

УДК 550.388.2; 551.510.535

Верификация корреляционного пассивного оптического измерителя поперечной скорости ветра в экспериментах с доплеровским ветровым лидаром

А.Л. Афанасьев, В.А. Банах, Е.В. Гордеев, Д.А. Маракасов,
А.А. Сухарев, А.В. Фалиц*

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

Поступила в редакцию 25.05.2017 г.

Представлены результаты сравнительных экспериментов по измерению ветра, поперечного к заданному направлению, корреляционным методом с использованием разработанного в ИОА СО РАН макета пассивного оптического ветрового измерителя и когерентного доплеровского ветрового лидара Stream Line.

Ключевые слова: поперечный ветер, корреляционный пассивный измеритель, доплеровский лидар; crosswind, passive correlation meter, Doppler lidar.

Введение

В настоящее время для дистанционного измерения ветра и параметров ветровой турбулентности в нижней тропосфере, в пограничном и приземном слоях атмосферы используются различные приборы и методы. Все более широкое применение находят когерентные доплеровские ветровые лидары (КДВЛ), ставшие сейчас коммерчески доступными [1–5]. Еще один класс дистанционных методов основан на статистическом анализе пространственно-временной структуры турбулентных флуктуаций прошедшего атмосферную трассу оптического излучения. В отличие от лидаров, измеряющих скорость ветра в направлении зондирования и требующих пространственного сканирования лазерным пучком, флуктуационные методы позволяют определять поперечный к трассе вектор скорости без сканирования. Один из таких флуктуационных методов реализован в трассовых измерителях ветра, использующих в качестве источника света светодиодные матрицы [6]. Эти измерители также коммерчески доступны сегодня, хотя и не получили такого широкого распространения, как ветровые лидары.

Среди флуктуационных методов определения поперечной скорости ветра можно выделить пассивные методы, основанные на корреляционном анализе турбулентных искажений оптических изображений объектов, наблюдаемых при естественном освещении.

В отличие от методов просвечивания, они не требуют организации трассовых измерений. Однако на сегодняшний день не существует измерителей ветра, реализующих пассивный метод. Лишь недавно были опубликованы работы, показывающие, что пассивные оптические методы позволяют измерять усредненный вдоль заданного направления поперечный ветер в реальном времени [7, 8].

В настоящей работе представлены результаты сравнительных экспериментов по измерению поперечного ветра корреляционным методом с использованием разработанного в ИОА СО РАН макета пассивного оптического измерителя скорости поперечного ветра (ПОИСПВ) [8] и импульсного когерентного доплеровского ветрового лидара Stream Line. Показано, что результаты измерений поперечного ветра корреляционным пассивным методом согласуются с оценками поперечной к заданному направлению скорости ветра, рассчитываемыми из лидарных данных.

1. Коническое сканирование

1.1. Методика измерений

Измерения проводились в сентябре 2016 г. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Трасса видеонаблюдений длиной 3,25 км проходила над городской застройкой и поймой р. Ушайка. Макет ПОИСПВ находился на четвертом этаже корпуса ИОА СО РАН на высоте примерно 20 м над поверхностью земли, лидар — в долине реки на расстоянии 1,2 км от позиции ПОИСПВ (примерно на середине трассы). Высота трассы над подстилающей поверхностью изменялась от 20 м в точке нахождения макета до 90 м над местом расположения лидара.

* Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Евгений Викторович Гордеев (gordeev@iao.ru); Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru); Артем Андреевич Сухарев (sukharev@iao.ru); Андрей Вячеславович Фалиц (falits@iao.ru).

Рельеф местности в направлении наблюдений показан на рис. 2. В качестве мишеней для работы ПОИСПВ использовались удаленные топографические объекты – трубы ГРЭС и окна верхних этажей зданий.

Лидар осуществлял коническое сканирование зондирующим пучком вокруг вертикальной оси. В результате измерений получался массив оценок радиальной скорости (вдоль направления зондирования) $\hat{V}_r(R, \theta, \varphi)$, где R – расстояние от лидара до центра объема зондирования, θ – азимутальный угол, φ – угол места. Измерения радиальной скорости выполнялись для 600 значений азимутального угла θ с шагом $0,6^\circ$ и 110 расстояний с шагом 18 м вдоль каждого азимутального направления. Угол места φ для всего цикла измерений был неизменным и задавался равным $35,3^\circ$. Таким образом, массив оценок радиальной скорости, получаемых за одно полное сканирование, включал 600×110 значений. Одно сканирование занимало ~ 1 мин. Для каждого полного конического сканирования из измеренных оценок радиальных скоростей $\hat{V}_r(R, \theta, \varphi)$ рассчитывался высотный профиль модуля скорости и угла направления горизонтального ветра на высотах $h = R \sin \varphi$ с использованием метода фильтрованной синусоидальной подгонки [1]. Для высот $h = 70; 90; 110$ м вычислялись проекции горизонтальной скорости на поперечное к трассе ПОИСПВ направление. В результате были получены временные зависимости осредненного по времени (за 1 мин) и по

пространству (окружность радиусом ~ 130 м) поперечного ветра.

Ветровые лидары при использовании конического сканирования позволяют получать репрезентативную оценку средней скорости ветра в атмосфере [1]. Известно, что масштабы вариаций средней скорости на высотах, превышающих высоты неоднородностей подстилающей поверхности, составляют километры и десятки километров. Поэтому полученные лидарные оценки поперечного ветра в середине 3-километровой трассы без значительной погрешности можно отнести ко всей трассе.

Макет ПОИСПВ измерял случайные смещения координат энергетических центров тяжести (ЭЦТ) бинокулярных изображений удаленных объектов (труб ГРЭС и окон высотных зданий). По полученным синхронизированным временным рядам случайных смещений определялись взаимные корреляционные функции для горизонтальных смещений координат ЭЦТ. Для измерений усредненного вдоль трассы поперечного ветра необходимо разнести приемники/источники вдоль направления искомого ветра, тогда вклады в корреляционную функцию будут собираться со всей трассы. В экспериментах оба приемных объектива были сфокусированы на один и тот же объект. При этом задержка в точке максимума корреляционной функции $\tau_m = \rho/2V$, где ρ – разнос объективов (15 см), V – интегральная вдоль трассы скорость поперечного горизонтального ветра [7, 8].

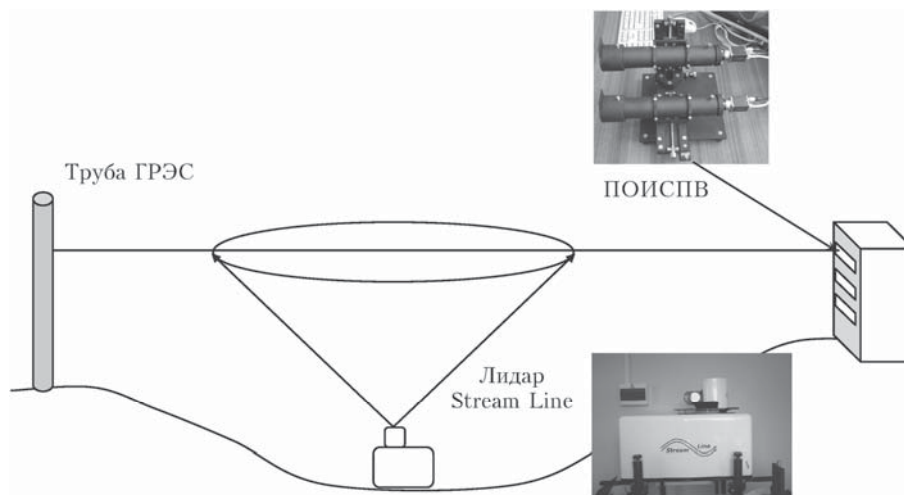


Рис. 1. Схема эксперимента

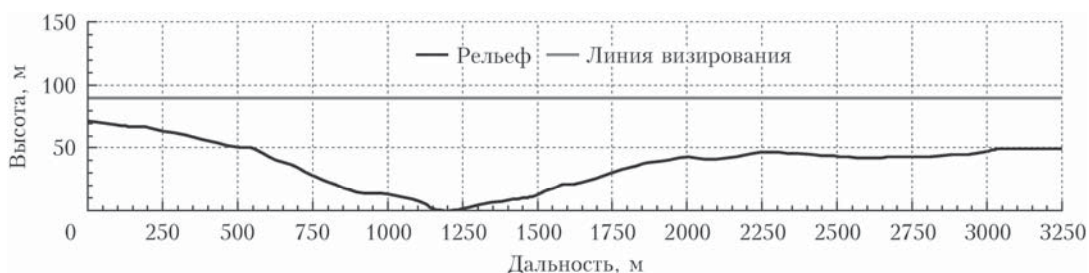


Рис. 2. Высотный профиль трассы измерений

1.2. Результаты экспериментов

Результаты оценивания поперечной скорости ветра из данных одновременных измерений обоими приборами представлены на рис. 3.

Время усреднения составляло 1 мин. Наилучшее соответствие рядов оценок скорости имеет место для высоты 90 м над позицией лидара, что соответствует профилю оптической трассы ПОИСПВ (см. рис. 2). Значения коэффициентов корреляции усредненных рядов и среднеквадратического отклонения (СКО) их разности при различных временах усреднения представлены в табл. 1.

Таблица 1
Статистические характеристики оценок поперечного ветра

Время усреднения, с	Коэффициент корреляции	СКО, м/с
60	0,48	0,85
120	0,56	0,76
240	0,54	0,73
300	0,50	0,74

Видно, что полученные оценки поперечной скорости указанным методами согласуются с коэффициентом корреляции примерно 0,5. Увеличение временного интервала усреднения слабо сказывается как на коэффициенте корреляции, так и на СКО, что свидетельствует о достаточном усреднении измеряемых данных за 1 мин. Различие в объемах усреднения по пространству для лидара и ПОИСПВ приводит к определенным отличиям в величине и динамике оценок скорости, с относительным СКО на уровне 20%.

Полученные результаты дают основание считать, что с относительной статистической погрешностью 20–25% макет ПОИСПВ позволяет измерять интегральную поперечную к линии визирования компоненту скорости ветра в условиях естественной дневной освещенности на трассах длиной 3 км и более.

2. Двухлучевой метод

2.1. Методика измерений

Другой метод, позволяющий получить с помощью КДВЛ оценку поперечной к трассе компоненты скорости ветра, был реализован следующим образом. Лидар располагался в начале трассы, на расстоянии 2–3 м от ПОИСПВ. Радиальная компонента скорости ветра измерялась попеременно по двум направлениям, отклоняющимся от оптической трассы ПОИСПВ на углы $\pm \varphi/2$ в горизонтальной плоскости. В этом случае оценка поперечной к трассе ПОИСПВ компоненты скорости ветра на расстоянии R рассчитывается по формуле

$$V = \frac{V_L(R, \varphi/2) - V_L(R, -\varphi/2)}{2\sin(\varphi/2)}, \quad (1)$$

где $V_L(R, \pm \varphi/2)$ – лидарная оценка радиальной скорости ветра на соответствующем луче. Оценка интегральной поперечной скорости получалась посредством усреднения (1) вдоль трассы ПОИСПВ.

Недостатком данной схемы является то, что измерения на лучах $\pm \varphi/2$ производятся не одновременно, а это может приводить к погрешности в оценке

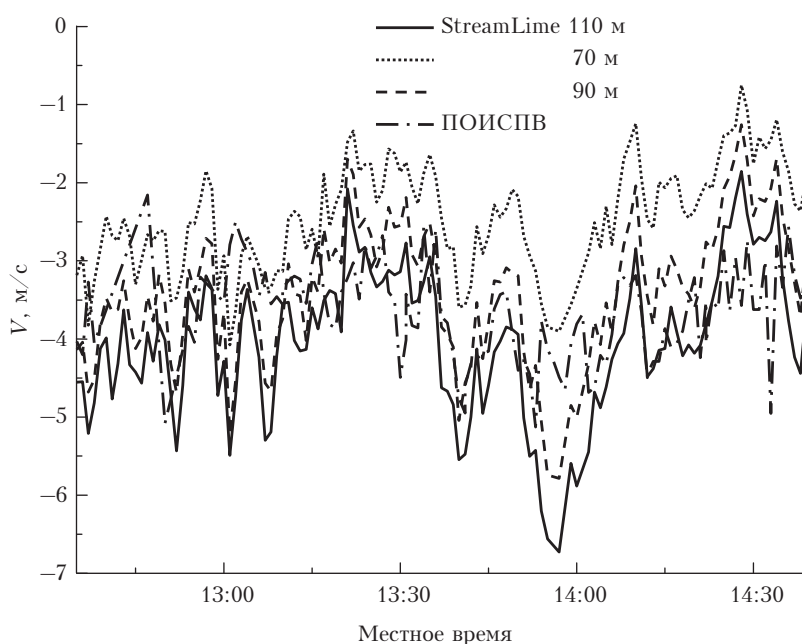


Рис. 3. Результаты измерения поперечного ветра лидаром Stream Line на высотах 70, 90 и 110 м и ПОИСПВ 23.09.2016 г.

поперечной скорости по формуле (1), особенно заметной при небольших углах φ . Увеличение же угла приводит к ошибкам уже за счет пространственных вариаций вектора полной скорости ветра. Увеличения разброса оценок поперечной скорости ветра из лидарных измерений можно компенсировать усреднением по времени.

Измерения проводились на двух трассах. В июле 2016 г. были проведены эксперименты на полигоне БЭК ИОА СО РАН на трассе длиной 500 м. Высотный профиль трассы представлен на рис. 4. Угол отклонения лидарных линий зондирования от трассы ПОИСПВ составлял $\pm 10^\circ$, а шаг вдоль линии зондирования $\Delta R = 18$ м. Параллельно с лидаром и ПОИСПВ скорость ветра измерялась метеостанцией АМК-03, располагавшейся на расстоянии около 100 м от начала трассы.

В сентябре 2016 г. измерения проводились на той же трассе, что и в разд. 1, но лидар располагался в одном помещении с ПОИСПВ. Метеостанция была вынесена на крышу корпуса ИОА СО РАН.

2.2. Результаты экспериментов

Результаты оценивания поперечной скорости ветра из данных одновременных измерений тремя приборами на полигоне БЭК ИОА СО РАН показаны на рис. 5.

Видно неплохое согласие временных ходов оценок скорости ветра всеми тремя измерителями. В то же время оценка ПОИСПВ имеет наименьший разброс, данные метеостанции – промежуточный, лидарные данные – наибольший. Причина увеличения разброса оценок поперечной скорости двухлучевым методом поясняется в подразд. 2.1. Для метеостанции повышенный по сравнению с ПОИСПВ разброс является следствием локальности оценок ветра – при измерении интегральной скорости локальные порывы усредняются. Отметим также, что оценка ветра метеостанцией в среднем на четверть завышена относительно интегральных оценок ПОИСПВ и лидара, что может объясняться наличием регулярного профиля ветра на трассе вследствие заметных перепадов высоты над подстилающей поверхностью.

Статистические характеристики оценок ветра ПОИСПВ и лидаром по двухлучевой схеме приведены в табл. 2: средние значения оценок пассивным методом ($\langle V_p \rangle$) и из лидарных данных ($\langle V_L \rangle$) за весь период измерений, коэффициент корреляции

временных рядов оценок и их среднеквадратическое отклонение при различных интервалах усреднения.

20 июля наблюдались в основном вариации ветра с небольшими (от нескольких секунд до нескольких минут) временными масштабами. Это заметно снижает коэффициент корреляции в силу различий в геометрии измерений; от времени усреднения он зависит слабо. Средние за весь интервал измерений оценки скорости пассивным и двухлучевым методами практически не отличаются (расхождение $\sim 3\%$).

19 июля имели место заметные (от 2 до 5 м/с) вариации среднего ветра на больших временных интервалах, которые хорошо отслеживались обоими приборами. Это привело к заметному повышению коэффициента корреляции, в особенности для 12-минутного интервала усреднения. Взаимные отклонения рядов оценок заметно уменьшаются с увеличением времени усреднения, поскольку отфильтровываются флуктуации, мелкомасштабные как во времени, так и в пространстве, крупномасштабные же флуктуации попадают в область измерения обоих приборов.

Оценки поперечной скорости ветра из данных одновременных измерений тремя приборами на трассе длиной 3,25 км над городской застройкой приведены на рис. 6.

Результат аналогичен полученному на короткой трассе – наибольший разброс имеют лидарные данные; по среднему значению данные измерений интегральной скорости ветра обоими приборами близки друг другу, но есть заметные отличия от локальных измерений средней скорости ветра метеостанцией.

Заключение

Представленные в статье результаты работы показывают, что измерения поперечной к линии визирования скорости ветра корреляционным пассивным методом согласуются с оценками поперечного ветра из данных доплеровского лидара как на приповерхностных приземных трассах, так и на приподнятых над поверхностью Земли горизонтальных трассах. Репрезентативность оценивания скорости ветра из лидарных данных сильно зависит от интенсивности ветровой турбулентности. Этим объясняется то, что выполненные в работе лидарные измерения поперечной скорости ветра на приподнятых трассах лучше согласуются с данными измерений поперечного ветра пассивным измерителем, чем на приповерхностных, на которых влияние турбулентности более существенно.



Рис. 4. Высотный профиль трассы на полигоне БЭК

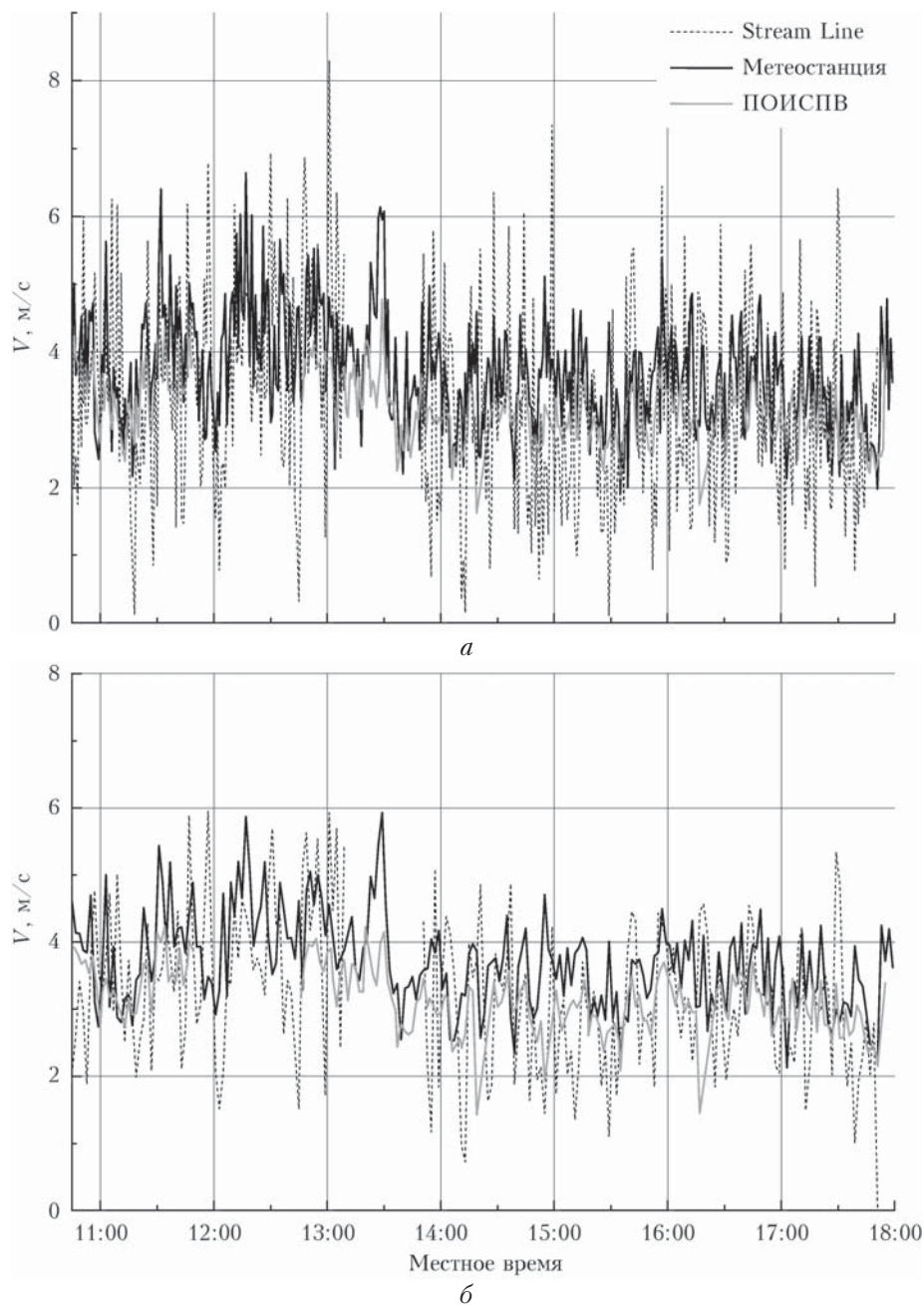


Рис. 5. Оценки скорости поперечного ветра на полигоне БЭК тремя измерителями 20.07.2016 г. Время усреднения 1 мин (а) и 2 мин (б)

Таблица 2

Статистические характеристики оценок поперечного ветра ПОИСПВ и лидаром по двухлучевой схеме на полигоне БЭК ИОА СО РАН

Время измерений	$\langle V_P \rangle$, м/с	$\langle V_L \rangle$, м/с	Время усреднения, с	Коэффициент корреляции	СКО, м/с
20.07.2016 г., 14:00 ÷ 17:40	3,1	3,2	90	0,31	1,21
			120	0,38	0,94
			240	0,47	0,64
			300	0,54	0,49
			720	0,46	0,39
19.07.2016 г., 13:00 ÷ 15:40	3,2	3,6	90	0,61	1,36
			120	0,59	1,24
			240	0,75	0,89
			300	0,84	0,78
			720	0,89	0,68

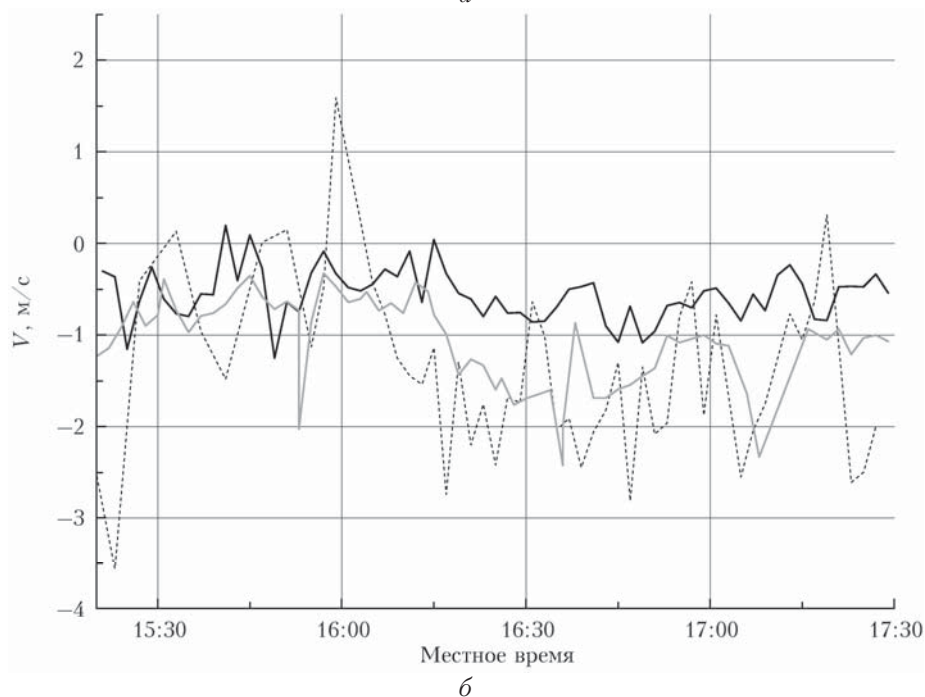
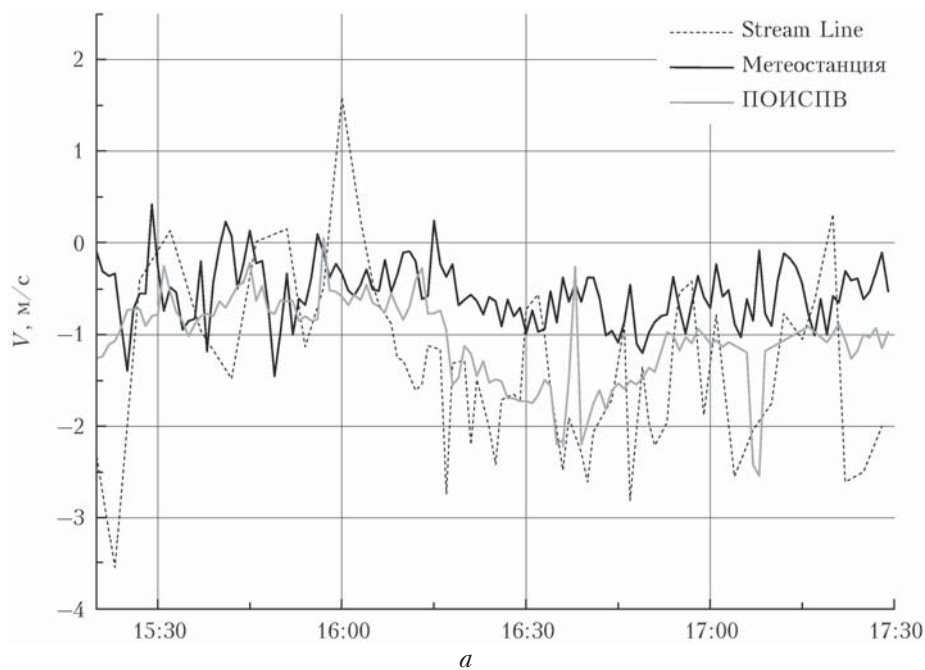


Рис. 6. Оценки скорости поперечного ветра на трассе длиной 3,25 км тремя измерителями 21.09.2016 г. Время усреднения 1 мин (а) и 2 мин (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-04210).

1. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 304 с.
2. *Pierson G., Davies F., Collier C.* An analysis of performance of the UFAM pulsed Doppler lidar for the observing the boundary layer // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2009. V. 26, N 2. P. 240–250.
3. *Vakkari V., O'Connor E.J., Nisantzi A., Mamouri R.E., Hadjimitsis D.G.* Low-level mixing height detection in

- coastal locations with a scanning Doppler lidar // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 1875–1885.
4. *Van Dinter D., Wood C.R., Hartogensis O.K., Nordbo A., O'Connor E.J.* Observing crosswind over urban terrain using scintillometer and Doppler lidar // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 1901–1911.
5. *Banakh V.A., Smalikho I.N.* Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of atmosphere on the coast of Lake Baikal // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9. P. 5239–5248.
6. *BLS2000 Large Aperture Scintillometer for Very Long Paths.* 2012. URL: www.scintec.com

7. *Маракасов Д.А.* Оценка средней скорости ветра из корреляции смещений центров тяжести изображений некогерентных источников в турбулентной атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 294–299.

8. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Гордеев Е.В., Маракасов Д.А., Разенков И.А., Ростов А.П.* Макет пассивного оптического измерителя среднего поперечного ветра // Аэрозоли Сибири. XXIII Рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 96.

A.L. Afanasiev, V.A. Banakh, E.V. Gordeev, D.A. Marakasov, A.A. Sukharev, A.V. Falits. **Verification of passive correlation optical crosswind velocity meter in experiments with Doppler wind lidar.**

The results of comparative experiments on measurement of the crosswind velocity by the passive correlation optical method and with a coherent Doppler wind lidar are analyzed. A crosswind velocity meter, developed at Institute of Atmospheric Optics SB RAS, was used in the passive correlation optical measurements.