

**В.С. Комаров, В.И. Акселевич, А.В. Креминский, Г.Г. Матвиенко**

### **О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОВОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ КЛИМАТО – ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОГРАНИЧЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Обсуждаются результаты статистической оценки точности лидарных наблюдений за ветром, осуществляемой на основе их сравнения с данными ветрового радиозондирования.

Показано, что данные ветрового лидара могут использоваться непосредственно (без коррекции) в климатических исследованиях ветрового режима пограничного слоя атмосферы, но требуют обязательной коррекции (на систематическую ошибку) в случае их оперативного использования, в том числе в задачах прогноза эволюции атмосферных загрязнений.

Обострение экологической обстановки на территории нашей страны и особенно в районах, прилегающих к крупным индустриальным центрам, существенно сказывается на специфике климата отдельных регионов, обусловленной значительным влиянием промышленных загрязнений на состояние атмосферы. Это обстоятельство делает жизненно необходимым создание действенной системы климато-экологического мониторинга ограниченных территорий.

Среди широкого спектра фундаментально-прикладных исследований по данной проблеме важное место занимают разработки, связанные с решением задач по оценке фоновых (климатического) состояния атмосферы ограниченных территорий в условиях антропогенного воздействия и прогнозу распространения и эволюции загрязняющих примесей. Однако реализация этих задач невозможна без наличия систематических сведений о концентрации загрязняющих веществ и физических параметрах атмосферы, особенно о скорости и направлении ветра, поскольку последний оказывает существенное влияние на уровень загрязнения воздушной среды и динамику его изменения.

Обычно подобная зависимость оценивается с помощью так называемого уравнения баланса (переноса) атмосферных примесей, которые, согласно [1, 2], можно сокращенно записать для конкретной примеси в виде:

$$\frac{\partial s_a}{\partial t} + u \frac{\partial s_a}{\partial x} + v \frac{\partial s_a}{\partial y} + w \frac{\partial s_a}{\partial z} + \frac{\partial w_a s_a}{\partial z} = \kappa_1 \Delta s_a + \frac{\partial \kappa s_a}{\partial z} + \varepsilon_a, \quad (1)$$

где  $s_a$  – объемная концентрация примеси «а»;  $u, v, w$  – составляющие скорости ветра по осям  $x, y, z$ ;  $w_a$  – собственная вертикальная скорость примеси ( $w_a < 0$ );  $\kappa_1$  и  $\kappa$  – коэффициенты атмосферной турбулентности, связанные с перемещением частиц по горизонтали и вертикали соответственно;  $\varepsilon_a$  – скорость образования (источники) или уничтожения (стоки) примеси в единице объема;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – оператор Лапласа.

Известно, что составляющие скорости ветра ( $u, v, w$ ) изменяются в пространстве и во времени, поэтому для их определения в численных схемах прогноза используется особая система уравнений гидротермодинамики (см., например, [3]). В таком случае уравнение (1) будет входить в уравнение прогностической модели. Однако на практике для расчета (прогноза) концентрации примеси  $s_a$  уравнение (1) используется отдельно и решается обычно после задачи прогноза ветра или на основе данных реальных ветровых измерений. При этом учитывается, что все атмосферные примеси промышленного происхождения распространяются вверх преимущественно до высоты 1,0–1,5 км, а горизонтальные составляющие переноса примеси совпадают с составляющими скорости ветра  $u$  и  $v$  [2].

Кроме того, имеется еще одно важное обстоятельство, которое препятствует надежному и точному решению уравнения (1). А именно, при расчетах, осуществляемых по этому уравнению для небольших территорий, когда используется локальная модель, шаги горизонтальной сетки составляют несколько километров или даже сотен метров.

Учитывая все вышесказанное, для получения необходимой информации о параметрах ветра требуется их систематическое измерение во многих точках контролируемой территории, причем вертикальное распределение этих параметров должно оцениваться с достаточно высоким разрешением по высоте в пограничном слое атмосферы (до уровня 1,0–1,5 км). Однако хорошо известно (см, например, [4]), что данные радиозондирования, широко используемые для оценки вертикального распределения ветра, не удовлетворяют подобным требованиям и не могут обеспечить надежное решение задач локального диагноза и прогноза распространения и эволюции загрязняющих примесей на ограниченных территориях. На наш взгляд, необходимую информацию о параметрах ветра может дать оптическое зондирование атмосферы с помощью лазеров, поскольку оно, согласно [5], обеспечивает оценку атмосферных полей с исключительно высоким временным и пространственным разрешением.

Единственным недостатком метода лазерного зондирования атмосферы является пониженная точность получаемых данных, которая существенно уменьшается по мере увеличения расстояния от источника оптического излучения. Учитывая этот недостаток, прежде чем использовать результаты ветрового лидарного зондирования в задачах регионального климата и экологического мониторинга (особенно при оценке и прогнозе уровня загрязнения атмосферы на ограниченных территориях), необходимо определить возможную погрешность данных ветрового лидара по отношению к стандартным радиозондовым наблюдениям, на основе которых обычно решаются названные задачи.

Целью настоящей статьи и является рассмотрение результатов статистической оценки точности лидарных наблюдений за ветром, осуществляемой на основе их сравнения с данными ветрового зондирования, проведенного с помощью системы <Метеор>.

Для подобной оценки использованы систематические измерения ветрового лидара ИОА СО РАН (причем параметры ветра определялись с помощью корреляционного метода обработки сигналов [6]) и данные радиозондовых наблюдений за ветром, которые были проведены (синхронно с лидарными измерениями) в районе г. Томска (56° с.ш., 85° в.д.) с 3 мая по 6 июня 1990 г. Всего за время натурных испытаний было осуществлено около 40 (из них 26 синхронно) наблюдений за профилем ветра в слое 200 – 1200 м. Поскольку на этапе первичной обработки информации все данные ветрового лидарного зондирования были усреднены по высоте с интервалом в 200 м, то значения зональной  $u$  и меридиональной  $v$  составляющей скорости ветра, используемые для построения синхронных рядов и статистической оценки точности этих данных, представлены на уровнях 300, 600, 900 и 1100 м.

Процедура статистической оценки точности лидарных наблюдений за ветром осуществлялась на основе двух методических подходов. Первый из них заключается в том, что вначале по исходным данным рассчитывались отклонения зональной ( $\Delta u = u_1 - u_2$ ) и меридиональной ( $\Delta v = v_1 - v_2$ ) составляющей скорости ветра (здесь  $u_1$  и  $v_1$  – соответствующие параметры ветра, оцененные по данным ветрового лидара, а  $u_2$  и  $v_2$  – те же параметры, полученные по радиозондовым наблюдениям), а затем по ним определялись:

1. Средняя погрешность лидарного зондирования

$$m_{x_j} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta x_{ij}, \quad (2)$$

где  $\Delta x_{ij}$  – отклонения параметра ветра (здесь  $i$  – номер измерения на  $j$ -й высоте);  $n_j$  – число синхронных измерений на  $j$ -й высоте.

2. Стандартная (среднеквадратическая) погрешность –  $\delta_{x_j}$  :

$$\delta_{x_j} = \left[ \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (\Delta x_{ij} - m_{x_j})^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Поскольку величина  $m_j$  может быть принята в качестве оценки систематической погрешности лидарных измерений, то при ее исключении соответствующая стандартная ошибка будет определяться из выражения

$$\delta'_{x_j} = \left[ \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (\Delta x_{ij})^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Следует подчеркнуть, что существует важное условие, когда применение ветрового лидара является нецелесообразным, а именно условие, при котором стандартная ошибка лидарных измерений  $\delta_x$  меньше среднего квадратического отклонения метеорологической величины  $\sigma_x$ , характеризующего ее фактическую изменчивость.

При втором подходе для определения качества данных ветрового лидарного зондирования и возможности их применения в климатических моделях был использован метод статистической оценки значимости или случайности расхождения средних значений и дисперсий параметров ветра, определенных по двум отдельным (лидарным и радиозондовым) выборкам. При этом для оценки значимости или случайности расхождения средних значений был использован критерий  $t_s$ , который рассчитывается с помощью выражения вида [7, 8]:

$$t_s = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2| / \sqrt{\sigma_1^2 / n_1 + \sigma_2^2 / n_2}, \quad (5)$$

где  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$  – средние значения сравниваемых выборок;  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  – соответствующие им выборочные дисперсии;  $n_1$  и  $n_2$  – объем сопоставляемых выборок, и позволяет проверить предположение об отсутствии значимых различий между величинами  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$ , т.е. гипотезу, что

$$|t_s| < t_s(P, \kappa), \quad (6)$$

где  $t_s(P, \kappa)$  – критическое значение функции  $t_s$  [здесь  $P$  – вероятность (в нашем случае  $P = 0,95$ ), а  $\kappa = n_1 + n_2 - 2$  – число степеней свободы], определяемое по распределению Стьюдента [7].

Для оценки значимости или случайности расхождения дисперсий, рассчитанных по данным ветрового лидара и радиозондирования, были использованы критерий  $T_H$ , который, согласно [7, 8], определяется из выражения

$$T_H = s_1^2 / s_2^2 \quad (7)$$

(здесь  $s_1^2$  и  $s_2^2$  – дисперсии, рассчитанные по двум выборкам, причем наибольшая из них находится в числителе) и его критическое значение  $F_{1-P}(n_1, n_2)$ , взятое при уровне значимости  $q = 1 - P = 0,05$  и определяемое с помощью таблиц предельных значений  $F$  [7], разработанных Фишером для различных комбинаций числа степеней свободы  $n_1$  и  $n_2$ . При выполнении условия

$$T_H \leq F_{1-P}(n_1, n_2) \quad (8)$$

гипотеза о случайности расхождения дисперсий  $s_1^2$  и  $s_2^2$  подтверждается.

Поскольку для оценки точностных характеристик ветрового лидара нами предложены два методических подхода, то рассмотрим результаты этой оценки для каждого подхода в отдельности.

В табл. 1 приведены средние ( $m_x$ ), средние квадратические ( $\delta_x$ ) и относительные стандартные ( $\Theta_x = \delta_x / \sigma_x$ , %) погрешности отклонения зональной ( $u$ ) и меридиональной ( $v$ ) составляющих скорости ветра, определенных по данным ветрового лидара, от тех же параметров ветра, но оцененных с помощью радиозондовых наблюдений. В той же таблице приведены и скорректированные (за счет исключения систематических ошибок) величины средних квадратических ( $d'_x$ ) и относительных стандартных ( $\Theta'$ ) погрешностей.

Таблица 1

Средние  $m_x$ , средние квадратические  $\delta_x$  и относительные стандартные  $\Theta_x = \delta_x / \sigma_x$ , % погрешности отклонений лидарных наблюдений за ветром от данных ветрового зондирования, проводимого с помощью системы <Метеор>

H, км	$m_u$	$\delta_u$	$\delta'_u$	$\Theta_u$	$Q'_u$	$m_v$	$\delta_v$	$\delta'_v$	$\Theta_v$	$Q'_v$
0,3	0,4	5,2	5,3	67	68	1,2	4,3	4,5	74	78
0,5	2,4	5,7	5,8	68	69	0,8	4,5	5,0	65	72
0,7	3,8	4,7	5,4	57	65	1,8	4,2	4,2	68	68
0,9	4,2	4,2	3,9	65	61	2,0	4,4	3,3	76	57
1,1	5,1	4,5	3,2	96	68	2,1	4,4	3,2	86	63

Из табл. 1 хорошо видно, что средние погрешности отклонений лидарных наблюдений за ветром от данных ветрового зондирования, осуществляемого с помощью стандартной системы <Метеор>, имеют явную зависимость от высоты, причем наибольшее увеличение  $m_x$ , т.е. систематической ошибки ветрового лидара, по мере увеличения уровня измерения от источника оптического излучения характерно для зональной составляющей скорости ветра  $u$ . Следовательно, полностью подтверждается известная закономерность, свойственная методам лазерного зондирования, когда точность этого зондирования существенно уменьшается по мере увеличения слоя измерения.

Анализ фактических и скорректированных значений  $\delta_x$  показывает, что средние квадратические погрешности данных ветрового лидара в обоих случаях возрастают в слое 0,3–0,5 км, а выше либо уменьшаются, либо мало изменяются с ростом высоты, причем эти погрешности наиболее заметно уменьшаются для случаев, когда в данные лидарного зондирования внесены поправки, обусловленные систематической ошибкой  $m_x$ .

Что касается относительных ошибок, то из их анализа видно, что почти во всех случаях (особенно при исключении систематической погрешности)  $\Theta_u$  и  $\Theta_v$  в основном не превышают 65–70%, т.е. они меньше фактической изменчивости зональной  $\sigma_u$  и меридиональной  $\sigma_v$  составляющей скорости ветра. А это, в свою очередь, говорит о том, что соблюдается условие  $\delta_x < \sigma_x$ , при котором использование данных ветрового лидара на практике является целесообразным. И все же достаточно большие относительные погрешности, свойственные данным ветрового лидарного зондирования, не позволяют сделать надежный вывод о возможности использования этих данных в задачах регионального климатического мониторинга.

Поэтому рассмотрим также результаты сопоставления средних значений ( $m_x$ ) и средних квадратических отклонений ( $\sigma_x$ ), рассчитанных для зональной и меридиональной составляющих скорости ветра по двум отдельным выборкам наблюдений (лидарных и радиозондовых).

В табл. 2 приведены средние значения ( $m_x$ ) и средние квадратические отклонения ( $\sigma_x$ ) параметров ветра  $u$  и  $v$ , определенных по данным радиозондов и ветрового лидара, а также расчетные и критические значения критериев  $t_s$  и  $T_H$ , используемые для оценки значимости или случайности расхождения лидарных и радиозондовых наблюдений за ветром.

Таблица 2

Результаты сравнения данных ветрового зондирования, проведенного с помощью радиозондов (р) и ветрового лидара (л) с использованием критериев значимости расхождения  $t_s$  и  $T_H$

H, км	$u^p$		$v^p$		$u^l$		$v^l$		$u$		$v$		$t_s(P, \kappa)$	$F_{1-p}(n_1, n_2)$
	$m_u^p$	$\sigma_u^p$	$m_v^p$	$\sigma_v^p$	$m_u^l$	$\sigma_u^l$	$m_v^l$	$\sigma_v^l$	$t_s$	$T_H$	$t_s$	$T_H$		
0,3	1,8	7,8	-2,7	5,8	2,2	8,2	-1,5	6,8	0,17	1,1	0,63	1,3	2,015	2,0
0,5	1,1	8,4	-3,9	6,9	3,5	8,2	-3,1	7,0	0,96	1,1	0,37	1,0	2,016	2,0
0,7	0,4	8,2	-5,3	6,2	4,2	8,0	-3,5	6,6	1,57	1,0	0,94	1,1	2,019	2,1
0,9	0,5	6,4	-5,9	5,8	4,7	7,2	-3,3	5,9	1,85	1,3	1,33	1,1	2,032	2,3
1,1	0,3	4,7	-6,8	5,1	5,4	5,9	-4,7	5,8	2,54	1,5	1,04	1,3	2,050	2,5

Анализ этой таблицы показывает, что лидарные наблюдения (по сравнению с радиозондовыми) дают завышенные (по абсолютной величине) значения зональной и заниженные меридиональной составляющих скорости ветра, поскольку на всех уровнях слоя 0,3–1,1 км  $|m_u^l| > |m_u^p|$ , а  $|m_v^l| < |m_v^p|$ , причем с увеличением высоты различия между ними существенно возрастают, особенно для параметра  $u$ . Кроме того, анализ табл. 2 показывает, что практиче-

ски на всех уровнях рассматриваемого слоя атмосферы и независимо от составляющей скорости ветра соблюдаются условия (6) и (8), поскольку на этих уровнях расчетные величины  $t_s$  и  $T_H$  меньше их критических значений  $t_s(P, \kappa) = 2,02-2,05$  и  $F_{1-p}(n_1, n_2) = 2,0-2,5$ . Лишь на уровне 1,1 км критерий  $t_s$ , рассчитанный для средних значений зональной составляющей скорости ветра, превышает свое критическое значение.

Все это говорит о том, что средние значения и дисперсии зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, полученные по двум выборкам наблюдений (лидарных и радиозондовых) отличаются друг от друга в большей части рассматриваемого слоя (0,3–1,1 км) несущественно. А это означает, что со статистической точки зрения различия между радиозондовыми наблюдениями за ветром и данными ветрового лидара являются случайными и незначимыми и поэтому данные лидарного зондирования могут с успехом использоваться для климатической оценки ветрового режима пограничного слоя атмосферы.

Таким образом, статистический анализ точностных характеристик ветрового лидара, проведенный путем сопоставления лидарных наблюдений за ветром с данными ветрового зондирования, осуществленного с помощью системы <Метеор>, позволяет сделать два важных вывода:

1. Данные ветрового лидара обладают определенной систематической погрешностью, которая незначительна по своей величине на нижних уровнях (0,3 и 0,5 км) и существенно больше на вышерасположенных уровнях пограничного слоя атмосферы, причем лидарные наблюдения (по сравнению с радиозондовыми) дают завышенные оценки для зональной составляющей скорости ветра и заниженные для меридиональной составляющей.

2. Данные ветрового лидара могут непосредственно (без коррекции) использоваться в климатических исследованиях ветрового режима пограничного слоя атмосферы (до высоты 1 км), в то же время для применения этих данных в задачах оперативной оценки и прогноза состояния загрязнений воздушной среды на локально-региональном уровне требуется предварительная их коррекция на систематическую погрешность.

В заключение отметим, что, по мнению авторов, дальнейшие усилия исследователей, занимающихся проблемой использования данных лидарного зондирования, должны быть направлены:

- на совершенствование технических характеристик ветрового лидара (его потенциала, геометрической структуры, времени накопления сигналов и т.п.) и повышение эффективности корреляционного метода, используемого для определения параметров ветра в нижней атмосфере;
- на проведение более длительных натурных испытаний ветрового лидара в различных физико-географических районах и в разные сезоны, что позволит не только дать более надежную оценку его применимости в задачах регионального климато-экологического мониторинга атмосферы, но и провести необходимую калибровку этого измерительного средства.

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
2. Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Т. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 423 с.
3. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 376 с.
4. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов. / Под ред. М.А. Петросянца, В.Д. Решетова. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 219 с.
5. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное зондирование атмосферы. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. 232 с.
6. Матвиенко Г.Г., Задде Г.О., Фердинандов Э.С. и др. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
7. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 193 с.
8. Математическая статистика. / Под ред. А.М. Длин. М.: Высшая школа, 1975. 398 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
Российский государственный  
гидрометеорологический институт, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию  
15 ноября 1993 г.

V.S. Komarov, V.I. Akselevich, A.V. Kreminskii, and G.G. Matvienko. **On a Possibility of Using Lidar Sounding of the Wind Velocity in Climate and Ecological Monitoring over Limited Areas.**

This paper presents a discussion of lidar wind observations accuracy estimated based on intercomparison of the data on wind velocity obtained with a lidar and a radiosonde.

It is shown in this paper that the lidar data on wind velocity can be directly (without a correction) used in climatic studies of the wind regime in the boundary layer of the atmosphere. At the same time these data should necessarily be corrected for systematic errors when used operatively including their use for forecasting the evolution of the atmospheric pollutions.