

А.В. Лавриненко

## Исследование динамико-стохастического алгоритма сверхкраткосрочного прогноза метеорологических полей

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 24.04.2006 г.

Рассматриваются результаты исследования динамико-стохастического алгоритма сверхкраткосрочного прогноза, основанного на использовании аппарата калмановской фильтрации и двумерной регрессионной модели, и дается оценка его эффективности (в сравнении с исходным алгоритмом), проведенная для температуры и ветра по данным радиометрических и содарных измерений.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в области сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния пограничного слоя атмосферы (ПСА). Этому способствуют широкое внедрение в практику атмосферного мониторинга средств дистанционного (лидарного, радиометрического и акустического) зондирования, обеспечивающих получение данных с высоким временным разрешением, а также появление новых методик прогноза, реализуемых в рамках динамико-стохастического подхода. Одной из них является методика, основанная на алгоритме фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели [1]. Применение этой методики для сверхкраткосрочного прогноза температуры и ветра в ПСА, проведенного по данным радиометрических и содарных измерений с заблаговременностью от 0,5 до 3 ч, показало, что она дает вполне приемлемые по точности результаты. Однако их можно заметно улучшить, если провести комплексную модернизацию исходного алгоритма прогноза.

Согласно методике, изложенной в [1], для сверхкраткосрочного прогноза используется малопараметрическая двумерная динамико-стохастическая модель вида

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

где  $\xi_h(k)$  — измеренное значение метеорологического поля  $\xi$  на высоте  $h$  и в момент времени  $k$ ;  $d_{m,j}$  — неизвестные параметры модели ( $m$  — номер высоты в пределах заданного слоя атмосферы, а  $j$  — текущее значение дискретного времени);  $\xi_m(k-j)$  — измеренные значения того же поля на высотах с  $h-i$  до  $h+i$  ( $i = 1, 2, \dots$  определяет число заданных высот);  $\varepsilon(k)$  — невязка модели, обусловленная стохастичностью атмосферных процессов.

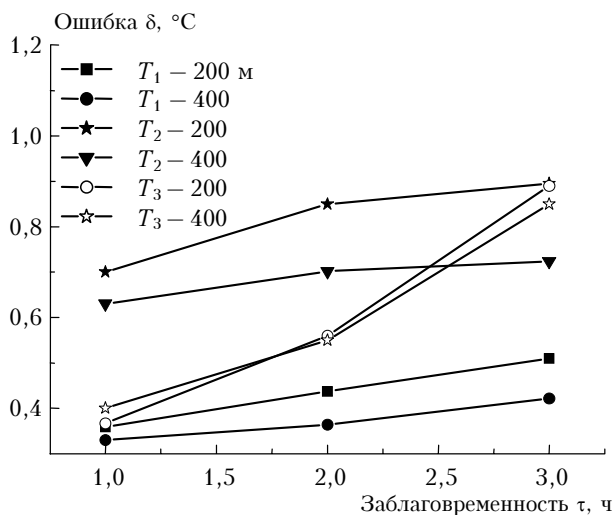
В зависимости от режима обработки исходных данных прогноз может выполняться по одноканальной или по двухканальной схемам прогноза.

Одноканальная схема прогноза предполагает использование непосредственно самих измерений либо сглаженных значений в модели (1). При использовании двухканальной схемы результирующая прогностическая оценка поля  $\xi$  складывается из суммы оценок регулярной составляющей поля  $\bar{\xi}$ , определяемой по данным предшествующих прогнозу измерений, взятых в интервале 3–4 ч, и оценки флуктуационной составляющей  $\xi'$ , полученной на основе модели (1).

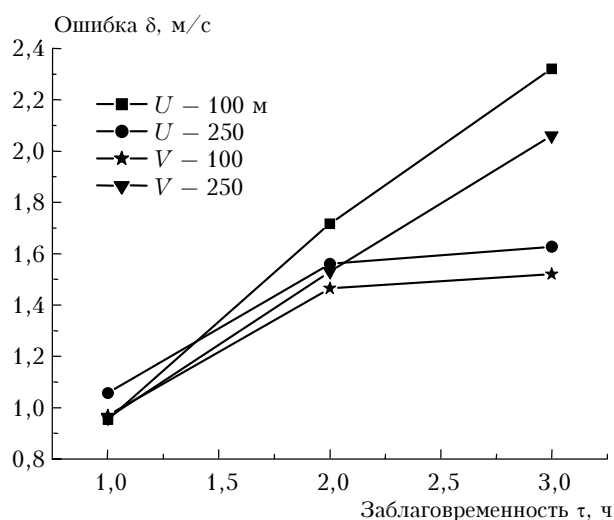
Рассмотрим теперь собственно проблему модернизации предложенного динамико-стохастического алгоритма сверхкраткосрочного прогноза, проводимой по тем же, что и в [1], данным радиометрических (для температуры) и содарных (для ветра) измерений, полученных в районе г. Томска. Эффективность указанного алгоритма зависит от режима обработки исходных данных, длительности интервала непрерывной работы фильтра Калмана и от длины исходной выборки, используемой в качестве предиктора. При этом в зависимости от характера атмосферного процесса возможно альтернативное построение алгоритма сверхкраткосрочного прогноза, который в процессе обработки исходной информации позволяет использовать в модели (1) либо фактические измерения, либо сглаженные данные (они получены путем осреднения по временному интервалу  $\Delta t = 1$  ч), либо отклонения от регулярной составляющей.

На рис. 1 приведены для отдельных высот графики поведения среднеквадратических ошибок прогноза температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра в зависимости от заблаговременности  $\tau$  для различных режимов обработки исходных данных.

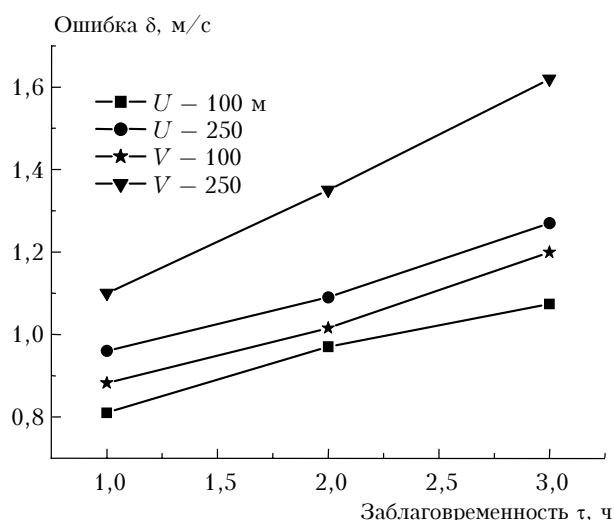
Рассмотрим вначале рис. 1, а, построенный для температуры, которая имеет достаточно медленный характер изменения во времени. При этом на рис. 1, а индексом 1 помечены графики, построенные для режима работы алгоритма, в котором исходные измерения подвержены процедуре сглаживания



a



b



v

Рис. 1. Поведение среднеквадратических ошибок сверхкраткосрочного прогноза температуры ( $T$ ), зональной ( $U$ ) и меридиональной ( $V$ ) составляющих скорости ветра в зависимости от заблаговременности  $\tau$  и различных режимов обработки исходных данных

(она проводится до момента их поступления на обработку в фильтр Калмана), индексом 2 — для режима обработки отклонений от регулярной составляющей и индексом 3 — для режима обработки фактических измерений. Анализ рис. 1, а показывает, что использование для прогноза непосредственно самих измерений (сглаженных — 1 и фактических — 3) предпочтительнее, чем их отклонений 2, при этом при  $\tau = 3$  ч дополнительное сглаживание исходной выборки перед обработкой позволяет заметно (на  $0,4$  °C) уменьшить (по сравнению с вариантами 2 и 3) ошибку прогноза.

На рис. 1, б и в представлены аналогичные графики, полученные для зональной ( $U$ ) и меридиональной ( $V$ ) составляющих скорости ветра, для которых типична высокая изменчивость во времени. На рис. 1, б показан режим, при котором используются фактические измерения, а на рис. 1, в режим, где используются отклонения от регулярной составляющей. Из анализа рис. 1, б и в видно, что при прогнозе составляющих скорости ветра для заблаговременности  $\tau = 1-3$  ч в качестве исходных данных лучше использовать их отклонения от регулярной составляющей. В этом случае возможный выигрыш в ошибке прогноза, например при  $\tau = 3$  ч (независимо от высоты и составляющей скорости ветра), составит от  $0,3$  до  $1,2$  м/с. В дальнейшем при исследовании алгоритма прогноза для температуры использовались сглаженные данные, а для ортогональных составляющих скорости ветра — отклонения от регулярной составляющей.

На рис. 2 в качестве примера даются графики поведения ошибок сверхкраткосрочного прогноза (с заблаговременностью  $\tau = 3$  ч) в зависимости от интервала непрерывной работы фильтра Калмана ( $\Delta t_R$ ) (рис. 2, а, б) и от длины исходной выборки, используемой в предикторе ( $\Delta t_{bg}$ ) (рис. 2, в, г). Анализ рис. 2, а, б показывает, что интервал непрерывной работы фильтра Калмана необходимо выбирать в пределах  $2 \text{ ч} < \Delta t_R < 6 \text{ ч}$  для различных атмосферных процессов. Несмотря на то что для реализаций температуры ошибка прогноза уменьшается с ростом интервала  $\Delta t_R$ , выигрыш достаточно мал по сравнению с резким ростом ошибки в случае, если исследуемый процесс представляет собой ортогональные составляющие скорости ветра. В свою очередь, из рис. 2, в, г следует, что зависимость ошибки прогноза от интервала  $\Delta t_{bg}$  для температуры достаточно существенна, причем при заблаговременности  $\tau = 3$  ч отмечается минимум этой ошибки в области  $\Delta t_{bg} \approx \tau$ . В то же время для ортогональных составляющих скорости ветра эта зависимость почти не прослеживается.

Таким образом, комплексный учет всех указанных выше путей модернизации алгоритма сверхкраткосрочного прогноза позволяет существенно уменьшить ошибку прогноза по сравнению с исходным алгоритмом. Это хорошо видно из нижеприведенной таблицы, где в качестве примера даются значения среднеквадратической погрешности прогноза  $\delta$ , проведенного для типичных высот при заблаговременности  $\tau = 2$  и  $3$  ч.

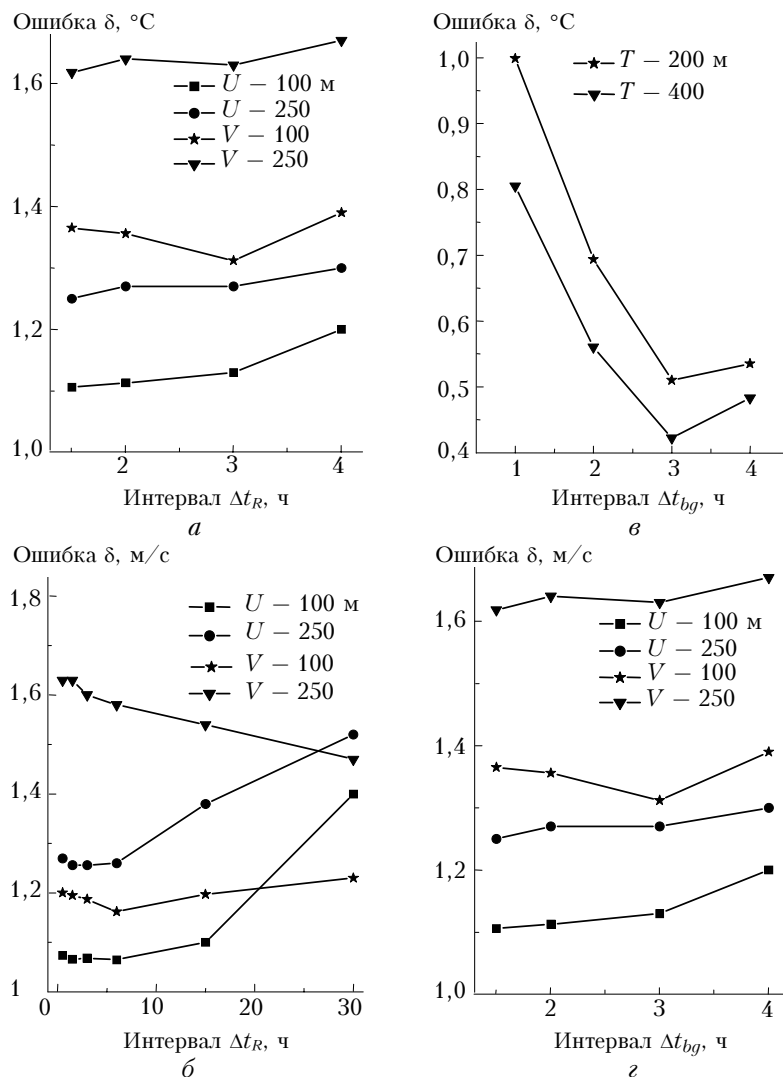


Рис. 2. Поведение среднеквадратических ошибок сверхкраткосрочного (с заблаговременностью  $\tau = 3$  ч) прогноза температуры ( $T$ ), зональной ( $U$ ) и меридиональной ( $V$ ) составляющих скорости ветра в зависимости от длительности интервала ( $\Delta t_R$ ) непрерывной работы фильтра Калмана и интервала исходной последовательности ( $\Delta t_{bg}$ ), используемой в предикторе

Высота, м	Модернизированный алгоритм		Исходный алгоритм	
	$\tau = 2$ ч	$\tau = 3$ ч	$\tau = 2$ ч	$\tau = 3$ ч
<i>Температура, °С</i>				
200	0,4	0,5	0,6	0,9
400	0,4	0,5	0,6	0,9
<i>Скорость зонального ветра, м/с</i>				
100	1,0	1,1	1,6	1,9
200	1,1	1,3	2,0	2,3
<i>Скорость меридионального ветра, м/с</i>				
100	0,8	1,2	1,8	2,1
200	1,3	1,6	1,9	2,3

Так, например, при заблаговременности  $\tau = 3$  ч и независимо от метеорологической величины и высотного уровня значения среднеквадратической

погрешности прогноза, проводимого с помощью модернизированного алгоритма, в 1,4–1,8 раза меньше, чем при применении исходного алгоритма.

Из полученных результатов можно сделать общий вывод: оптимизированный алгоритм сверхкраткосрочного прогноза может быть с успехом использован на практике.

1. Комаров В.С., Ильин С.Н., Креминский А.В., Кадыгров Е.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я., Одицов С.Л., Попов Ю.Б., Федоров В.А. Об опыте применения динамико-стохастического метода прогноза в задаче предсказания параметров состояния пограничного слоя атмосферы по данным радиометрических и содарных измерений // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 482–484.

*A.V. Lavrinenko. Study of dynamical-stochastic algorithm for ultra-short-term forecast of meteorological fields.*

Results of studies of a dynamical-stochastic algorithm for ultra-short-term forecast, based on application of the Kalman filtration and 2-D regression model, are presented. The algorithm is estimated relative to the initial one for the air temperature and wind, using the radiometric and sodar measurements.