

В.С. Комаров, Ю.Б. Попов

Оценивание и прогнозирование параметров состояния атмосферы с помощью алгоритма фильтра Калмана. Часть 2. Результаты исследований

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 21.09.2000 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований качества пространственного прогноза параметров состояния атмосферы (на примере температуры и ветра), проведенных для метода калмановской фильтрации, с использованием данных многолетних аэрологических наблюдений, полученных для типичного мезометеорологического полигона.

Априори можно считать, что пространственный прогноз мезометеорологических полей, осуществляемый на основе метода калмановской фильтрации [1], будет существенно лучше, чем тот же прогноз, но проведенный с помощью одного из альтернативных методов экстраполяции (полиномиальной аппроксимации или оптимальной экстраполяции), поскольку этот метод базируется на одновременном учете как особенностей горизонтальной статистической структуры того или иного поля на отдельных атмосферных уровнях, так и динамики его временных изменений. Однако такое предположение требует для своего обоснования проведения специальных исследований.

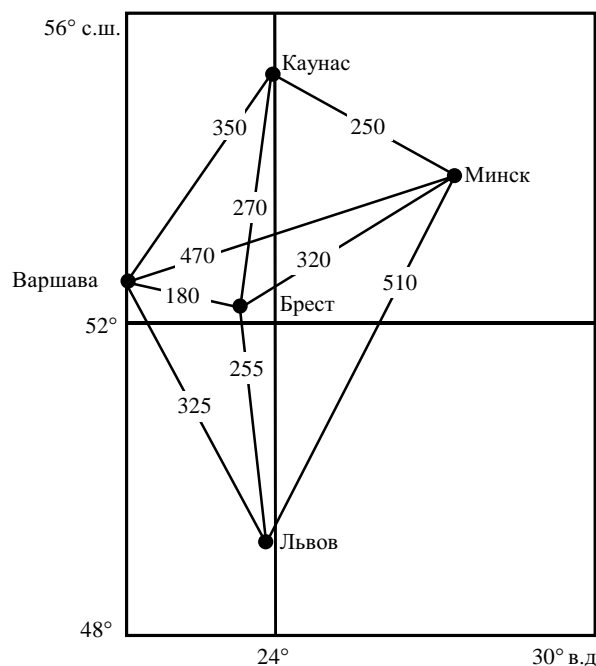
Целью данной работы являются экспериментальное подтверждение работоспособности синтезированных алгоритмов [1], а также их качественная оценка.

Остановимся, в первую очередь, на характеристике исходного материала и на методических аспектах статистической оценки качества пространственно-го прогноза.

Для проведения пространственного прогноза на основе метода калмановской фильтрации и оценки качества этого прогноза были использованы данные многолетних (1961–1975 гг.) радиозондовых наблюдений пяти аэрологических станций: Варшава (52°11' с.ш., 20°58' в.д.), Каунас (54°53' с.ш., 23°53' в.д.), Брест (52°07' с.ш., 23°41' в.д.), Минск (53°11' с.ш., 27°32' в.д.) и Львов (49°49' с.ш., 23°57' в.д.), которые представляют типичный мезометеорологический полигон (рисунком).

Для экспериментальных исследований из общего массива исходных данных были выбраны синхронные по времени (для всех станций) двухсрочные (0 и 12 ч по Гринвичу) наблюдения. Отобранные данные были приведены (с помощью линейной интерполяции и с учетом данных особых точек) к единой системе геометрических высот, включающей в себя следующие уровни: 0 (уровень земли), 200, 400, 800, 1200, 1600,

2000, 2400, 3000, 4000, 5000, 6000 и 8000 м, которые позволяют описать почти всю тропосферу (в том числе и пограничный слой) с большим вертикальным разрешением.



Мезометеорологический полигон (расстояния в километрах)

Использование указанных уровней обусловлено требованиями численного прогноза пространственного распространения техногенных загрязняющих веществ, осуществляемого в тропосфере (при максимуме их переноса в пограничном слое атмосферы [2]). Именно для этого прогноза была реализована процедура экстраполяции мезометеорологических полей (в нашем случае полей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра) по пространству с помощью метода калмановской фильтрации.

Известно [3], что для практических расчетов пространственного распространения облака какой-либо примеси (и в первую очередь, техногенного происхождения) обычно применяются не данные уровней измерений температуры и ветра (эти метеовеличины играют важную роль в переносе загрязняющих веществ), а результаты их осреднения по отдельным слоям. Поэтому для формирования исходных массивов, используемых для решения задачи пространственного прогноза мезометеорологических полей, как и в [4], применена процедура послойного осреднения температуры воздуха T , зональной V_x и меридиональной V_y составляющих скорости ветра, осуществляемого с помощью выражений вида

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

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

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

В выражениях (1)–(3) символ $\langle \bullet \rangle$ обозначает процедуру осреднения по вертикали в некотором слое атмосферы $h - h_0$ (здесь h_0 и h – высота нижней и верхней границы этого слоя), причем высота h_0 соответствует уровню земной поверхности и принимается равной нулю.

При осреднении были использованы следующие атмосферные слои: 0–200, 0–400, 0–800, 0–1200, 0–1600, 0–2000, 0–2400, 0–3000, 0–4000, 0–5000, 0–6000 и 0–8000 м.

Что касается качества пространственного прогноза средних в слое (или просто средних) значений температуры $\langle T \rangle_{h_0, h}$, зонального $\langle V_x \rangle_{h_0, h}$ и меридионального $\langle V_y \rangle_{h_0, h}$ ветра, осуществленного на основе метода калмановской фильтрации, то она производилась с помощью стандартной (среднеквадратической) погрешности такого прогноза δ_ξ , определяемой из выражения вида

$$\delta_\xi = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\xi}_i - \xi_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

(здесь $\hat{\xi}_i$ и ξ_i – спрогнозированное и измеренное значения метеорологической величины соответственно, а n – число реализаций), а также вероятности ошибок прогноза $P = P(\Delta\xi < X)$. Под ошибкой прогноза будем понимать величину $\Delta\xi_i = |\hat{\xi}_i - \xi_i|$, а под X – некоторый заданный порог.

При этом для оценки качества взятого метода пространственного прогноза был использован один из наиболее распространенных способов. Он согласно [5] базируется на процедуре сравнения значений метеорологической величины, полученных в результате прогноза (экстраполяции) этой величины на некото-

рую контрольную станцию по данным окружающих станций, с фактическими измерениями, проведенными на той же контрольной станции в сроки прогнозирования. Сразу же отметим, что в качестве контрольных станций были использованы ст. Варшава и Львов, находящиеся на расстоянии 180 и 255 км от ближайшей станции Брест, имеющей фактические данные.

Кроме того, для оценки качества пространственного прогноза мезометеорологических полей методом калмановской фильтрации была использована также и процедура его сопоставления с другими методами. С этой целью были привлечены результаты точностной оценки двух альтернативных методов: модифицированного метода группового учета аргументов (ММГУА) и широко распространенного метода оптимальной экстраполяции, которые были заимствованы из нашей работы [4] (для станции Варшава) и получены вновь (для станции Львов).

Перейдем теперь к рассмотрению результатов исследований качества пространственного прогноза, проведенного на примере мезомасштабных полей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра с помощью метода калмановской фильтрации. С этой целью воспользуемся табл. 1 и 2, содержащими значения стандартных погрешностей δ_ξ пространственного прогнозирования средней температуры $\langle T \rangle_{h_0, h}$, зонального $\langle V_x \rangle_{h_0, h}$ и меридионального $\langle V_y \rangle_{h_0, h}$ ветра, а также вероятности ошибок прогноза P .

Сразу же отметим, что в табл. 1 и 2 приводятся в качестве примера результаты статистической оценки только для летнего сезона, когда в умеренных широтах северного полушария пространственные корреляционные связи существенно (по сравнению с зимой) ослаблены [6].

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что:

– во-первых, алгоритм пространственного прогноза мезометеорологических полей, основанный на методе калмановской фильтрации и примененный в задаче численного прогнозирования средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, дает вполне приемлемые для практики результаты, особенно при их экстраполяции на расстояние 180 км. Действительно, на этом расстоянии и независимо от взятого слоя атмосферы вероятность P ошибок (например для $\Delta T \leq 2$ °С и $\Delta V \leq 2$ м/с) составляет 0,71–0,93 (для средних в слое значений температуры) и 0,66–0,71 (для составляющих средних в слое значений скорости ветра);

– во-вторых, этот алгоритм дает наилучшие результаты прогноза (на расстояние 180 км) для средних в слое значений температуры, когда стандартные (среднеквадратические) погрешности независимо от слоя атмосферы варьируют в пределах 1,0–1,5 °С, причем на высотах более 3 км они находятся на уровне допустимой погрешности в 1 °С, установленной для тропосферы Всемирной метеорологической организацией [7].

– в-третьих, качество пространственного прогнозирования параметров $\langle T \rangle_{h_0, h}$, $\langle V_x \rangle_{h_0, h}$ и $\langle V_y \rangle_{h_0, h}$, как и следовало ожидать, заметно ухудшается с увеличением расстояния от 180 до 255 км. При этом наибольшее ухудшение с увеличением расстояния характерно для результатов прогноза средних в слое значений температуры (в 1,6–2,0 раза), что может быть связано с не вполне адекватным выбором дина-

мической модели, играющей важную роль в алгоритме калмановской фильтрации.

Рассмотрим результаты качественной оценки метода калмановской фильтрации в сравнении с двумя другими методами, а именно, с традиционным методом оптимальной экстраполяции, получившим широкое распространение в объективном анализе метеорологических полей [5, 8–10], и нетрадиционным

Таблица 1

Стандартные погрешности δT и вероятности P ошибок пространственного прогноза средних в слое значений температуры, проведенного методом калмановской фильтрации до расстояний 180 (1-я колонка) и 255 км (2-я колонка)

Слой, м	Вероятность, $P \times 10^2$										$\delta T, ^\circ\text{C}$	
	$\Delta T \leq 1 ^\circ\text{C}$		$\Delta T \leq 2 ^\circ\text{C}$		$\Delta T \leq 3 ^\circ\text{C}$		$\Delta T \leq 4 ^\circ\text{C}$		$\Delta T > 4 ^\circ\text{C}$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0–200	38	24	71	50	87	65	94	80	06	20	1,5	2,6
0–400	38	24	71	50	88	65	94	80	06	20	1,5	2,6
0–800	39	24	71	49	88	65	94	79	06	21	1,5	2,6
0–1200	40	24	72	49	90	65	97	79	03	21	1,4	2,6
0–1600	41	24	73	49	92	66	98	79	02	21	1,4	2,6
0–2000	42	25	74	49	93	67	99	79	01	21	1,4	2,6
0–2400	44	26	76	50	94	68	99	80	01	20	1,3	2,5
0–3000	51	27	81	51	96	69	99	81	01	19	1,2	2,4
0–4000	56	28	87	52	98	70	99	83	01	17	1,1	2,3
0–5000	63	29	90	56	98	71	99	87	01	13	1,1	2,2
0–6000	64	30	92	58	98	73	99	89	01	11	1,0	2,1
0–8000	68	32	93	60	99	76	99	91	01	09	1,0	2,0

Таблица 2

Стандартные погрешности δV и вероятности P ошибок пространственного прогноза средних в слое значений зонального и меридионального ветра, проведенного методом калмановской фильтрации до расстояний 180 (1-я колонка) и 255 км (2-я колонка)

Слой, м	Вероятность, $P \times 10^2$										$\delta V, \text{ м/с}$	
	$\Delta V \leq 1 \text{ м/с}$		$\Delta V \leq 2 \text{ м/с}$		$\Delta V \leq 3 \text{ м/с}$		$\Delta V \leq 4 \text{ м/с}$		$\Delta V > 4 \text{ м/с}$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Зональный ветер V_x												
0–200	44	41	68	67	87	86	94	93	06	07	1,8	2,0
0–400	43	40	62	61	86	83	93	92	07	08	1,9	2,1
0–800	39	36	60	59	84	78	93	90	07	10	2,0	2,3
0–1200	36	33	61	58	83	78	92	88	08	12	2,1	2,4
0–1600	34	31	63	57	82	76	92	86	08	14	2,1	2,5
0–2000	36	29	63	57	82	74	92	85	08	15	2,1	2,5
0–2400	37	28	63	57	82	73	92	85	08	15	2,1	2,5
0–3000	38	26	65	53	84	72	93	85	07	15	1,9	2,5
0–4000	39	23	71	50	87	71	94	83	06	17	1,6	2,6
0–5000	42	22	71	45	88	70	95	82	05	18	1,5	2,7
0–6000	40	22	69	42	86	68	95	81	05	19	1,5	2,8
0–8000	38	22	66	41	85	63	94	79	06	21	1,6	3,0
Меридиональный ветер V_y												
0–200	45	40	69	65	87	85	94	93	06	07	1,6	1,9
0–400	46	39	69	64	81	80	91	90	09	10	1,7	2,1
0–800	42	39	68	64	81	79	91	89	09	11	1,7	2,3
0–1200	39	37	68	63	81	79	91	88	09	12	1,7	2,5
0–1600	39	37	68	61	82	77	91	87	09	13	1,7	2,6
0–2000	39	35	68	61	83	76	91	86	09	14	1,8	2,7
0–2400	41	34	68	60	84	75	92	86	09	14	1,8	2,8
0–3000	40	32	68	60	83	74	91	86	09	14	1,9	2,8
0–4000	39	26	68	58	83	73	91	86	09	14	2,0	2,9
0–5000	38	25	68	52	82	69	91	84	09	16	2,1	3,1
0–6000	38	23	67	43	81	66	90	81	10	19	2,3	3,5
0–8000	34	21	66	40	78	55	89	78	11	22	2,4	3,9

Стандартные погрешности δ пространственного прогноза средних в слое значений температуры, зонального и меридионального ветра, проведенного методом оптимальной экстраполяции (1-я колонка), комплексным методом (2-я колонка) и методом калмановской фильтрации (3-я колонка) до расстояния 180 км

Слой, м	Температура, °С			Зональный ветер, м/с			Меридиональный ветер, м/с		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0–200	1,6	1,2	1,5	2,8	1,8	1,8	3,0	2,2	1,6
0–400	1,6	1,3	1,5	2,8	2,0	1,9	3,1	2,3	1,7
0–800	1,6	1,3	1,5	2,7	2,1	2,0	3,1	2,3	1,7
0–1200	1,7	1,5	1,4	2,7	2,2	2,1	3,1	2,4	1,7
0–1600	1,9	1,6	1,4	2,7	2,2	2,1	3,0	2,4	1,7
0–2000	2,0	1,7	1,4	2,6	2,2	2,1	2,9	2,4	1,8
0–2400	2,2	1,8	1,3	2,6	2,2	2,1	2,9	2,4	1,8
0–3000	2,5	2,0	1,2	2,6	2,2	1,9	2,9	2,4	1,9
0–4000	2,7	2,2	1,1	2,6	2,2	1,6	2,8	2,4	2,0
0–5000	2,8	2,3	1,1	2,6	2,2	1,5	2,8	2,4	2,1
0–6000	3,0	2,5	1,0	2,6	2,2	1,5	2,8	2,4	2,3
0–8000	3,2	2,6	1,0	2,5	2,2	1,6	2,8	2,4	2,4

комплексным методом, основанным на использовании алгоритма ММГУА [11–14]. С этой целью воспользуемся табл. 3, содержащей значения стандартных погрешностей δ пространственного прогноза средних в слое значений температуры, зонального и меридионального ветра, проведенного до расстояния 180 км и летнего сезона с помощью трех альтернативных методов: метода оптимальной экстраполяции, комплексного метода, базирующегося на алгоритме ММГУА, и метода калмановской фильтрации. При этом данные статистической оценки качества метода оптимальной экстраполяции и комплексного метода заимствованы нами из [4].

Из анализа данных табл. 3 следует, что:

– метод оптимальной калмановской фильтрации дает наилучшие по качеству результаты, исключая лишь случаи прогноза средней температуры в слоях атмосферы 0–200, 0–400 и 0–800 м, где лучшие результаты получаются при использовании комплексного алгоритма. Действительно, для метода калмановской фильтрации характерны наименьшие значения стандартных (среднеквадратических) погрешностей прогноза во всем рассматриваемом слое тропосферы (до высоты 8 км), равные 1,0–1,5° (для средних в слое значений температуры) и 1,5–2,4 м/с (для средних в слое значений скоростей зонального и меридионального ветра);

– наибольший выигрыш по точности метод калмановской фильтрации дает при пространственном прогнозировании средних в слое значений температуры при условии, когда высоты $h \geq 4$ км. В этих случаях среднеквадратическая погрешность δ в два и более раз меньше по своей величине той же погрешности, но полученной при использовании комплексного метода или метода оптимальной экстраполяции, причем последний дает наихудшие результаты.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования по оценке качества пространственного прогноза мезометеорологических полей (и в частности, полей температуры и ветра) показали, что метод калмановской фильтрации является достаточно эф-

фективным и превышает по своей точности комплексный метод и особенно метод оптимальной экстраполяции.

Следовательно, этот метод может быть с успехом использован в процедуре объективного анализа подобных полей, результаты которого являются основой для решения задачи диагноза и прогноза процессов загрязнения атмосферы на локально-региональном уровне.

В заключение следует подчеркнуть, что рассмотренный метод может быть существенно улучшен. С этой целью необходимо его доработать в части:

1) возможного использования адаптивных структур фильтра Калмана (ФК), позволяющих осуществлять:

– параллельное включение нескольких ФК, инициализированных с различными начальными значениями неизвестных интервалов временной и пространственной корреляции, с последующим выбором наилучшего фильтра;

– использование специального ФК, определяющего в реальном масштабе времени значения интервалов корреляции с последующим применением полученных значений в фильтрах для прогноза метеорологических величин;

2) применения более сложных аналитических моделей, описывающих динамику поведения метеорологических величин во времени и в пространстве и обеспечивающих более адекватное отражение физических процессов;

3) использования измерительных станций, обеспечивающих большую частоту измерений и их повышенную точность;

4) оптимизации числа измерительных станций с точки зрения их информативности.

Перечисленные вопросы требуют специальной проработки и будут предметом наших дальнейших исследований.

2. *Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г.* Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 423 с.
3. *Брюхань Ф.Ф.* Методы климатической обработки и анализа аэрологической информации. М.: Гидрометеоиздат, 1983. 112 с.
4. *Комаров В.С., Креминский А.В., Попов Ю.Б.* // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 8. С. 808–819.
5. *Гандин Л.С., Каган Р.Л.* Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 359 с.
6. *Статистическая структура метеорологических полей* / Под ред. Л.С. Гандина, В.И. Захариева, Р. Целнаи. Будапешт, 1976. 365 с.
7. *Технический регламент*. Т. 1 (Общая часть). Изд. 2-е, ВМО. № 49. ОД. 2. Женева, 1959. Дополнение № 2. Женева, 1963.
8. *Белов П.Н.* Практические методы численного прогноза погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 335 с.
9. *Гордин В.А.* Математические задачи гидродинамического прогноза погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 264 с.
10. *Крамар В.Ф., Менжулина Т.В.* // Метеорология и гидрология. 1991. № 12. С. 20–28.
11. *Комаров В.С., Креминский А.В.* // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 941–965.
12. *Комаров В.С.* Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 256 с.
13. *Комаров В.С., Креминский А.В., Попов Ю.Б.* // Метеорология и гидрология. 1999. № 8. С. 37–45.
14. *Комаров В.С., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б., Синева К.Я.* // Всерос. научная конф. «Климат, мониторинг окружающей среды, гидрометеорологическое прогнозирование и обслуживание». Казань, 5–7 июля 2000 г. Казань: УНИПРЕСС, 2000. С. 214–216.

V.S. Komarov, Yu.B. Popov. Estimate and forecasting of the atmosphere state parameters using the Kalman filtering algorithm. Part 2. Results of investigation.

Experimental results of investigation of the quality of spatial forecasting of the atmospheric state parameters (temperature and wind) by the Kalman filtering method are under discussion. The experiments were conducted based on many-year data of aerologic observations from a typical mesometeorologic station.