

В.С. Комаров, А.В. Креминский, Н.Я. Ломакина, Г.Г. Матвиенко

ОБ ОПЫТЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТРЕХТРАССОВОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО ЛИДАРА В ЗАДАЧЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА СОСТАВЛЯЮЩИХ СРЕДНЕГО ВЕТРА

Рассматривается методология решения задачи сверхкраткосрочного прогноза составляющих среднего ветра в планетарном пограничном слое, определяющих пространственный перенос атмосферных загрязняющих примесей. На конкретных примерах показано, что результаты статистического прогноза, полученные по данным трехтрассового корреляционного лидара, разработанного в ИОА СО РАН, являются достаточно приемлемыми для практики локального атмосферно-экологического мониторинга.

Среди широкого круга фундаментально-прикладных исследований по проблеме атмосферно-экологического мониторинга, проводимого на локальном и региональном уровнях, важное место занимают исследования, связанные со сверхкраткосрочным (на срок менее 6 ч) прогнозом режима ветра в планетарном пограничном слое (т.е. до высоты 1–2 км), поскольку циркуляция воздуха в этом слое определяет в значительной степени состояние и эволюцию уровня загрязнения ограниченного воздушного бассейна (например, большого города, промышленной зоны или региона в целом).

О роли ветра в формировании и эволюции поля загрязнения можно судить, в частности, из уравнения баланса (переноса) атмосферных примесей, которое записывается обычно для конкретной примеси и турбулентной атмосферы в виде

$$\frac{\partial s_a}{\partial t} + \left(u \frac{\partial s_a}{\partial x} + v \frac{\partial s_a}{\partial y} \right) + w \frac{\partial s_a}{\partial z} + \frac{\partial w_a s_a}{\partial z} - k_s \left(\frac{\partial^2 s_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s_a}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial s_a}{\partial z} = \varepsilon_a, \quad (1)$$

где s_a – объемная концентрация примеси «а»; u, v, w – составляющие вектора скорости ветра в системе координат x, y, z ; w_a – собственная вертикальная скорость примеси ($w_a < 0$); k_s и k_z – коэффициенты турбулентности, связанные с перемещением частиц по горизонтали и вертикали соответственно; $\varepsilon_a = \varepsilon_a(x, y, z, t)$ – источник (сток) примеси, т.е. скорость ее возникновения (уничтожения) в единице объема.

Действительно, согласно уравнению (1) горизонтальные составляющие вектора скорости ветра играют важную роль, обуславливая адвекцию загрязняющей примеси (второй член левой части уравнения переноса). При этом указанные составляющие относятся к числу входных параметров модели переноса, и поэтому они или рассчитываются с помощью какой-либо прогностической модели (например, мезометеорологической, используемой обычно при локальном гидродинамическом прогнозе погоды [1]), либо задаются на основе данных реальных ветровых измерений, что делается чаще всего в практике атмосферно-экологических исследований.

В связи с тем что основное количество антропогенных загрязняющих веществ сосредоточено обычно в нижнем одно-, двухкилометровом слое атмосферы, все математические модели переноса примесей строятся, как правило, применительно к планетарному пограничному слою. Следовательно, для этого же слоя требуется оценка горизонтальных составляющих вектора скорости ветра u и v , с которыми согласно [2] совпадают горизонтальные составляющие переноса загрязняющих примесей антропогенного происхождения. При этом следует подчеркнуть, что горизонтальное перемещение облака загрязняющих веществ в планетарном пограничном слое, как показано в [3], определяется не данными отдельных уровней, а вектором усредненной по вертикальным слоям скорости ветра (или вектором средней скорости ветра)

$$\langle V \rangle_{h_0, h} = \frac{1}{h - h_0} \int_{h_0}^h V(z) dz \quad (2)$$

(здесь h_0 и h – нижняя и верхняя границы слоя загрязнения, причем $h_0 = 0$, т.е. его нижняя граница совпадает с уровнем земной поверхности), зональная $\langle u \rangle_{h_0, h}$ и меридиональная $\langle v \rangle_{h_0, h}$ составляющие которого находятся с помощью выражений:

$$\langle u \rangle_{h_0, h} = \frac{1}{h - h_0} \int_{h_0}^h u(z) dz; \quad (3)$$

$$\langle v \rangle_{h_0, h} = \frac{1}{h - h_0} \int_{h_0}^h v(z) dz. \quad (4)$$

В выражениях (2)–(4) оператор $\langle \hat{\cdot} \rangle$ обозначает процедуру усреднения по вертикали в слое $h - h_0$.

Все вышесказанное было учтено нами при решении задачи сверхкраткосрочного прогноза составляющих среднего ветра, определяющих пространственный перенос атмосферных загрязняющих примесей. Рассмотрению методологии и результатов подобного прогноза посвящена настоящая статья.

Здесь следует сразу же отметить, что до настоящего времени задача сверхкраткосрочного прогноза атмосферной циркуляции в планетарном пограничном слое еще не решалась, поскольку этому препятствовало отсутствие данных о высотном распределении ветра, обладающих высоким пространственно-временным разрешением. Данные стандартного сетевого радиозондирования, обычно используемые в практике атмосферно-экологических исследований, характеризуются малым пространственно-временным разрешением и недостаточной надежностью на высотах менее 0,5 км (из-за больших скоростей подъема радиозондов). Лишь теперь появилась реальная возможность решения задачи сверхкраткосрочного прогноза ветра с достаточной для практики точностью, так как в самые последние годы в практику атмосферного мониторинга стали внедряться новые методы ветрового лидарного зондирования и, в частности, доплеровский и корреляционный методы (они достаточно подробно описаны в [4,5]). Первый из них для своего применения требует сложной дорогостоящей аппаратуры, но имеет преимущества при зондировании ветра на больших расстояниях. Корреляционный же метод технически легче реализуется и вполне конкурентен с доплеровским при исследовании поля ветра в пограничном слое атмосферы.

Поскольку для решения поставленной задачи нами использованы данные трехтрассового корреляционного лидара, разработанного в Институте оптики атмосферы СО РАН [5], то естественно встает вопрос о качестве получаемых данных. Этот вопрос был решен ранее в [6], где на основе статистического сравнения синхронных выборок лидарных и радиозондовых наблюдений было показано, что результаты измерений трехтрассового корреляционного лидара могут с успехом использоваться при решении различных задач мезометеорологии и локального экологического мониторинга.

Остановимся теперь коротко на методологии сверхкраткосрочного (на срок менее 6 ч) прогноза составляющих среднего ветра.

Как нам представляется, решение этой задачи можно провести, как и в случае пространственного (по высоте) прогноза составляющих среднего ветра (см. [7]), с помощью модифицированной версии метода группового учета аргументов (ММГУА), который достаточно прост для реализации, учитывает наилучшим образом динамику проходящих атмосферных процессов и не требует большого объема исходной информации для построения оптимальной прогностической модели. В качестве подобной модели нами использована, как и ранее, смешанная разностная динамико-стохастическая модель вида [8]

$$\xi_0(h, N + 1) = \sum_{\tau=1}^{N^*} A(h, \tau) \xi_s(h, N + 1 - \tau) + \sum_{j=1}^{h-1} B(h, j) \xi_0(j, N + 1) + \varepsilon(h, N + 1)$$

$$(\text{при } h = \bar{h} + 1, \bar{h} + 2, \dots, h_k), \quad (5)$$

где $\xi_0(h)$ и $\xi_i(h)$ – прогностический и исходные профили случайных отклонений какой-либо метеорологической величины ξ , взятые для времени $t = N + 1$ и $t = 1, 2, \dots, N$ соответственно; \bar{h} – высота первого уровня статистического прогноза; N^* – порядок запаздывания по времени ($N^* < [N - h - 1]/2$); $A(h, 1), \dots, A(h, N)$ и $B(h, 0), \dots, B(h, h - 1)$ – неизвестные параметры прогностической модели; $\varepsilon(h, N + 1)$ – невязка модели.

Алгоритмы выбора и построения наилучшей прогностической модели достаточно подробно описаны в [9, 10], поэтому на них не будем останавливаться. Единственным нерешенным вопросом в данном случае является выбор оптимальной процедуры предвычисления (на срок $t = N + 1$) составляющих скорости ветра на высоте 140 м, где (в отличие от задачи пространственного прогноза [7]) отсутствуют данные лидарных измерений.

На наш взгляд, они могут быть определены на основе метода оптимальной линейной экстраполяции случайного процесса, а уже прогноз составляющих среднего ветра может быть проведен, как и при пространственном прогнозе, с помощью алгоритма ММГУА.

Процедура определения значений какой-либо метеорологической величины (в нашем случае это зональная (u) и меридиональная (v) составляющие вектора скорости ветра) в момент времени $t + \tau$ (здесь t – время, τ – величина упреждения) с помощью метода оптимальной экстраполяции заключается согласно [11] в ее нахождении с помощью выражения вида

$$\hat{\xi}(t + 1) = \bar{\xi}(t) + \xi'(t + 1) = \bar{\xi}(t) + \sum_{k=0}^n a_k \xi(t - k), \quad (6)$$

где $\bar{\xi}(t)$ – среднее значение метеорологической величины ξ (для стационарного процесса $\bar{\xi}(t) = \bar{\xi} = \text{const}$ [11]); $\xi'(t + 1)$ – значения отклонений той же метеорологической величины от среднего в момент времени $t + 1$; $\xi(t - k)$ – значения отклонений метеорологической величины от среднего в предшествующие моменты времени $t - k$ (здесь $k = 0, 1, 2, \dots, n$); a_k – некоторые весовые коэффициенты, подлежащие определению, причем таким образом, чтобы величина

$$\sigma_n^2(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n) = \min \left\{ \left[\xi(t + 1) - \sum_{k=0}^n a_k \xi(t + k) \right]^2 \right\} \quad (7)$$

принимала бы наименьшее значение.

Используя условие минимума функции σ^2 , т.е. условие

$$[\partial \sigma_n^2(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)] / (\partial a_k) = 0 \quad \text{при } k = 0, 1, \dots, n, \quad (8)$$

и дифференцируя выражение (7) по каждой переменной, приходим при стационарном случайном процессе (при дисперсии $D(t) = \text{const}$) к системе уравнений

$$\sum_{j=0}^n a_j \mu_{\xi}(k - j) = \mu_{\xi}(l + k), \quad k = 0, 1, \dots, n, \quad (9)$$

используемых для определения весовых коэффициентов a_k .

Формулы (6)–(9) и были положены в основу расчетной схемы в методике оптимальной экстраполяции случайного процесса на самом нижнем уровне (140 м), где, как было установлено, отмечаются наименьшие величины стандартной ошибки сверхкраткосрочного прогноза характеристик ветра.

Поскольку в формуле (9) для нахождения весовых коэффициентов требуется знание корреляционных функций μ_{ξ} , то для их определения были использованы аналитические функции вида

$$\mu_u(\tau) = \mu_v(\tau) = \exp[-\alpha(\tau)] \quad (10)$$

(причем для зональной составляющей ветра $\alpha = 0,275$, а для меридиональной – $\alpha = 0,537$), найденные нами по данным исходных наблюдений.

Перейдем теперь непосредственно к анализу результатов сверхкраткосрочного прогноза зональной ($\langle u \rangle_{h_0, h}$) и меридиональной ($\langle v \rangle_{h_0, h}$) составляющих среднего ветра, который был проведен для упреждения $\tau = 4$ ч с помощью комплексного алгоритма.

Этот прогноз был реализован по данным лидарных наблюдений за ветром (их общий объем $N = 90$), полученных с помощью трехтрассового корреляционного лидара в районе г. Томска (56 с.ш., 85 в.д.) в период с 10 июня по 12 августа 1994 г. Поскольку высотное разрешение указанных данных составляет около 100 м, это позволило достаточно детально изучить особенности эволюции среднего ветра почти во всем пограничном слое атмосферы (до высоты 1140 м).

Для оценки точности сверхкраткосрочного прогноза составляющих среднего ветра были использованы стандартные (среднеквадратические) погрешности δ и вероятности P ошибок прогноза менее и более некоторой данной величины.

В таблице приведены результаты оценки качества комплексного прогноза составляющих $\langle u \rangle_{h_0, h}$ и $\langle v \rangle_{h_0, h}$, представленные величинами стандартной погрешности (δ) и вероятности (P) ошибок прогноза этих характеристик менее $\pm 1, \dots, \pm 4$ м/с и более ± 4 м/с. Здесь же даются стандартные отклонения (σ) этих составляющих, характеризующие их изменчивость.

Среднеквадратические погрешности (δ) и вероятности (P) ошибок прогноза скорости зонального и меридионального ветра менее $\pm 1, \dots, \pm 4$ и более ± 4 м/с, полученных с помощью ММГУА по данным измерений ветрового лидара с интервалом 4 ч, и прогностического значения этих составляющих на уровне 140 м, а также их стандартные отклонения σ

Слой восстановления, м	Вероятность, P					δ	σ
	$\leq \pm 1$ м/с	$\leq \pm 2$ м/с	$\leq \pm 3$ м/с	$\leq \pm 4$ м/с	$> \pm 4$ м/с		
Зональный ветер							
140 – 240	0,84	0,96	0,98	1,00	0,00	0,6	1,6
140 – 340	0,76	0,94	0,98	1,00	0,00	0,8	1,8
140 – 440	0,66	0,88	0,98	0,98	0,02	1,0	2,0
140 – 540	0,64	0,88	0,94	0,98	0,02	1,2	2,1
140 – 640	0,60	0,86	0,94	0,98	0,02	1,4	2,2
140 – 740	0,56	0,84	0,90	0,98	0,02	1,6	2,3
140 – 840	0,50	0,78	0,88	0,98	0,02	1,6	2,5
140 – 940	0,50	0,78	0,88	0,98	0,02	1,6	2,6
140 – 1040	0,48	0,76	0,84	0,98	0,02	1,7	2,8
140 – 1140	0,46	0,66	0,84	0,98	0,02	2,0	2,9
Меридиональный ветер							
140 – 240	0,84	1,00	1,00	1,00	0,00	0,6	1,7
140 – 340	0,78	0,98	1,00	1,00	0,00	0,8	2,1
140 – 440	0,70	0,92	1,00	1,00	0,00	1,0	2,4
140 – 540	0,76	0,90	0,98	1,00	0,00	1,1	2,5
140 – 640	0,74	0,92	0,98	1,00	0,00	1,1	2,7
140 – 740	0,72	0,86	0,94	1,00	0,00	1,3	2,9
140 – 840	0,70	0,88	0,94	1,00	0,00	1,4	3,0
140 – 940	0,66	0,86	0,94	0,98	0,02	1,4	3,2
140 – 1040	0,64	0,84	0,94	0,98	0,02	1,6	3,4
140 – 1140	0,60	0,82	0,92	0,98	0,02	1,8	3,5

Анализ таблицы показывает, что статистический сверхкраткосрочный (с упреждением $\tau = 4$ ч) прогноз составляющих среднего ветра в планетарном пограничном слое, проведенный на основе комплекса альтернативных методов и данных ветрового лидара, является достаточно успешным. Действительно, для указанного времени упреждения точность комплексного прогноза параметров $\langle u \rangle_{h_0, h}$ и $\langle v \rangle_{h_0, h}$ вполне удовлетворительная, поскольку для этого прогноза вероятность P ошибок прогноза менее ± 1 м/с достаточно велика (особенно для меридиональной составляющей) и варьирует в пределах 0,46–0,84 у зональной составляющей и 0,60–0,84 у меридиональной.

О преимуществах предложенного комплексного алгоритма говорит то, что стандартная погрешность δ для всех взятых слоев $h - h_0$ заметно меньше величины среднего квадратического отклонения (сравните величины δ и σ в таблице) и, следовательно, в данном случае соблюдается условие

$$\delta^2 < \sigma^2 \quad (11)$$

(т.е. квадрат ошибки прогноза меньше дисперсии рассматриваемого параметра), при котором, как известно, целесообразно применять не инерционный, а статистический прогноз.

Здесь следует отметить, что при величине упреждения $\tau < 4$ ч, естественно, можно ожидать лучшего качества статистического прогноза, основанного на комплексировании двух альтернативных методов (оптимальной экстраполяции и ММГУА).

В заключение заметим, что результаты прогноза, полученные по данным трехтрассового корреляционного лидара, являются достаточно приемлемыми для практики локального атмосферно-экологического мониторинга, они тем более будут существенно лучшими при использовании более точного доплеровского лидара.

1. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 376 с.
2. Владимиров А.М., Ляхин Ю.М., Матвеев Л.Г., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 423 с.
3. Брюхань Ф.Ф. Методы климатической обработки и анализа аэрологической информации. М.: Гидрометеоздат, 1983. 112 с.
4. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
5. Матвиенко Г.Г., Задде Г.О. и др. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
6. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В., Матвиенко Г.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 182–189.
7. Комаров В.С., Акселевич В.И. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 1039–1047.
8. Кочерга Ю.Л. // Автоматика. 1991. № 5. С. 80–86.
9. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 231–237.
10. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 941–957.
11. Казакевич Д.И. Основы теории случайных функций и их применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 319 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
10 ноября 1995 г.

V. S. Komarov, A. V. Kreminskii, N. Ja. Lomakina, G. G. Matvienko. About Application of Three-path Correlation Lidar Measurement Data to the Problem of Averaged Wind Components Statistical Forecast.

A methodology is treated of solution of the problem of supershort-term forecast of the averaged wind components within the planetary boundary layer governing the spatial transfer of atmospheric contaminants. It was shown by the example, that the statistical forecast results derived from the three-path correlation lidar data (designed at the IAO SB RAS) are practically acceptable for local atmosphere – ecological monitoring.