

Е.В. Горев, В.С. Комаров, А.В. Лавриненко, В.В. Будаев

Численное восстановление профилей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы на основе алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели. Часть 2. Результаты исследований

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 10.12.2007 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований качества численного восстановления профилей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы, проведенного с помощью метода калмановской фильтрации и двумерной динамико-стохастической модели.

В статье [1] предложен новый методический подход к решению задачи численного восстановления высотных профилей той или иной метеорологической величины в пограничном слое атмосферы (ПСА), базирующийся на применении алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели, которая одновременно учитывает как особенности вертикальной структуры поля этой метеорологической величины, так и динамику его изменения во времени.

Целью настоящей статьи является рассмотрение результатов численной оценки качества и эффективности предложенного в [1] динамико-стохастического подхода, осуществленной на примере восстановления (по экспериментальным данным) вертикальных профилей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра до высоты 1,6 км.

Для исследования качества алгоритма калмановской фильтрации, использующего двумерную динамико-стохастическую модель вида [1, формула (1)], был взят массив данных двухсрочных (00 и 12 ч по Гринвичу) радиозондовых наблюдений за январь и июль 2004 г., полученный для двух аэрологических станций: Москва (55°45' с.ш., 37°57' в.д.) и Новосибирск (54°58' с.ш., 82°57' в.д.), находящихся в районах с различными физико-географическими условиями. При этом все аэрологические данные, используемые для формирования массива исходных наблюдений, были предварительно проинтерполированы (с помощью метода линейной интерполяции) со стандартных изобарических поверхностей: 1000, 975, 850 и 700 гПа, и уровней особых точек (включая уровень земной поверхности) на заданные геометрические высоты: 0, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000 и 1600 м. Кроме того, для статистической оценки качества восстановления

профилей ветра взяты не его направление и скорость, а зональная и меридиональная составляющие, поведение которых во времени более устойчиво.

Для реализации алгоритма калмановской фильтрации, приведенного в [1], в момент времени $k = 0$ (момент инициализации), т.е. при полном отсутствии априорной информации, был задан ряд начальных условий, а именно:

– начальный вектор оценивания $x_0^a = 0$ (т.е. модельные параметры $d_{j,m} = 0$), что обусловлено полным отсутствием полезной информации о поведении этих параметров;

– начальная корреляционная матрица шумов наблюдений $R_k = R_0$, элементы которой на главной диагонали r_{ii} (при условии, что шумы $\epsilon_i(k)$ не имеют корреляционных зависимостей) приняты, исходя из величин ошибок радиозондовых наблюдений [2], равными 0,7 °С (для температуры) и 1,0 м/с (для ортогональных составляющих скорости ветра);

– начальная корреляционная матрица шумов состояния $Q_k = Q_0$, элементы которой на главной диагонали q_{ii} (при условии, что шумы $\omega(k)$ также не имеют корреляционных зависимостей) задаются равными единице, исходя из предварительного анализа поведения вектора состояния, составленного из неизвестных безразмерных параметров модели [1, формула (1)].

Кроме того, при расчете весовых коэффициентов K_k в линейном фильтре Калмана должна использоваться, согласно [3], ковариационная матрица ошибок оценивания P_k^a , которую также необходимо задавать в момент инициализации этого фильтра. На практике обычно задают $P_k^a = P_0^a$, причем матрица P_0^a является диагональной, элементы которой на главной диагонали должны

лежать в пределах $P_{ij} = 1, \dots, 100$ (в нашем случае, как показал предварительный анализ, $P_{ij} = 10$), а вне главной диагонали они равняются нулю.

Что касается оценки качества предложенного алгоритма, осуществленной на примере температуры T , °С, зональной U , м/с и меридиональной V , м/с составляющих скорости ветра, то она проводилась с помощью стандартной (среднеквадратической) погрешности численного восстановления, определяемой из выражения вида

$$\delta_{\xi} = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\xi_{0,k}^a - \xi_{0,k}^0)^2 \right|^{1/2}, \quad (1)$$

где $\xi_{0,k}^a$ и $\xi_{0,k}^0$ — восстановленное и фактическое значение метеорологической величины в точке восстановления (x_0, y_0) в момент времени k ; N — число взятых реализаций), а также с помощью вероятности P ошибок такого восстановления $\Delta_k = \xi_k^a - \xi_k^0$, которые меньше или больше некоторой заданной величины (для температуры менее $\pm 1, \dots, \pm 4$ °С и более ± 4 °С, а для ортогональных составляющих скорости ветра менее $\pm 1, \dots, \pm 4$ м/с и более ± 4 м/с).

Перейдем теперь непосредственно к рассмотрению самих результатов исследования качества и эффективности алгоритма калмановской фильтрации, основанного на использовании двумерной динамико-стохастической модели и примененного для численного восстановления вертикальных профилей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра. При этом вначале, подобно работе [4], проведем сравнительный анализ поведения во времени фактических измерений, восстановленных значений и текущих ошибок восстановления указанных метеорологических величин на заданных высотных уровнях ПСА.

На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены для двух станций (Москва и Новосибирск) графики изменения во времени (в период с 14.01.04 00:00 GMT по 18.01.04. 12:00 GMT и с 11.01.04 00:00 GMT по 15.01.04. 12:00 GMT соответственно) фактических значений ξ_k^0 , восстановленных значений ξ_k^a и текущих ошибок восстановления Δ_k температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, построенные для трех типичных высотных уровней: 100, 600 и 1600 м.

Анализ рис. 1 и 2 показывает, что фактические и восстановленные значения температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра достаточно хорошо согласуются между собой. Особенно близки между собой фактические и восстановленные значения температуры, для которой ошибки восстановления Δ_k не превышают в основном 0,5 °С.

Однако, несмотря на такое согласованное поведение во времени фактических и восстановленных значений рассматриваемых метеорологических величин, для окончательного подтверждения высокого качества предложенного динамико-стохастического алгоритма целесообразно провести статисти-

ческую оценку его точности с помощью стандартных (среднеквадратических) погрешностей δ_{ξ} и вероятностей P ошибок восстановления температуры и ортогональных составляющих скорости ветра менее и более заданной величины.

В табл. 1 и 2 приведены данные подобной оценки для ст. Москва и Новосибирск.

Таблица 1

Стандартные погрешности δ_{ξ} вероятности $P(\cdot 10^2)$ ошибок восстановления высотных профилей температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра менее и более заданной величины, проведенного с помощью алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели для ст. Москва

Высота, м	Зима					δ_{ξ}	Лето					δ_{ξ}
	P						P					
	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 4$	$> \pm 4$		$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 4$	$> \pm 4$	
<i>Температура, °С</i>												
100	100	100	100	100	0	0,2	100	100	100	100	0	0,2
200	96	100	100	100	0	0,4	100	100	100	100	0	0,2
300	95	100	100	100	0	0,5	100	100	100	100	0	0,3
400	82	100	100	100	0	0,7	98	100	100	100	0	0,3
600	81	97	100	100	0	0,8	97	100	100	100	0	0,4
800	81	96	100	100	0	0,8	97	100	100	100	0	0,4
1000	80	96	100	100	0	0,9	95	100	100	100	0	0,4
1200	80	96	100	100	0	0,9	94	100	100	100	0	0,5
1600	80	95	100	100	0	0,9	90	100	100	100	0	0,6
<i>Зональная составляющая скорости ветра, м/с</i>												
100	98	100	100	100	0	0,3	98	100	100	100	0	0,3
200	98	99	100	100	0	0,6	98	100	100	100	0	0,3
300	76	95	97	98	2	1,2	97	99	100	100	0	0,5
400	62	90	95	96	3	1,7	95	97	100	100	0	0,7
600	53	76	93	95	5	1,9	95	97	100	100	0	0,7
800	45	66	88	91	9	2,2	94	97	100	100	0	0,7
1000	44	64	86	90	10	2,3	94	97	100	100	0	0,7
1200	40	62	84	90	10	2,4	89	97	100	100	0	0,8
1600	38	60	83	88	12	2,5	83	92	98	100	0	1,0
<i>Меридиональная составляющая скорости ветра, м/с</i>												
100	100	100	100	100	0	0,3	100	100	100	100	0	0,1
200	90	98	100	100	0	0,6	100	100	100	100	0	0,3
300	76	96	98	100	0	0,9	95	100	100	100	0	0,4
400	67	90	95	98	2	1,3	94	100	100	100	0	0,5
600	52	70	86	98	2	1,8	86	100	100	100	0	0,7
800	40	68	84	95	5	2,0	84	100	100	100	0	0,8
1000	39	66	84	93	7	2,1	83	100	100	100	0	0,8
1200	37	64	83	92	8	2,2	75	98	100	100	0	0,9
1600	35	60	83	91	9	2,3	70	94	100	100	0	1,0

Совместный анализ табл. 1 и 2 показывает, что использование алгоритма фильтра Калмана с двумерной динамико-стохастической моделью для численного восстановления вертикальных профилей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра действительно дает для всего пограничного слоя и независимо от взятой станции вполне приемлемые для практики результаты. Так, например, стандартные погрешности такого восстановления не превышают 0,9 °С зимой и 0,6 °С летом (для температуры) и соответственно 2,5 и 1,4 м/с для зональной и меридиональной составляющих скорости ветра.

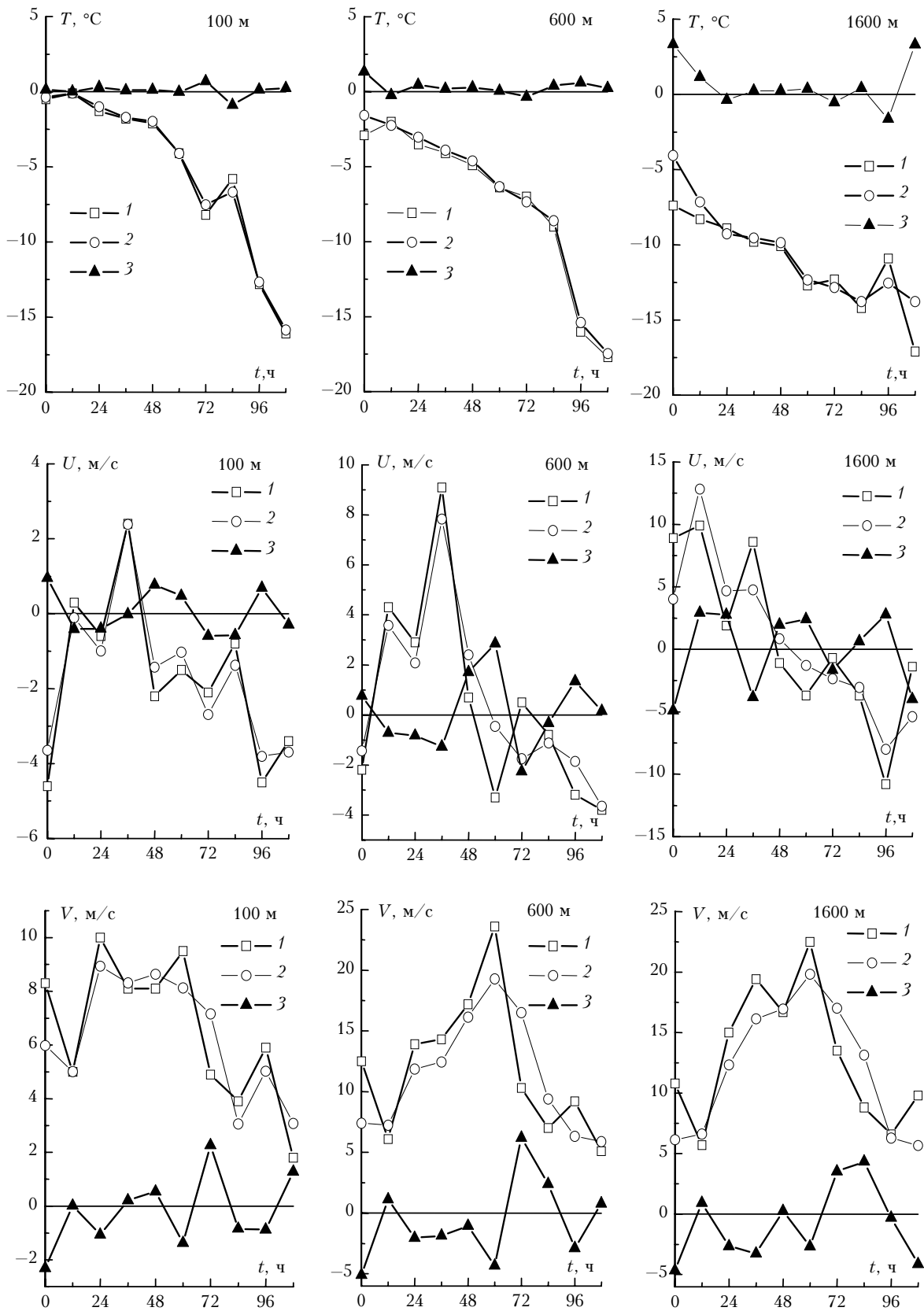


Рис. 1. Графики поведения во времени фактических измерений (1), восстановленных значений (2) и текущих ошибок (3) восстановления температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра на отдельных уровнях, полученные для контрольной станции Москва

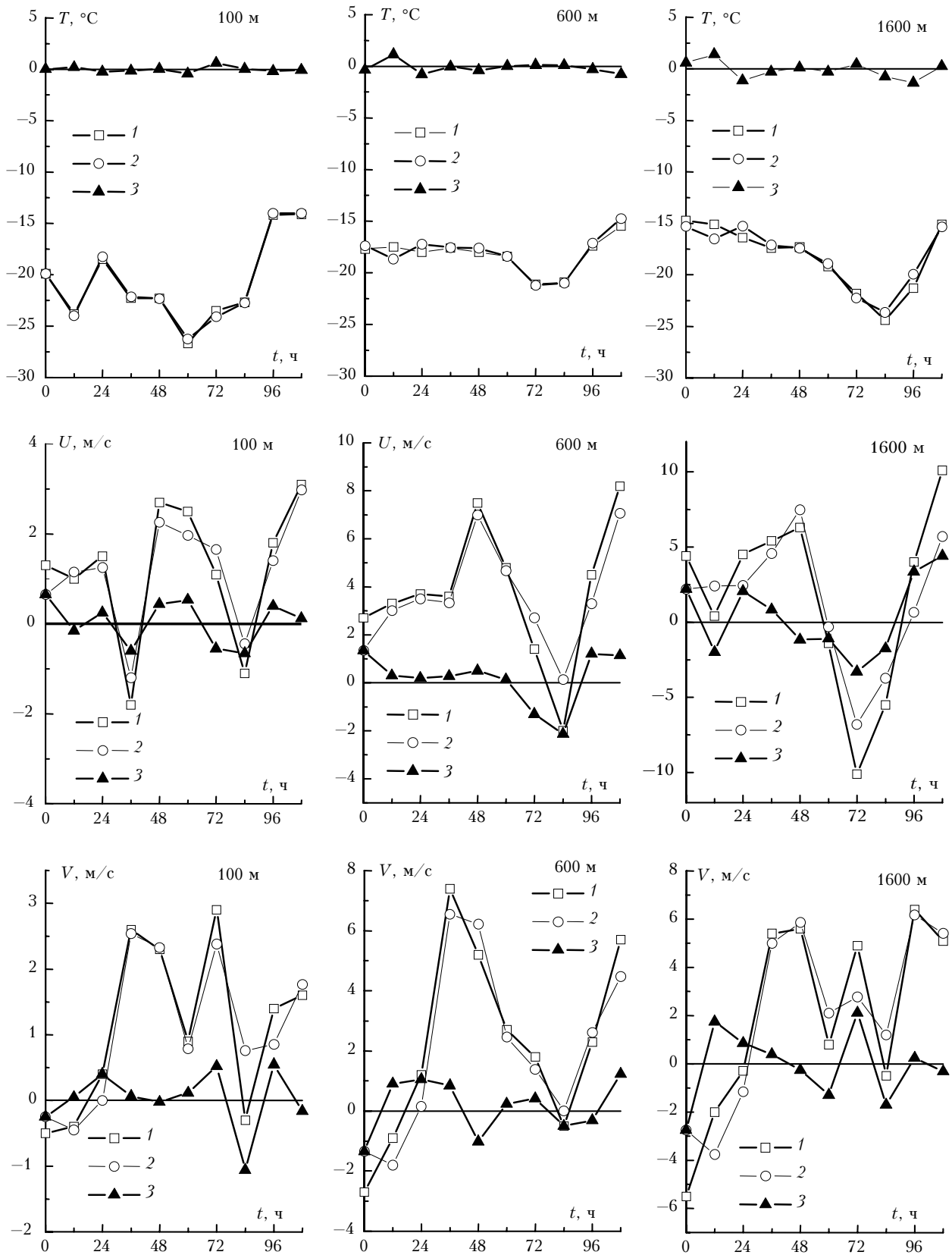


Рис. 2. Графики поведения во времени фактических измерений (1), восстановленных значений (2) и текущих ошибок (3) восстановления температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра на отдельных уровнях, полученные для контрольной станции Новосибирск

Таблица 2

Стандартные погрешности δ_ξ вероятности $P(\cdot 10^2)$ ошибок восстановления высотных профилей температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра менее и более заданной величины, проведенного с помощью алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели для ст. Новосибирск

Слой, м	Зима					δ_ξ	Лето					δ_ξ
	P						P					
	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 4$	$> \pm 4$		$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 4$	$> \pm 4$	
<i>Температура, °C</i>												
0–100	100	100	100	100	0	0,3	100	100	100	100	0	0,2
0–200	92	100	100	100	0	0,6	97	100	100	100	0	0,3
0–300	92	100	100	100	0	0,6	93	100	100	100	0	0,5
0–400	92	100	100	100	0	0,6	93	100	100	100	0	0,5
0–600	92	100	100	100	0	0,6	93	100	100	100	0	0,5
0–800	92	100	100	100	0	0,6	93	100	100	100	0	0,5
0–1000	92	100	100	100	0	0,6	93	100	100	100	0	0,5
0–1200	92	100	100	100	0	0,6	93	100	100	100	0	0,5
0–1600	92	100	100	100	0	0,6	93	100	100	100	0	0,5
<i>Зональная составляющая скорости ветра, м/с</i>												
0–100	98	100	100	100	0	0,4	85	100	100	100	0	0,7
0–200	83	100	100	100	0	0,7	75	96	100	100	0	0,8
0–300	75	98	100	100	0	0,9	68	96	100	100	0	1,0
0–400	65	93	95	100	0	1,1	68	93	100	100	0	1,0
0–600	60	88	95	98	2	1,5	68	93	100	100	0	1,0
0–800	58	88	95	98	2	1,6	68	93	100	100	0	1,0
0–1000	58	85	95	98	2	1,8	67	93	100	100	0	1,0
0–1200	58	85	95	98	2	1,8	66	90	100	100	0	1,1
0–1600	58	85	90	98	2	1,9	65	90	100	100	0	1,2
<i>Меридиональная составляющая скорости ветра, м/с</i>												
0–100	90	98	100	100	0	0,6	91	97	100	100	0	0,6
0–200	78	98	100	100	0	0,9	91	97	100	100	0	0,6
0–300	70	98	100	100	0	0,9	84	97	100	100	0	0,8
0–400	68	98	100	100	0	0,9	77	97	100	100	0	0,9
0–600	68	98	100	100	0	0,9	70	97	100	100	0	1,0
0–800	68	98	100	100	0	0,9	69	94	100	100	0	1,1
0–1000	68	97	99	100	0	1,0	67	94	100	100	0	1,3
0–1200	60	95	98	100	0	1,1	66	94	100	100	0	1,3
0–1600	55	88	98	100	0	1,3	64	88	97	100	0	1,4

Кроме того, о достаточно высоком качестве предложенного алгоритма говорят и значения вероятности малых ошибок восстановления (менее ± 1 °C для температуры и менее ± 1 м/с для ортогональных составляющих скорости ветра). Правда, если для температуры вероятность ошибок восстановления менее ± 1 °C во всем пограничном слое (причем независимо от взятой станции и сезона) порядка 0,80–1,00, то для составляющих скорости ветра вероятность ошибок менее ± 1 м/с варьирует в близких пределах (0,64–1,00) только в летний период (зимой подобные ее значения отмечаются главным образом лишь в слое 0–400 м).

И все же остается невыясненным вопрос: будет ли предложенный алгоритм по своему качеству эффективнее модифицированного метода группового учета аргументов (ММГУА), разработанного ранее (см., например, [5]) и показавшего достаточно хорошие результаты восстановления профилей температуры и ветра, которые оказались к тому же

заметно лучше, чем данные, полученные с помощью наиболее часто употребляемого на практике метода многомерной экстраполяции.

С этой целью воспользуемся табл. 3, в которой приводятся в качестве примера величины стандартных δ_ξ и относительных $\theta_\xi = \delta_\xi / \sigma_\xi$ (здесь σ_ξ – среднеквадратическое отклонение) погрешностей численного восстановления средних в слое значений температуры $\langle T \rangle_{h_0, h}$ и ортогональных составляющих скорости ветра $\langle U \rangle_{h_0, h}$ и $\langle V \rangle_{h_0, h}$, осуществленного по данным ст. Новосибирск с помощью двух альтернативных методов: ММГУА и фильтра Калмана с двумерной динамико-стохастической моделью.

Таблица 3

Стандартные δ_ξ и относительные θ_ξ (%) погрешности восстановления средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, проводимого с помощью алгоритмов ММГУА (1) и фильтра Калмана с двумерной динамико-стохастической моделью (2) по данным ст. Новосибирск

Слой, м	Зима				Лето			
	δ_ξ		θ_ξ		δ_ξ		θ_ξ	
	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>Температура, °C</i>								
0–200	0,9	0,3	13	04	0,8	0,2	16	04
0–400	1,1	0,4	17	06	1,0	0,3	20	06
0–800	1,4	0,4	22	06	1,2	0,3	25	06
0–1200	1,6	0,4	26	06	1,4	0,3	30	06
0–1600	1,8	0,4	30	07	1,5	0,4	33	08
<i>Зональная составляющая скорости ветра, м/с</i>								
0–200	1,1	0,4	35	13	1,1	0,4	39	14
0–400	1,4	0,6	36	15	1,3	0,6	43	20
0–800	1,8	0,8	40	18	1,6	0,7	48	21
0–1200	2,1	1,0	44	21	1,8	0,7	53	21
0–1600	2,3	1,1	45	22	2,0	0,9	57	25
<i>Меридиональная составляющая скорости ветра, м/с</i>								
0–200	0,8	0,4	27	13	0,6	0,3	24	12
0–400	1,2	0,6	35	18	0,9	0,5	32	18
0–800	1,5	0,7	42	19	1,2	0,6	39	19
0–1200	1,8	0,7	49	19	1,6	0,7	50	22
0–1600	2,0	0,8	50	20	1,8	0,8	53	24

Здесь у читателя может возникнуть вопрос, а почему в качестве восстанавливаемых параметров атмосферы берутся не сами уровенные наблюдения за рассматриваемыми метеорологическими величинами, а их средние в слое значения? Это обусловлено тем, что при сравнении эффективности двух альтернативных методов мы воспользовались, по аналогии с [6], результатами численной оценки качества восстановления $\langle T \rangle_{h_0, h}$, $\langle U \rangle_{h_0, h}$ и $\langle V \rangle_{h_0, h}$, широко используемых при расчете пространственного распространения облака загрязняющей примеси, когда вместо уровенных наблюдений за температурой и ветром берутся данные их усреднения по отдельным атмосферным слоям [7].

Анализ данных табл. 3 показывает, что предложенный нами алгоритм, базирующийся на применении фильтра Калмана и двумерной динамико-

стохастической модели, дает (по сравнению с алгоритмом ММГУА) существенно лучшие по качеству результаты численного восстановления средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра. Действительно, использование алгоритма фильтра Калмана с двумерной динамико-стохастической моделью позволяет улучшить качество восстановления, причем независимо от сезона и слоя атмосферы, в 2,8–4,7 раза (для $\langle T \rangle_{h_0,h}$ и в 2,0–2,8 раза (для $\langle U \rangle_{h_0,h}$ и $\langle V \rangle_{h_0,h}$). К тому же относительная погрешность θ_ξ такого восстановления для средних в слое значений температуры составляет всего 4–8%, а для средних в слое значений скорости зонального и меридионального ветра она порядка 12–25% (при использовании алгоритма ММГУА величины θ_ξ варьирует в пределах 13–33 и 24–57% соответственно). Все это говорит о высокой точности и эффективности численного восстановления параметров $\langle T \rangle_{h_0,h}$, $\langle U \rangle_{h_0,h}$ и $\langle V \rangle_{h_0,h}$ в случае, когда в качестве алгоритма вертикальной экстраполяции применяется фильтр Калмана с двумерной динамико-стохастической моделью.

В заключение следует сказать, что предложенный алгоритм даст более высокие результаты восстановления (как самих рассматриваемых метеорологических величин, так и особенно их средних в слое значений) при использовании не данных

радиозондирования, когда частота измерений составляет всего 2 раза в сутки, а, например, данных лидарного дистанционного зондирования, обладающего высоким временным разрешением.

1. Горев Е.В., Комаров В.С., Лавриненко А.В., Будаев В.В. Численное восстановление профилей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы на основе алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели. Часть 1. Методические основы // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 4. С. 323–326.
2. Guide to meteorological instrument and observing practices. Paris, WMO, 1984. 130 p.
3. Браммер К., Зифорлинг Г. Фильтр Калмана–Бьюси: Пер. с нем. М.: Наука, 1982. 200 с.
4. Komarov V.S., Lavrinenko A.V., Lomakina N.Ya., Popov Yu.B., and Popova A.I. New Method of Spatial Extrapolation of Meteorological Fields on the Mesoscale Level Using a Kalman Filter Algorithm for a Four-Dimensional Dynamic-Stochastic Model // J. of Atmos. and Ocean. Technol. 2007. V. 24. N 2. P. 182–193.
5. Комаров В.С. Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 256 с.
6. Комаров В.С., Попов Ю.Б., Суворов С.С., Кураков В.А. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. 236 с.
7. Брюхань Ф.Ф. Методы климатической обработки и анализа аэрологической информации. М.: Гидрометеопздат, 1983. 112 с.

E.V. Gorev, V.S. Komarov, A.V. Lavrinenko, V.V. Budaev. Numerical retrieval of temperature and wind profiles in the boundary atmospheric layer, based on the Kalman filter algorithm and 2D dynamical-stochastic model. Part 2. Investigation results.

Result of experimental investigation of a quality numerical retrieval profile air temperature and wind in boundary atmospheric layer, using the 2D dynamical-stochastic model and the Kalman filter method, are discussed.