

УДК 551.521

В. И. Козинцев, С. Е. Иванов,  
М. Л. Белов, В. А. Городничев

## ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

*Описан лазерный метод определения пространственного распределения скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы. Показано, что измерение размера аэрозольных неоднородностей вдоль трассы зондирования и изменение размера измерительной базы в соответствии с найденным критерием позволяют повысить точность оперативного определения скорости ветра корреляционными лидарами с малой измерительной базой.*

**E-mail:** [ekomonit@mx.bmstu.ru](mailto:ekomonit@mx.bmstu.ru)

**Ключевые слова:** измерение скорости ветра, корреляционный лидар, оперативный метод.

Необходимость оперативного получения пространственного распределения параметров ветра, а также данных о ветре, усредненных по трассе, требует развития дистанционных методов измерения скорости и направления атмосферного ветра. Существующие лидарные методы зондирования могут обеспечить решение этой задачи. Наиболее простыми из них (и требующими менее дорогую аппаратуру) являются корреляционные методы [1, 2].

В большинстве случаев время накопления информации ветровыми корреляционными лидарами составляет единицы и десятки минут. Во многих технических приложениях необходима более высокая оперативность получения значений скорости ветра (десятки и единицы секунд) [1–3]. Лидарные методы могут обеспечить необходимое сокращение времени накопления информации. При этом естественный путь заключается в использовании лидаров с малой измерительной базой [1, 2]. Однако точность определения параметров ветра в этом случае сильно зависит от размеров измерительной базы, размера аэрозольных неоднородностей атмосферы и отношения сигнал/шум (ОШ).

Далее описывается метод, позволяющий при использовании малой измерительной базы и коротких зондирующих импульсов увеличить точность оперативного определения пространственного распределения скорости и направления ветра. Метод использует оперативное измерение размера аэрозольных неоднородностей вдоль трассы зондирования и изменение размера измерительной базы по данным этих

измерений (чтобы сделать измерительную базу оптимальной с точки зрения возможных погрешностей определения скорости ветра).

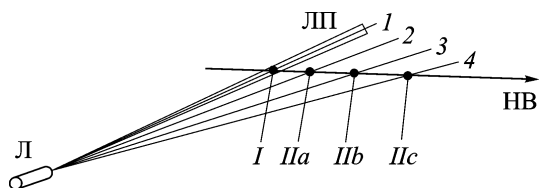
Выбор оптимального размера  $\xi_0$  измерительной базы для корреляционного метода измерения скорости ветра обсуждался в работе [1]. Показано, что оптимальным является выбор измерительной базы  $\xi_0$  порядка размера  $d$  аэрозольных неоднородностей атмосферы. Однако этот вывод был сделан для достаточно больших времен наблюдения, когда аэрозольные неоднородности могут разрушаться и, пройдя первую точку измерительной базы, могут не дойти до второй точки измерительной базы (если ее размер  $\xi_0$  будет много больше  $d$ ).

Вопрос о выборе оптимального размера измерительной базы в условиях оперативных измерений (когда время измерения мало — единицы секунд) остается не ясным. Аэрозольные неоднородности атмосферы в большинстве случаев не успевают разрушаться [1], проходя от первой до второй точки измерительной базы (для малой измерительной базы), и оптимальный размер измерительной базы должен определяться не только размером аэрозольных неоднородностей, но и временем наблюдения, требуемой минимальной измеряемой скоростью ветра и ОСШ. При этом сами размеры аэрозольных неоднородностей атмосферы (и время их жизни, зависящее от размера неоднородностей) изменяются в широком диапазоне в зависимости от атмосферных условий [1], и поэтому необходимо предварительное зондирование атмосферы для оперативной оценки характеристик аэрозольных неоднородностей вдоль трасс зондирования.

Рассмотрим сначала случай, когда направление ветра известно, тогда единственным параметром, который надо определить, является скорость ветра.

На рис. 1 показана геометрическая схема измерений корреляционного ветрового лидара с малой измерительной базой, короткими зондирующими импульсами и сканирующим в горизонтальной плоскости лазерным пучком.

Данная схема позволяет проводить оперативные измерения горизонтальной скорости ветра вдоль трасс зондирования. На рис. 1 введены следующие обозначения: Л — лидар; ЛП — лазерный пучок; НВ — направление ветра; 1, 2, 3, 4, ... — положение оптической оси лидара



**Рис. 1. Геометрическая схема измерений скорости ветра (направление ветра известно)**

при сканировании;  $I$  — положение первой точки измерительной базы;  $IIa, IIb, IIc$  — возможные положения второй точки измерительной базы.

Лидар  $L$  облучает атмосферу узким лазерным пучком ЛП, сканирующим в горизонтальной плоскости в пределах некоторого небольшого угла сканирования (порядка единиц градусов). Лазерный импульс (для каждого положения оптической оси лидара при сканировании) рассеивается на атмосферном аэрозоле (во всех направлениях, в том числе и в направлении назад на лидар) и поступает в приемную систему лидара. Принимаемое излучение стробируется по дальности, так что регистрируемые значения сигналов (для каждого положения оптической оси лидара при сканировании) соответствуют сигналам от последовательности локальных объемов измерения вдоль соответствующей ( $1, 2, 3, 4, \dots$ ) трассы зондирования.

При известном направлении ветра измерительная база должна располагаться вдоль этого направления [1]. Пусть первая точка измерительной базы  $I$  находится на некотором расстоянии от лидара. Тогда вторая точка измерительной базы  $II$  должна находиться на линии НВ на некотором оптимальном (с точки зрения точности измерения скорости ветра) расстоянии от точки  $I$  (в одной из точек  $IIa, IIb, IIc, \dots$ ).

Для определения оптимального размера измерительной базы (расстояния от точки  $I$  до точки  $II$ ) проводилось математическое моделирование и исследование зависимости погрешности измерения скорости ветра от размера измерительной базы.

Для математического моделирования был создан комплекс программ, имитирующий работу лазерного измерителя скорости атмосферного ветра. Комплекс программ включает в себя блок моделирования двумерных полей аэрозольных неоднородностей и блок расчета принимаемых сигналов от зондируемых объемов атмосферы при наличии шума измерения. При математическом моделировании не рассматривались флуктуации скорости ветра, т.е. во время всего измерения (единицы секунд) скорость и направление ветра считались постоянными. Во время проведения измерений использовалась гипотеза замороженности неоднородностей атмосферы, т.е. считалось, что неоднородности переносятся в атмосфере под действием среднего ветра, не изменяя своей формы. В этом случае корреляционный метод определения скорости ветра  $V$  может быть упрощен [1]:

$$V = \frac{\xi_0}{\tau},$$

где  $\xi_0$  — измерительная база (расстояние от точки  $I$  до точки  $II$  вдоль линии НВ),  $\tau$  — временной сдвиг корреляционной функции двух сигналов, регистрируемых от рассеивающих объемов атмосферы в точках  $I$  и  $II$  (узкий лазерный пучок и короткие зондирующие импульсы

позволяют достаточно точно локализовать рассеивающие объемы атмосферы).

В работе [4] показано, что использование вместо корреляционной функции структурной дает меньшие погрешности измерения скорости ветра, поэтому при проведении моделирования для определения  $\tau$  была использована структурная функция сигналов (временной сдвиг  $\tau$  соответствует минимуму структурной функции двух сигналов, регистрируемых от рассеивающих объемов атмосферы в точках I и II).

Математическое моделирование проводилось для разных размеров аэрозольных неоднородностей атмосферы, различных ОСШ (шум считался белым, распределенным по нормальному закону, со средним значением, равным нулю, и заданной дисперсией), в широком диапазоне скоростей ветра (большой диапазон скоростей ветра обусловлен тем, что во многих прикладных задачах наиболее существенным является повышение точности измерений именно при больших скоростях ветра). Время измерения составляло 5 с. Частота повторения лазерных импульсов принималась равной 200 Гц. Задаваемые при математическом моделировании параметры атмосферных неоднородностей соответствовали условиям приземного слоя атмосферы [4]. Трасса зондирования считалась горизонтальной.

На рис. 2 приведены зависимости средних (по 500 реализациям полей аэрозольных неоднородностей атмосферы) модулей погрешностей измерения скорости ветра  $\Delta V$  от измерительной базы  $\xi_0$  для размера неоднородностей  $d = 5$  м (измерительная база расположена вдоль направления ветра).

В общем случае на оптимальный (с точки зрения погрешностей измерения скорости ветра) размер измерительной базы влияет много факторов. С одной стороны (при большом времени наблюдения), чем больше измерительная база, тем меньше погрешности измерений скорости ветра. С другой стороны, чем больше измерительная база, тем

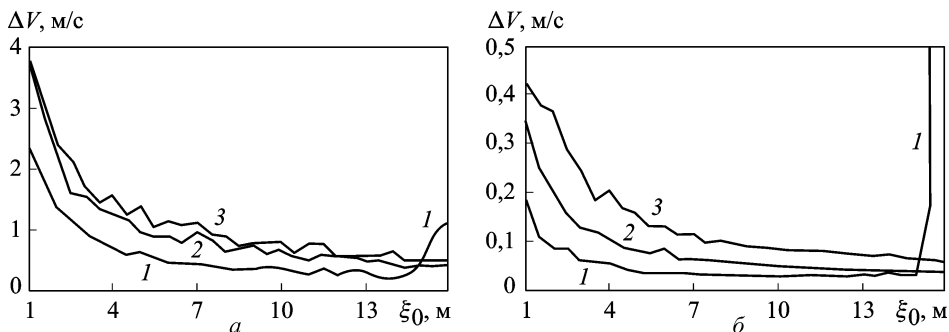


Рис. 2. Зависимость погрешностей измерения скорости ветра  $V$  от измерительной базы  $\xi_0$ . Направление измерительной базы — вдоль направления ветра; ОСШ = 5 (а), 50 (б);  $V = 4$  (1); 8 (2) и 12 (3) м/с

(при ограниченном времени наблюдения) меньше общее перекрытие сигналов, регистрируемых в точках *I* и *II* измерительной базы, и больше погрешности измерения скорости ветра (особенно при небольшом, ОСШ).

Результаты математического моделирования, приведенные на рис. 2, показывают, что наименьшие погрешности измерения скорости ветра получаются при измерительной базе  $\xi_0 \sim 14$  м для небольшого ОСШ = 5 (рис. 2, *a*) и измерительной базе  $\xi_0 \sim 10 \dots 14$  м для большого ОСШ = 50 (рис. 2, *b*).

Выбор необходимого размера измерительной базы при произвольном (известном) направлении ветра обеспечивается возможностью локализации в пространстве локальных объемов измерения в точках *I* и *II* за счет углового сканирования узкого лазерного пучка и использования лазера с короткими зондирующими импульсами.

В условиях реальных измерений нельзя заранее знать: справедлива или нет гипотеза замороженности неоднородностей атмосферы во время проведения измерений. Поэтому заранее нельзя определить, какую измерительную базу лучше (в смысле обеспечения наименьших погрешностей измерения скорости ветра) использовать: базу, выбранную, как указано ранее (для условий замороженности неоднородностей), или базу, равную размеру аэрозольных неоднородностей атмосферы (для условий, когда аэрозольные неоднородности могут разрушаться за время наблюдения).

Однако этот вопрос можно решить оперативно в процессе измерений. Результаты проведенного математического моделирования показывают, что погрешности измерения скорости ветра зависят от некоторого параметра  $\Lambda = \frac{\Delta_{\min}}{\xi_0^{1/2}}$ , где  $\Delta_{\min}$  — минимальное значение структурной функции реализаций сигналов, измеренных в точках *I* и *II*, т.е. значение структурной функции при наилучшем совмещении реализаций сигналов, для которого определяется временной сдвиг, используемый для измерения скорости ветра. Поэтому методика оперативного выбора измерительной базы может быть следующей.

1. Проведение зондирования атмосферы вдоль начального положения 1 оптической оси лидара. Использование полученной реализации сигнала (она определяется пространственной реализацией показателя обратного аэрозольного рассеяния атмосферы вдоль трассы 1) для оценки характерного размера *d* аэрозольных неоднородностей атмосферы.

2. Измерение реализаций сигналов для измерительной базы *A*, выбранной, как указано ранее (по минимуму погрешностей измерения скорости ветра), и для измерительной базы *B*, равной размеру *d* аэрозольных неоднородностей атмосферы.

3. Вычисление параметра  $\Lambda$  для измерительной базы  $A$  и базы  $B$ .

4. Выбор измерительной базы, для которой параметр  $\Lambda$  меньше.

В табл. 1 приведены результаты математического моделирования работы корреляционного метода измерения скорости ветра при известном направлении ветра. Здесь показаны средние (по 500 реализациям полей аэрозольных неоднородностей атмосферы) модули погрешностей измерения скорости ветра  $\Delta V$  для измерительной базы  $A$  (равной 10 и 14 м) и измерительной базой  $B$  (равной размеру неоднородностей). В скобках даны значения  $k\Lambda$  ( $k$  – некоторый числовой коэффициент). Данные, приведенные в табл. 1, получены для размеров неоднородностей  $d = 5$  м и для скоростей ветра  $V = 4, 8$  и  $12$  м/с при ОСШ = 2, 5 и 50.

Таблица 1

**Погрешности измерения скорости ветра (измерительная база располагается вдоль направления ветра)**

ОСШ	$\xi_0 = 5$ м			$\xi_0 = 10$ м			$\xi_0 = 14$ м		
	Скорость ветра, м/с								
	4	8	12	4	8	12	4	8	12
2	1,5 (19,2)	3,5 (21,0)	5,1 (21,9)	1,0 (12,6)	2,0 (15,2)	3,7 (16,4)	1,0 (10,5)	1,6 (12,7)	3,0 (13,1)
5	0,7 (3,6)	1,0 (4,0)	1,3 (4,1)	0,4 (2,4)	0,5 (2,8)	0,7 (3,0)	0,3 (1,9)	0,4 (2,4)	0,6 (2,5)
50	0,04 (0,05)	0,08 (0,07)	0,15 (0,09)	0,03 (0,04)	0,05 (0,05)	0,08 (0,07)	0,03 (0,03)	0,04 (0,04)	0,07 (0,06)

Из табл. 1 следует преимущество выбора размера измерительной базы  $A$  над выбором измерительной базой  $B$  при проведении оперативных измерений скорости ветра в случае, когда измерительная база располагается вдоль направления ветра. Видно, что по значению параметра  $\Lambda$  можно судить о погрешностях измерения скорости ветра  $\Delta V$ : как правило, если для базы  $A$  параметр  $\Lambda$  меньше (чем для базы  $B$ ), то и погрешности  $\Delta V$  для базы  $A$  меньше (и наоборот).

Рассмотрим случай, когда направление ветра неизвестно и его надо определять совместно со скоростью ветра. При оперативных измерениях это является сложной задачей. Для ее решения исследуем сначала вопрос: с какой точностью надо определять направление ветра, чтобы выводы, изложенные ранее (о выборе оптимального размера измерительной базы) были справедливы.

На рис. 3 и в табл. 2 показаны результаты моделирования, аналогичные приведенным на рис. 2 и в табл. 1 (и при тех же значениях параметров), но при наличии между скоростью ветра и измерительной базой угла  $\alpha$  (рис. 3, табл. 2).

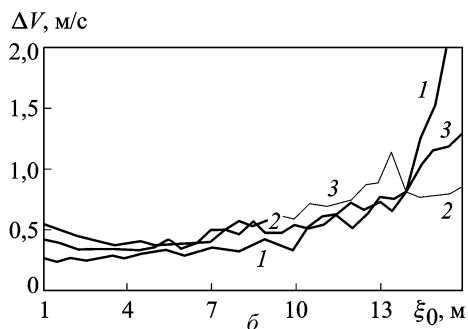
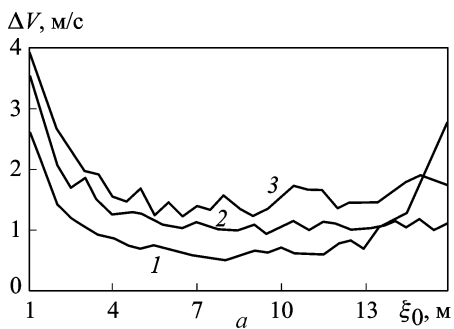


Рис. 3. Зависимость погрешностей измерения скорости ветра от измерительной базы. Угол между скоростью ветра и измерительной базой равен  $7,5^\circ$ : ОСШ = 5 (а), 50 (б)

Таблица 2

**Погрешности измерения скорости ветра (направление измерительной базы отличается на угол  $\alpha$  от направления ветра)**

ОСШ	$\alpha,^\circ$	$\xi_0 = 5 \text{ м}$			$\xi_0 = 10 \text{ м}$			$\xi_0 = 14 \text{ м}$		
		Скорость ветра, м/с								
		4	8	12	4	8	12	4	8	12
2	5	1,9 (19,2)	3,3 (21,0)	5,5 (22,4)	1,0 (13,0)	2,4 (15,2)	3,7 (16,1)	1,3 (10,9)	1,8 (12,7)	3,3 (13,5)
	7,5	1,8 (20,1)	3,4 (21,5)	5,6 (22,4)	1,0 (13,3)	2,5 (15,5)	3,8 (15,2)	1,7 (12,0)	2,1 (13,5)	3,7 (13,8)
5	5	0,6 (3,8)	1,1 (4,2)	1,3 (4,4)	0,4 (2,8)	0,8 (3,3)	1,1 (3,5)	0,7 (2,4)	0,7 (3,0)	1,0 (3,4)
	7,5	0,7 (4,0)	1,1 (4,4)	1,3 (4,6)	0,7 (3,2)	1,0 (3,8)	1,6 (4,0)	0,9 (2,9)	1,0 (3,9)	1,5 (4,4)
50	5	0,19 (0,22)	0,23 (0,27)	0,26 (0,31)	0,20 (0,41)	0,32 (0,60)	0,35 (0,63)	0,48 (0,52)	0,41 (0,90)	0,40 (1,01)
	7,5	0,3 (0,45)	0,4 (0,54)	0,4 (0,58)	0,5 (0,85)	0,6 (1,26)	0,6 (1,30)	0,9 (1,01)	0,7 (1,72)	1,0 (2,02)

Из рис. 2, 3 и табл. 1, 2 следует, что при  $\alpha = 0$  и  $5^\circ$  погрешности не сильно отличаются (исключение составляет случай ОСШ = 50). При  $\alpha = 7,5^\circ$  значения  $\Delta V$  уже существенно возрастают. Таким образом, неточность  $5^\circ$  в определении направления ветра в большинстве случаев является вполне приемлемой для справедливости выводов, изложенных ранее (для случая точного совпадения направления ветра и направления измерительной базы), о выборе оптимального размера измерительной базы. Исключение составляет лишь случай большого значения ОСШ (равного 50) — для него уже при  $\alpha = 5^\circ$  выбор измерительной базы А не дает преимуществ в точности измерения скорости ветра над выбором измерительной базы Б.

Отметим также, что параметр  $\Lambda$  в целом хорошо коррелирует с погрешностями измерения скорости ветра  $\Delta V$ . Исключение составляют

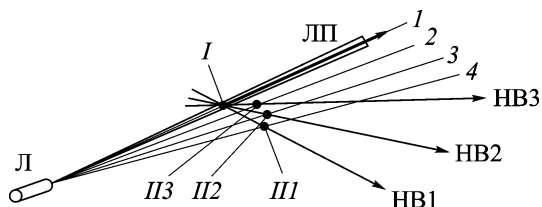


Рис. 4. Геометрическая схема измерений скорости и направления ветра

лишь случаи, когда параметры  $\Lambda$  и соответственно погрешности  $\Delta V$  для баз  $A$  и  $B$  близки. В этих случаях большему значению параметра  $\Lambda$  иногда могут соответствовать меньшие погрешности  $\Delta V$  (это, видимо, связано с ограниченностью числа используемых для усреднения реализаций полей аэрозольных неоднородностей). Однако, если параметры  $\Lambda$  и погрешности  $\Delta V$  для баз  $A$  и  $B$  близки, то безразлично, какая из баз будет выбрана.

Одна из схем для оперативных измерений, обеспечивающая одновременное измерение скорости и направления ветра, приведена на рис. 4. На рисунке обозначено: Л — лидар; ЛП — лазерный пучок; 1, 2, 3, 4, ... — положение оптической оси лидара при сканировании; НВ1, НВ2, НВ3, ... — направления измерительных баз (их число определяется требуемой точностью измерения направления ветра). Если специальных требований к точности измерения направления не выдвигается, то в секторе углов  $180^\circ$  при приемлемой погрешности  $5^\circ$  в определении направления ветра число направлений измерительных баз будет равно 19 (учет знака сдвига реализаций сигналов, регистрируемых в точках  $I$  и  $II$ , позволяет рассматривать направления измерительных баз не во всем секторе углов  $360^\circ$ , а только в его половине —  $180^\circ$ ).

Для каждого направления измерительных баз НВ1, НВ2, НВ3, ... проводится цикл измерений, описанный ранее. За направление ветра принимается направление, для которого реализуется самый меньший минимум структурных функций, построенных с использованием сигналов, регистрируемых в точках  $I$  и  $II$  измерительной базы.

В табл. 3 приведены результаты математического моделирования средних модулей погрешностей измерения скорости ( $\Delta V$ ) и направления ( $\Delta \alpha$ ) ветра по 50 шумовым реализациям и по 50 реализациям полей аэрозольных неоднородностей атмосферы. Размер аэрозольных неоднородностей задавался равным 5 м, ОСШ=2, 3, 5 и 50, число направлений измерительных баз в секторе углов  $180^\circ$  равно 19. Угол направления ветра задавался равным  $45^\circ$ . Расчеты проводились для базы  $A$  (ее размер составлял 14 м) и для базы  $B$  (ее размер выбирался равным размеру аэрозольных неоднородностей — 5 м). В последних колонках приведены результаты для адаптивно выбираемой базы (вы-



## Погрешности измерения скорости и направления ветра

ОСШ	Параметр	$\xi_0 = 5 \text{ м}$			$\xi_0 = 10 \text{ м}$			Адаптивно выбираемая база		
		Скорость ветра, м/с								
		4	8	12	4	8	12	4	8	12
2	$\Delta V, \text{ м/с}$	1,9	4,8	7,9	0,7	3,0	5,9	0,7	3,0	5,9
	$\Delta\alpha, ^\circ$	22	23	22	18	21	21	18	21	21
	$k\Lambda$	13,7	15	15,5	7,6	8,6	9,5	7,6	8,6	9,5
3	$\Delta V, \text{ м/с}$	1,5	3,6	5,4	0,8	2,5	4,5	0,8	2,5	4,5
	$\Delta\alpha, ^\circ$	18	17	18	15	17	17	15	17	17
	$k\Lambda$	7,0	7,9	8,4	3,7	4,6	5,2	3,7	4,6	5,2
5	$\Delta V, \text{ м/с}$	1,0	2,1	1,7	0,4	1,8	2,7	0,4	1,8	2,7
	$\Delta\alpha, ^\circ$	14	11	8	14	14	12	14	14	12
	$k\Lambda$	2,9	3,4	3,8	1,5	2,2	2,6	1,5	2,2	2,6
50	$\Delta V, \text{ м/с}$	0,19	0,22	0,28	0,57	0,74	0,93	0,19	0,22	0,28
	$\Delta\alpha, ^\circ$	5	5	5	13	8	8	5	5	5
	$k\Lambda$	0,17	0,23	0,27	0,20	0,6	0,8	0,17	0,23	0,27

бираемой алгоритмом обработки из баз 5 м и 14 м из условия наименьшего параметра  $\Lambda$ ). В табл. 3 даны также значения  $k\Lambda$  ( $k$  — некоторый коэффициент).

Из табл. 3 следует, что оптимальный (с точки зрения погрешностей измерения скорости ветра) выбор размера измерительной базы зависит от ОСШ: при небольшом значении ОСШ меньшие погрешности измерения скорости ветра обеспечивает выбор измерительной базы  $\xi_0 = 14 \text{ м}$  (базы  $A$ ); при большом значении ОСШ меньшие погрешности измерения скорости ветра обеспечивает выбор базы  $\xi_0 = d$  (базы  $B$ ).

Выбор базы по критерию минимального значения параметра  $k\Lambda$  обеспечивает наименьшие погрешности определения скорости ветра (исключение составляет только один случай — при скорости ветра 12 м/с и ОСШ=5, что связано, видимо, с ограниченностью объема усреднения).

Таким образом, результаты математического моделирования показывают, что измерение размера аэрозольных неоднородностей вдоль трассы зондирования и изменение размера измерительной базы в соответствии с найденным критерием позволяют повысить точность оперативного определения скорости ветра корреляционными лидарами с малой измерительной базой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о р р е л я ц и о н н ы е методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов и др. – Новосибирск: Наука, 1985. – 223 с.
2. П р и м е н е н и е корреляционных методов в атмосферной оптике/ В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов и др. – Новосибирск: Наука, 1983. – 160 с.
3. О п е р а т и в н о е определение компонентов скорости ветра с помощью лидара / Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов, В.С. Рыбалко и др. // Оптика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 1, № 2. – С. 68–72.
4. Л а з е р н ы й метод оперативного измерения скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы / В.И. Козинцев, С.Е. Иванов, М.Л. Белов и др. / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. “Антенные устройства радио- и оптического диапазонов”. – 2009. – С. 232–236.

Статья поступила в редакцию 21.06.2010

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, зам. директора НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), Deputy director of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950) graduated from the Moscow Energy Institute in 1973. D. Sc. (Eng.), leading researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optics of atmosphere.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р техн. наук, зав. кафедрой “Элементы приборных устройств” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.A. Gorodnichev (b. 1952) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1976. D. Sc. (Eng.), head of “Elements of Instrumental Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Сергей Евгеньевич Иванов родился в 1982 г., окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области атмосферной оптики.

S.E. Ivanov (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of optics of atmosphere.