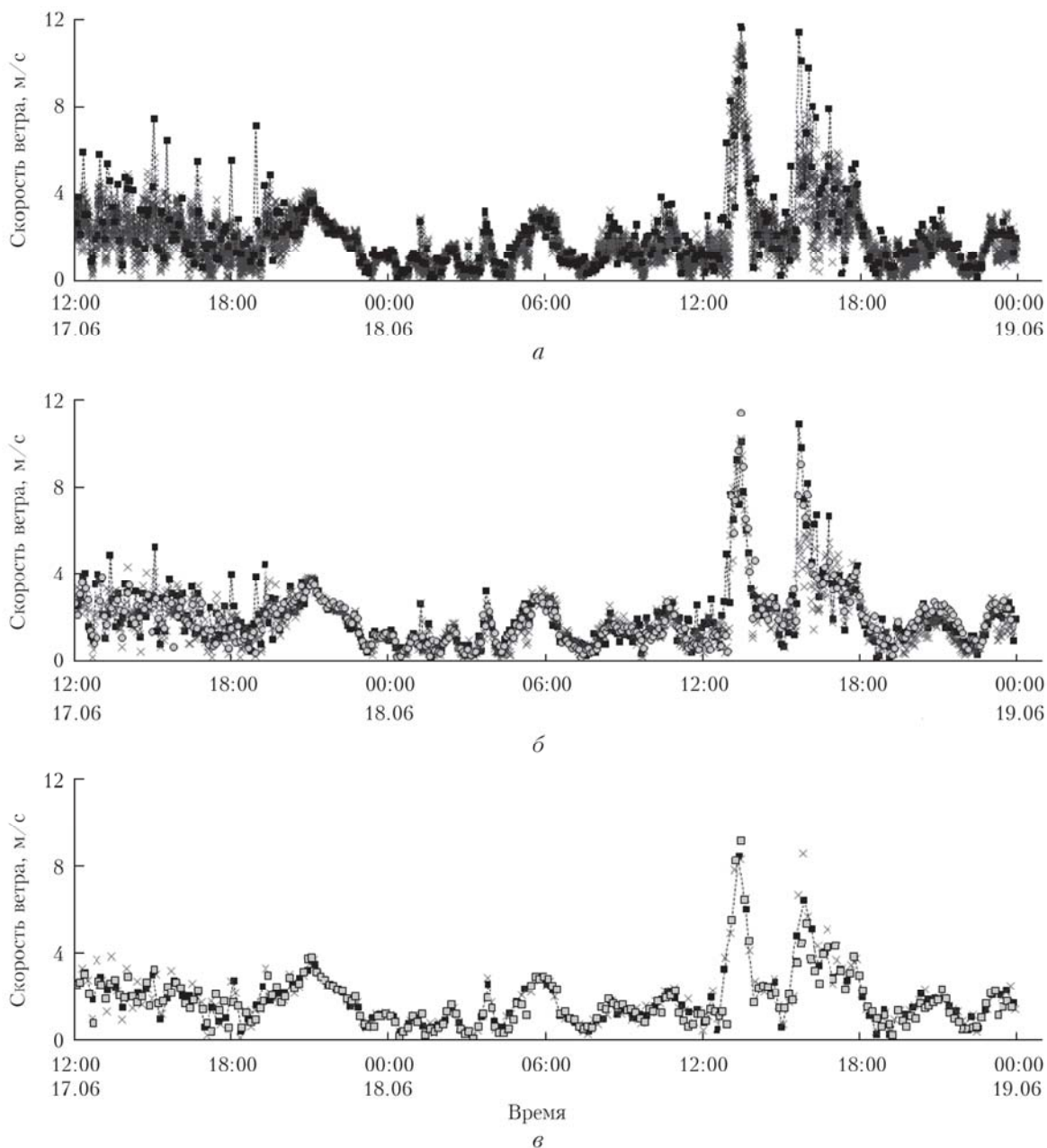


Рис. 3. Скорость ветра, получаемая из лидарных данных, в сравнении с данными акустической метеостанции: \times – среднее значение скорости из данных измерений акустической метеостанции; \blacksquare и \square – оценки, получаемые с помощью двухлучевого метода; \circ – оценки, получаемые с помощью конического сканирования: (а) – значения при 18,3-секундном усреднении; (б) – данные двухлучевого метода при 1,76-минутном усреднении, метеостанции – при 2-минутном, коническое сканирование в течении 3,3 мин; (в) – данные метеостанции при 10-минутном усреднении, двухлучевого метода – при усреднении за 7,25 и 13 мин

На рис. 5 и 6 с использованием значений, представленных на рис. 3 и 4, построены графики сравнения одновременных оценок скорости и угла направления ветра, рассчитанных из данных измерений лидаром с использованием двухлучевого метода и данных акустической метеостанции. Из графиков следует, что если время усреднения измеряемых лидаром компонент V_A и V_B больше 10 мин, то оценки скорости и угла направления ветра, по-

лучаемые с помощью двухлучевого метода, хорошо согласуются с данными измерений метеостанции и находятся в слабой зависимости от крупномасштабного турбулентного движения воздушных масс.

На рис. 7 и 8 приведены высотные профили скорости и направления ветра, полученные из лидарных измерений с помощью двухлучевого метода при времени усреднения, равном 1,76 мин, и при использовании конического сканирования зондирующим пучком.

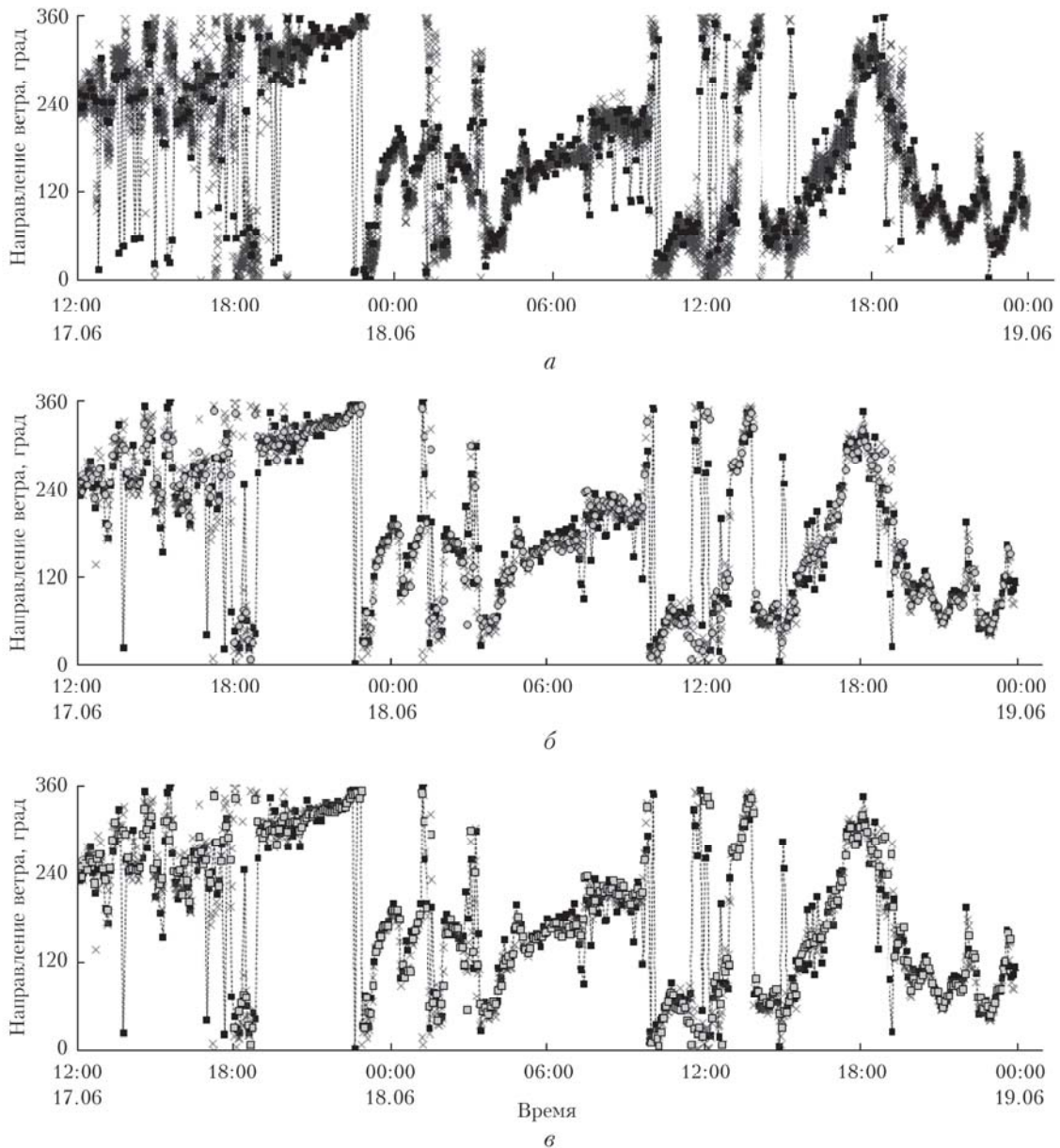


Рис. 4. Угол направления ветра, рассчитываемый из лидарных данных, в сравнении с данными акустической метеостанции (обозначения аналогичны рис. 3)

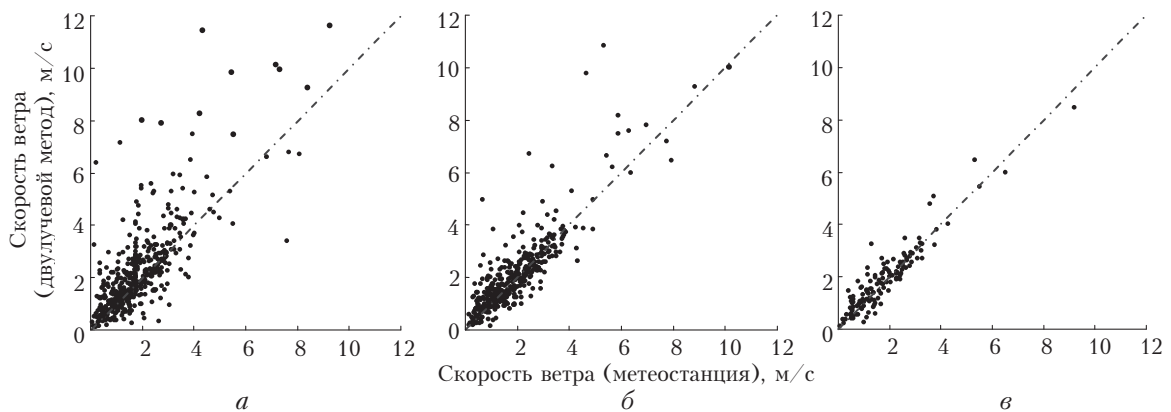


Рис. 5. Сравнение одновременных оценок скорости ветра, полученных с помощью двухлучевого метода, и данных акустической метеостанции на одной высоте при усреднении за 18,3 с (а); за 1,76 мин для двухлучевого метода и 2 мин для метеоданных (б); за 13 мин для двухлучевого метода и 10 мин для метеоданных (в)

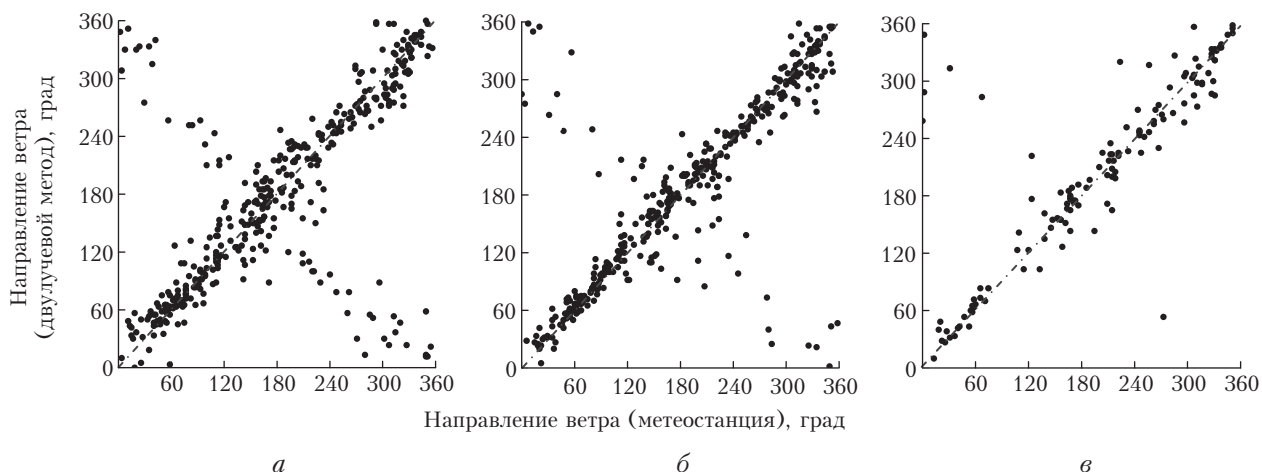


Рис. 6. Сравнение одновременных оценок угла направления ветра, полученных с помощью двухлучевого метода, и данных акустической метеостанции на одной высоте ((а), (б), (в) аналогично рис. 5)

Из рис. 7 и 8 видно, что пространственно-временные распределения скорости и угла направления ветра в обоих случаях имеют одинаковую структуру, но, как и должно быть, вследствие дополнительного пространственного усреднения при коническом сканировании они более сглажены.

Заключение

Представленные результаты экспериментального сравнения оценок скорости и направления ветра из данных лидарных измерений и акустической метеостанции иллюстрируют работоспособность двухлучевого метода. Этот метод может применяться для измерения вектора скорости ветра при малых значениях угла места, вплоть до горизонтальных атмосферных трасс, когда измерения с помощью конического сканирования зондирующим пучком невозможны. При использовании данного метода наличие крупномасштабной ветровой турбулентности ограничивает точность измерений. Для определения уровня ошибки вектора скорости ветра и выбора оптимальных параметров измерений импульсным когерентным доплеровским лидаром при наличии сильной крупномасштабной ветровой турбулентности необходимо проведение дальнейших численных и экспериментальных исследований.

Использование двухлучевого метода расширяет возможности применения доплеровского лидара Stream Line в изучении особенностей движений воздушных масс в приземном слое атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-42-700072.

1. *Banakh V.A., Smalikhov I.N.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 304 с.
2. *Smalikhov I.N.* Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2003. V. 20, N 2. P. 276–291.
3. *Banakh V.A., Брюер А., Пичугина Е.Л., Смалыхо И.Н.* Измерения скорости и направления ветра когерентным

доплеровским лидаром в условиях слабого эхосигнала // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 5. С. 333–340.

4. *Banakh V.A., Smalikhov I.N., Falits A.V., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Antokhin P.N.* Совместные радиозондовые и доплеровские лидарные измерения ветра в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 10. С. 911–916; *Banakh V.A., Smalikhov I.N., Falits A.V., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Antokhin P.N.* Joint radiosonde and Doppler lidar measurements of wind in the atmospheric boundary layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 2. P. 185–191.
5. *Banakh V.A., Smalikhov I.N., Rahm S.* Estimation of the refractive index structure characteristic of air from coherent Doppler wind lidar data // *Opt. Lett.* 2014. V. 39, N 5. P. 4321–4324.
6. *Wood C.R., Pauscher L., Ward H.C., Kotthaus S., Barlow J.F., Gouveia M., Lane S.E., Grimmond C.S.B.* Wind observations above an urban river using a new lidar technique, scintillometry and anemometry // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 442, N 1. P. 527–533.
7. *Lane S.E., Barlow J.F., Wood C.R.* An assessment of a three-beam Doppler lidar wind profiling method for use in urban areas // *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 2013. V. 119, N 8. P. 53–59.
8. *Смалыхо И.Н., Банах В.А., Фалиц А.В., Руди Ю.А.* Определение скорости диссипации энергии турбулентности из данных, измеренных лидаром «Stream Line» в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 10. С. 901–905.
9. *Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Тертугова С.А., Банах В.А., Смалыхо И.Н., Фалиц А.В., Рассказчикова Т.М., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б.* Структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным аэрозольного и доплеровского лидаров в период прохождения атмосферных фронтов // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 679–688.
10. *Banakh V.A., Smalikhov I.N., Suxarev A.A., Falits A.V.* Лидарная визуализация струйных течений и внутренних гравитационных волн в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 694–702.
11. *Smalikhov I.N., Banakh V.A., Holzäpfel F., Rahm S.* Method of radial velocities for the estimation of aircraft wake vortex parameters from data measured by coherent

- Doppler lidar // Opt. Express. 2015. V. 23, N 19. P. A1194–A1207.
12. *Smalikho I.N., Banakh V.A.* Estimation of aircraft wake vortex parameters from data measured with a 1.5- μm coherent Doppler lidar // Opt. Lett. 2015. V. 40, N 14. P. 3408–3411.
13. *Smalikho I.N., Banakh V.A., Pichugina Y.L., Brewer W.A., Banta R.M., Lundquist J.K., Kelley N.D.* Lidar investigation of atmosphere effect on a wind turbine wake // J. Atmos. Ocean. Technol. 2013. V. 30, N 11. P. 2554–2570.
14. *Смалихо И.Н., Пичугина Е.Л., Банах В.А., Брюер А.* Измерения импульсным когерентным лидаром параметров шлейфа, генерируемого ветряком при различных атмосферных условиях // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8. С. 91–95.

V.A. Banakh, I.N. Smalikho, A.V. Falits, E.V. Gordeev, A.A. Sukharev. **Stream Line Doppler lidar measurements of wind speed and direction with the duo-beam method in the atmospheric boundary layer.**

The results of retrieval of wind speed and direction from measurements of radial velocity by a Stream Line pulsed coherent Doppler lidar using the duo-beam method and conical scanning are presented. These results are compared with data of a sonic anemometer (point sensor).

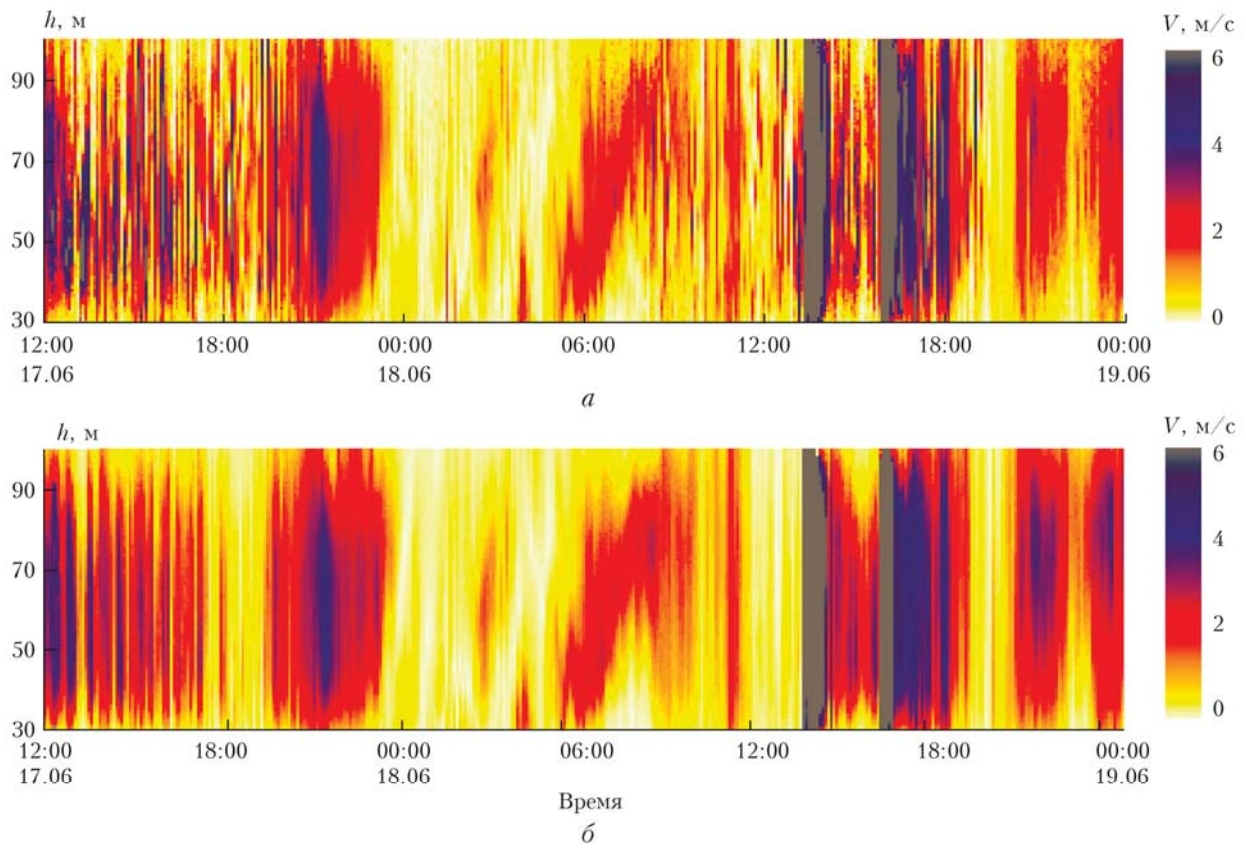


Рис. 7. Высотные профили скорости ветра: *a* – двухлучевой метод при времени усреднения 1,76 мин; *б* – коническое сканирование за 3,3 мин

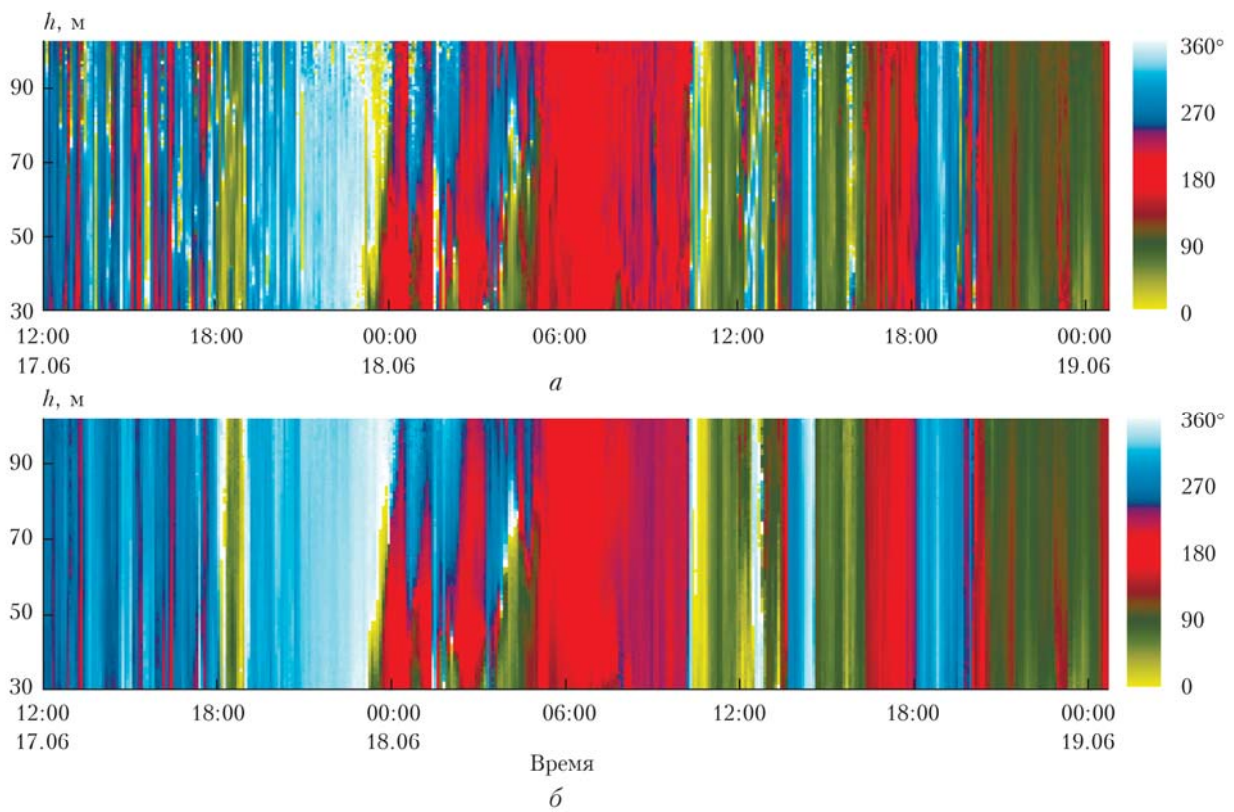


Рис. 8. Высотные профили угла направления ветра: *a* – двухлучевой метод при времени усреднения 1,76 мин; *б* – коническое сканирование за 3,3 мин