

**В.С. Комаров, С.Н. Ильин, А.В. Креминский, Е.Н. Кадыгров*,
А.В. Лавриненко, Н.Я. Ломакина, С.Л. Одинцов, Ю.Б. Попов,
А.И. Попова, В.А. Федоров**

Об опыте применения динамико-стохастического метода прогноза в задаче предсказания параметров состояния пограничного слоя атмосферы по данным радиометрических и содарных измерений

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

** Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный Московской обл.*

Поступила в редакцию 23.12.2004 г.

Обсуждаются результаты применения динамико-стохастического метода, основанного на использовании алгоритма фильтра Калмана и двумерной регрессионной модели, в задаче сверхкраткосрочного прогноза температуры и ветра в пограничном слое атмосферы, осуществляемого по данным радиометрических и содарных измерений.

Введение

Известно, что задача сверхкраткосрочного (с заблаговременностью до 3 ч) прогноза параметров состояния пограничного слоя атмосферы (ПСА) и, в частности, температуры и ветра, практически еще не решалась, поскольку этому препятствовало отсутствие данных о вертикальном распределении указанных параметров, полученных с высоким пространственно-временным разрешением. Действительно, данные стандартного температурно-ветрового зондирования, используемые в практике метеорологических исследований ПСА, характеризуются малым разрешением по высоте, недостаточной надежностью ниже уровня 0,5 км (из-за больших скоростей подъема радиозондов) и малой частотой зондирования (два раза в сутки: 00 и 12 ч по Гринвичу). Лишь в последнее время появилась реальная возможность решения задачи сверхкраткосрочного (с заблаговременностью от 1 ч до нескольких часов) прогноза температуры и ветра для пограничного слоя атмосферы.

Это обусловлено тем, что в практику атмосферного мониторинга стали внедряться новые методы дистанционного зондирования, основанные на использовании современных лидарных, радиометрических и акустических систем, которые позволяют осуществить оценку вертикальных распределений температуры и ветра в пограничном слое атмосферы с высоким пространственным (по высоте) и временным разрешением. Кроме того, важным обстоятельством, способствующим решению задачи сверхкраткосрочного прогноза с малой заблаговременностью, является то, что в самые последние го-

ды появились новые нетрадиционные методы такого прогноза, которые базируются на использовании динамико-стохастических моделей и реализуются в условиях минимума исходной информации.

Одним из подобных методов является модифицированный метод группового учета аргументов (ММГУА), основанный на использовании смешанной разностной динамико-стохастической модели и алгоритмов направленного группового перебора (для оптимизации структуры этой модели) и минимаксного оценивания для получения оценок ее параметров. ММГУА предложен сотрудниками Института оптики атмосферы СО РАН и описан в [1, 2]. Применяя его в комплексе с методом оптимальной экстраполяции случайного процесса (последний используется для прогноза метеорологических величин только на приземном уровне), можно решить задачу сверхкраткосрочного прогноза в пограничном слое атмосферы по данным ограниченного числа лидарных, радиометрических или содарных измерений.

Об опыте использования такого комплексного подхода говорится в [2, 3], где приводятся результаты сверхкраткосрочного (с заблаговременностью 4 ч) прогноза зональной и меридиональной составляющих скорости ветра в пограничном слое атмосферы, проведенного на основе ММГУА и метода оптимальной экстраполяции случайного процесса по данным ветровых измерений, осуществленных с помощью трехтрассового корреляционного лидара.

Несмотря на заметные преимущества ММГУА перед регрессионными методами (главное из них — возможность реализации по данным ограниченного объема), основным его недостатком (при использо-

вании в процедуре сверхкраткосрочного прогноза) является необходимость обязательного привлечения метода оптимальной экстраполяции случайного процесса или какого-либо другого метода, обеспечивающего подобный прогноз на приземном (или нижележащем высотном) уровне.

Поэтому в [4] А.В. Лавриненко, В.С. Комаровым и Ю.Б. Поповым была предложена новая методика сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы, основанная на использовании алгоритма калмановской фильтрации и двумерной динамико-стохастической модели регрессионного типа и не требующая привлечения каких-либо других методов.

В настоящей статье приводятся результаты применения этой методики для решения задачи сверхкраткосрочного (с заблаговременностью от 30 мин до 3 ч) прогноза температуры и ветра по данным радиометрических и содарных измерений.

Прежде чем остановиться на рассмотрении этих результатов, следует напомнить о некоторых особенностях используемого для такого прогноза алгоритма.

Как и в [4], нами использована прогностическая модель типа

$$\xi_h(k) = \sum_{m=h-i}^{h+i} \sum_{j=1}^K d_{j,m} \xi_m(k-j), \quad (1)$$

где $d_{j,m}$ — неизвестные коэффициенты, подлежащие оцениванию и определяющие взаимную связь между оцениваемыми значением поля $\xi_h(k)$ и его значениями в предыдущие моменты времени на заданной высоте и близлежащих высотных уровнях, т.е. $\xi_m(k-j)$ (здесь j — текущее значение дискретного времени, изменяющееся от 1 до k и определяющее глубину окна авторегрессии, а m — номер высотного уровня, на котором выполняется прогноз, причем m меняется от $h-i$ до $h+i$ при $i = 1, 2, \dots, n$, указывающем на максимальное число учитываемых информационных уровней). Однако в модели (1) берутся не фактические значения поля $\xi_h(k)$, как в [4], а его центрированные значения $\xi'_h(k) = \xi_h(k) - \bar{\xi}_k$, где $\bar{\xi}_k$ — среднее, полученное по данным пяти предыдущих сроков.

Для оценки неизвестных параметров $d_{j,m}$ в модели (1) используются:

уравнение состояния вида

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k) \cdot \mathbf{X}(k) + \mathbf{\Omega}(k), \quad (2)$$

где

$$\mathbf{X}(k+1) = |d_{1,0}(k+1), d_{2,0}(k+1), d_{3,0}(k+1), \\ d_{2i+1,0}(k+1), d_{1,1}(k+1), \dots, d_{2i+1,k}(k+1)|^T$$

— вектор состояния размерностью $(2i+1) \cdot k$ (здесь T — операция транспонирования); $\mathbf{F}(k)$ — матрица перехода для дискретной системы размерностью $(2i+1)k \cdot (2i+1)k$; $\mathbf{\Omega}(k)$ — вектор случайных возмущений системы (вектор шумов состояния);

модель измерений

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{X}(k) + \mathbf{E}(k), \quad (3)$$

где $\mathbf{Y}(k)$ — вектор центрированных значений поля ξ с компонентами $Y_i(k) = \xi_i(k) - \bar{\xi}_k$; $\mathbf{H}(k)$ — матрица наблюдений размерностью $(2i+1)k \cdot 1$; $\mathbf{E}(k)$ — вектор ошибок (шумов) измерений.

На основе выражений (2) и (3) задача оценивания решается с помощью линейного фильтра Калмана [5].

Предложенная в [4] методика, основанная на использовании двумерной динамико-стохастической модели и аппарата калмановской фильтрации, исследована нами на предмет ее эффективности при применении в задаче сверхкраткосрочного прогноза температуры и ветра в пограничном слое атмосферы. При этом для оценки качества такой методики были использованы данные отдельных серий радиометрических (для температуры) и содарных (для ветра) измерений, проведенных соответственно в январе, июле и октябре 2004 г. в районе г. Томска (56,5° с.ш., 85° в.д.). Кроме того, данные о ветре были дополнены соответствующими измерениями, проведенными в октябре 2004 г. на метеорологической мачте, находящейся на территории Базового экспериментального комплекса Института оптики атмосферы СО РАН.

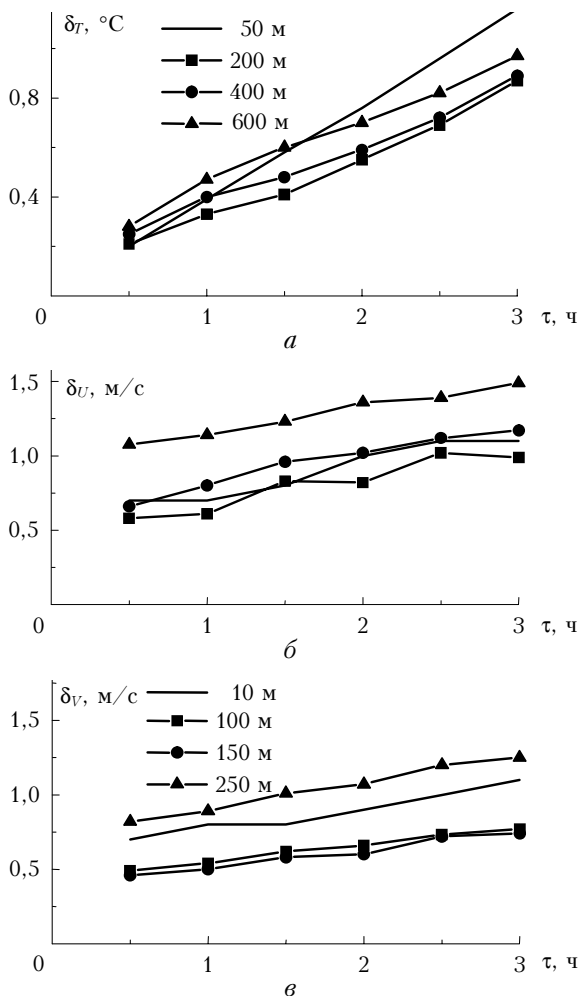
Следует также отметить, что данные температуры, измеренные с помощью дистанционного измерителя профиля температуры МТР-5 [8], получены для 13 высотных уровней: 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 и 600 м. В то же время данные о направлении и скорости ветра получены для высот 10, 20, 30 и 36 м (при использовании метеорологической мачты) и 100, 150, 200 и 250 м (при использовании содара «Волна-3»).

Для оценки успешности сверхкраткосрочного прогноза, проведенного на основе предложенного алгоритма с заблаговременностью $\tau = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ и 3 ч, были использованы стандартные (среднеквадратические) погрешности δ_ξ такого прогноза.

На рисунке приведены в качестве примера результаты точностной оценки качества предложенного алгоритма при его использовании в процедуре сверхкраткосрочного прогноза температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, проведенного для высот 50, 200, 400, 600 и 10, 100, 150, 250 м соответственно.

Из анализа рисунка и других полученных данных следует, что:

- предложенный алгоритм, основанный на использовании аппарата калмановской фильтрации и двумерной динамико-стохастической модели и примененный для сверхкраткосрочного прогноза температуры и ортогональных составляющих скорости ветра в пограничном слое атмосферы, дает наилучшие результаты при предсказании температуры. Действительно, даже при $\tau = 3$ ч стандартные погрешности сверхкраткосрочного прогноза температуры на всех рассматриваемых высотах не превышают значения 1,1 °С, а при $\tau = 2$ ч эти погрешности уже



Зависимость среднеквадратических ошибок сверхкраткосрочного прогноза температуры (а), скорости зонального (б) и меридионального (в) ветра от заблаговременности τ , проведенного в районе Томска с помощью динамико-стохастического алгоритма по данным радиометра (а) и содара (б, в) (последние дополнены данными метеомачты на $h = 10$ м)

варьируют в пределах 0,5–0,8 °С, что заметно меньше допустимой погрешности в 1 °С, установленной для тропосферы Всемирной метеорологической организацией [6];

- близкие (по точности) результаты тот же алгоритм дает при сверхкраткосрочном прогнозе скоростей зонального и меридионального ветра на уровне 10 м, когда используются данные метеорологической мачты, поскольку при $\tau = 3$ ч стандартные погрешности такого прогноза варьируют в пределах 0,7–1,2 м/с;

- несколько ухудшается качество сверхкраткосрочного прогноза, проведенного с помощью пред-

ложенного алгоритма, в случае, если этот прогноз осуществляется для скоростей зонального и меридионального ветра, полученных по данным содарных измерений. Однако и тогда стандартные погрешности δ_ξ при $\tau = 3$ ч находятся, причем независимо от составляющей скорости ветра и высотного уровня, в пределах 0,8–1,5 м/с, т.е. на уровне ошибок ветрового радиозондирования, равных 0,7–2,0 м/с [7].

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что разработанный алгоритм, основанный на двумерной динамико-стохастической модели и аппарате калмановской фильтрации и примененный для решения задачи сверхкраткосрочного (с заблаговременностью от 30 мин до 3 ч) прогноза температуры и ветра в пограничном слое атмосферы по данным радиометрических и содарных измерений, может быть использован на практике. Однако полученные результаты его точностной оценки из-за ограниченного объема взятых исходных данных требуют дополнительной проверки и уточнения на основе более длинных временных рядов экспериментальных наблюдений.

1. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В. Модифицированный метод группового учета аргументов как эффективный метод статистического оценивания характеристик свободной атмосферы в условиях информационной неопределенности // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 231–237.
2. Комаров В.С. Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. 255 с.
3. Комаров В.С., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Матвиенко Г.Г. Об опыте использования данных измерений трехтрассового корреляционного лидара в задаче статистического прогноза составляющих среднего ветра // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 541–546.
4. Лавриненко А.В., Комаров В.С., Попов Ю.Б. Методика сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы на основе алгоритма калмановской фильтрации и двумерной динамико-стохастической модели // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 4. С. 344–348.
5. Сейдж Э.П., Мэлса Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
6. Технический регламент. Т. 1 (Общая часть). Изд. 2-е, ВМО. № 49. ОД.2. Женева, 1959. Дополнение № 2. Женева, 1963.
7. Guide to meteorological instrument and observing practices. Paris, WMO, 1984. 130 p.
8. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Докл. РАН. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.

V.S. Komarov, S.N. Il'in, A.V. Kreminskiy, E.N. Kadygrov, A.V. Lavrinenko, N.Ya. Lomakina, S.L. Odintsov, Yu.B. Popov, A.I. Popova, V.A. Fedorov. **On the experience of application of a dynamic-stochastic prediction method in the problem of forecasting the state parameters of the atmospheric boundary layer from data of radiometric and sodar measurements.**

The results of application of the dynamic-stochastic method, based on the use of the Kalman filtering algorithm and the two-dimensional regression model, to the problem of ultra-short-term forecast of temperature and wind in the atmospheric boundary layer from the data of radiometric and sodar measurements are discussed.