

Информационно-вычислительная система «Метео» для метеорологической поддержки прикладных задач. Часть 2. Результаты испытания системы

В.С. Комаров¹, Е.В. Горев¹, А.Я. Богушевич², А.В. Лавриненко^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 12.12.2008 г.

Рассмотрены результаты апробации и статистической оценки качества алгоритмов, примененных в информационно-вычислительной системе «Метео» для восстановления, сверхкраткосрочного прогноза и пространственной интерполяции (экстраполяции) полей метеорологических величин (геопотенциала, температуры и ортогональных составляющих скорости ветра) в области мезомасштаба.

Ключевые слова: информационно-вычислительная система «Метео», результаты оценки алгоритмов, восстановление, сверхкраткосрочный прогноз, пространственная интерполяция (экстраполяция), мезометеорологические поля.

Введение

В работе [1] подробно рассмотрены функциональная схема, методические основы построения отдельных подсистем и технические характеристики информационно-вычислительной системы (ИВС) «Метео», а также дано краткое описание структуры программы «Метео». Однако, несмотря на подробное описание самой системы, остались открытыми вопросы: насколько эффективны алгоритмы пространственного и временного прогнозирования, примененные в ИВС «Метео», и может ли эта система использоваться на практике.

Учитывая это, в данной статье, являющейся продолжением работы [1], рассмотрены поставленные выше вопросы.

Для апробации алгоритмов ИВС «Метео», статистического оценивания их качества и эффективности были использованы данные четырехлетних (2004–2007 гг.) и двухсрочных (00 и 12 ч по Гринвичу) радиозондовых наблюдений пяти аэрологических станций: Москва (55°45' с.ш., 37°57' в.д.), Смоленск (54°45' с.ш., 32°04' в.д.), Рязань (54°38' с.ш., 39°42' в.д.), Сухиничи (54°06' с.ш., 32°21' в.д.) и Курск (51°46' с.ш., 36°10' в.д.), расположенных в пределах типичного мезомасштабного полигона с характерными размерами 540×470 км. Кроме того, в качестве отдельной аэрологической станции взята также ст. Вена (48°16' с.ш., 16°22' в.д.).

Здесь следует подчеркнуть, что при формировании массивов исходных аэрологических наблюдений все используемые данные высотного радиозондирования были предварительно проинтерполированы (с помощью метода линейной интерполяции) со стандартных изобарических поверхностей: 1000, 975, 850, 700, 500, 400 и 300 гПа и уровней особых точек (включая уровень земной поверхности) на заданные геометрические высоты: 0, 200, 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400, 3000, 4000, 5000, 6000 и 8000 м. При этом для оценки качества восстановления и сверхкраткосрочного прогноза метеорологических полей (в нашем случае это поля температуры и зонального и меридионального ветра) в пограничном слое атмосферы использованы высоты до 1600 м включительно, а для оценки точности пространственной экстраполяции (интерполяции) тех же полей, а также полей геопотенциала и точки росы взяты все вышеуказанные высоты или изобарические уровни соответственно.

Поскольку для численного решения задач военной геофизики и прогноза распространения загрязняющих веществ необходимо использовать данные температуры и ветра не на отдельных уровнях, а их усредненные значения в слоях $h - h_0$ [2] (здесь h_0 – высота земной поверхности, а h – высота верхней границы выбранного слоя атмосферы), то для расчета средних в слое значений указанных метеорологических величин было взято выражение вида

$$\langle \xi \rangle_{h_0, h} = \sum_{i=1}^k \left\{ \left[\frac{\xi_{h_{i-1}} + \xi_{h_i}}{2} \right] \left[\frac{h_i - h_{i-1}}{h_k} \right] \right\}, \quad (1)$$

* Валерий Сергеевич Комаров (gfm@iao.ru); Евгений Владимирович Горев (gfm@iao.ru); Александр Яковлевич Богушевич; Андрей Викторович Лавриненко.

где $\langle \xi \rangle_{h_0, h_i}$ — среднее в слое значение температуры или зонального и меридионального ветра; h_i — высота i -го уровня (здесь $i = 0, \dots, k-1$); h_k — текущая высота.

Здесь следует отметить, что при использовании алгоритма восстановления высотных профилей наилучшие результаты получаются тогда, когда в качестве исходных данных берутся не уровневые, а средние в слое значения метеорологической величины. В этом случае оценка ее уровней значений реализуется в два этапа. Вначале в контрольных точках осуществляется восстановление средних в слое значений $\langle \xi \rangle_{h_0, h_i}$, а затем по ним, а также данным приземных измерений заданной метеорологической величины ξ_0 определяются в тех же точках ее уровневые значения ξ_k , для чего используется выражение вида

$$\xi_k = \frac{2h_k \langle \xi \rangle_{h_0, h_k} - \sum_{i=0}^{k-1} \left\{ \left(\frac{\xi_{h_{i-1}} + \xi_{h_i}}{2} \right) \left(\frac{h_i - h_{i-1}}{h_k} \right) \right\}}{h_k - h_{k-1}} - \xi_{h_{k-1}}. \quad (2)$$

Что касается статистической оценки качества и эффективности алгоритмов, примененных в ИВС «Метео», то с этой целью нами использованы стандартные (среднеквадратические) погрешности δ_ξ , рассчитываемые с помощью выражения

$$\delta_\xi = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\xi_i - \xi_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

(здесь ξ_i и ξ_i — восстановленное (или спрогнозированное) и измеренное значения рассматриваемой метеорологической величины соответственно, взятые для i -й реализации, а n — число использованных

реализаций), а также относительные погрешности $\Theta_\xi = \delta_\xi / \sigma_\xi$, где σ_ξ — среднеквадратическое отклонение той же метеорологической величины.

Кроме того, для оценки эффективности динамико-стохастических алгоритмов пространственного прогнозирования в ИВС «Метео» была использована дополнительно процедура сопоставления результатов такого прогнозирования с данными, полученными при оценке алгоритмов, примененных с той же целью в автоматизированной метеорологической системе АМС [3].

На рис. 1 показаны результаты вывода на экран графического изображения поведения во времени восстановленных (с помощью ИВС «Метео») фактических значений зонального U (м/с) ветра на высоте 1000 м, построенного по данным аэрологических наблюдений ст. Москва за период с 1 июля 00:00 GMT по 29 июля 2004 г. 12:00 GMT. При этом для процедуры восстановления использованы наземные измерения и данные предшествующих измерений, взятых на заданных высотах: 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000 и 1600 м, а в качестве алгоритма применен алгоритм фильтра Калмана с двумерной динамико-стохастической моделью вида (1) [1].

Вторым примером апробации алгоритмов ИВС «Метео» служит сверхкраткосрочный (с заблаговременностью $\tau = 3$ и 6 ч) прогноз температуры T (°C) на высоте 600 м, осуществленный за период с 10 января 00:00 GMT по 14 января 2004 г. 12:00 GMT по данным метеорологических наблюдений ст. Вена. На рис. 2 приведены результаты вывода на экран графиков поведения во времени (за указанный период) спрогнозированных (и для сравнения фактических) значений этой метеорологической величины.



Рис. 1. Результаты вывода на экран графика поведения во времени фактических (Процесс) и восстановленных (Восстановленный) значений скорости зонального ветра на высоте 1000 м, построенные по данным аэрологических наблюдений ст. Москва за период с 1 июля 2004 г. 00:00 GMT по 29 июля 2004 г. 12:00 GMT

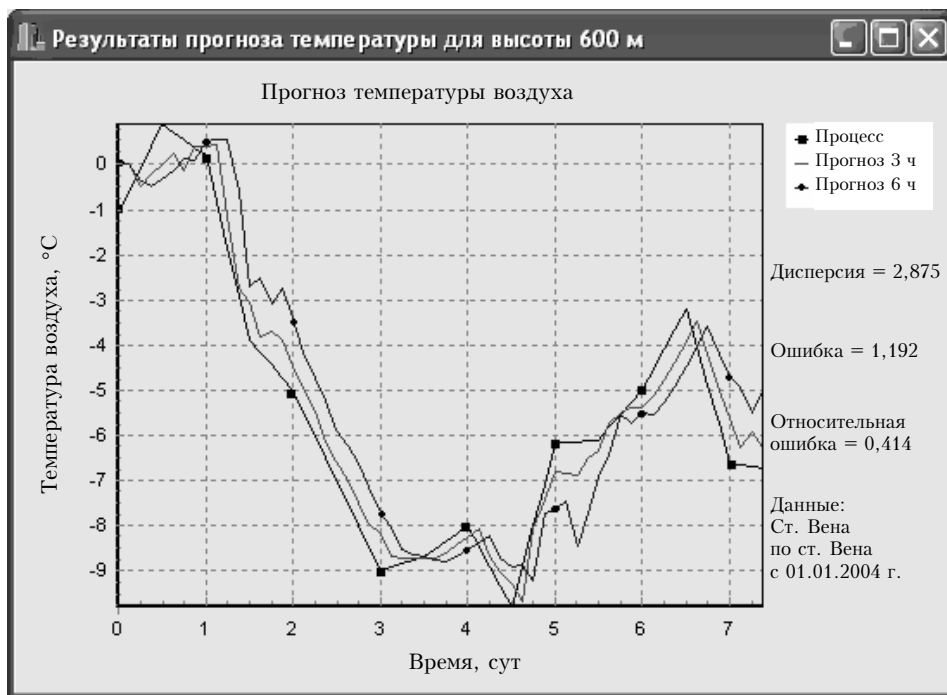


Рис. 2. Результаты вывода на экран графика поведения во времени фактических (Процесс) и спрогнозированных (Прогноз) значений температуры на высоте 600 м, построенные за период с 10 января 2004 г. 00:00 GMT по 14 января 2004 г. 12:00 GMT по данным наблюдений ст. Вена

Напомним, что процедура сверхкраткосрочного прогноза реализована в ИВС «Метео» на основе алгоритма калмановской фильтрации и двумерной динамики стохастической модели вида (5) [1].

И наконец, в качестве третьего примера апробации алгоритмов ИВС «Метео» является (рис. 3) пространственная интерполяция (т.е. объективный анализ) мезомасштабных полей геопотенциала и ветра на изобарической поверхности 500 гПа, проведенная для 10 января 2004 г. 12:00 GMT по данным аэрологических наблюдений пяти аэрологических станций: Москва, Смоленск, Рязань, Сухиничи и Курск. При этом процедура пространственной интерполяции реализована в ИВС «Метео» на основе того же алгоритма Калмана, но в качестве базовой математической модели берется четырехмерная динамика стохастическая модель вида (7) [1].

Здесь следует отметить, что результаты пространственной интерполяции на рис. 3 даются, как это принято у синоптиков, в виде карты изогипс (т.е. линий одинаковых значений геопотенциала H , дам) и условных знаков (стрелок с оперением), обозначающих направление и скорость ветра, которые привязаны ко всем узлам регулярной сетки, имеющим шаг, равный 25 км.

Изображения на рис. 1–3 являются частью графического интерфейса ИВС «Метео» и помогают оператору визуально оценить качество работы алгоритмов.

Остановимся теперь подробнее на анализе результатов собственно статистической оценки качества и эффективности алгоритмов, используемых в ИВС

«Метео» для пространственного и временного прогнозирования метеорологических полей в области мезомасштаба.

В табл. 1 приводятся стандартные δ_ξ и относительные θ (%) погрешности восстановления вертикальных профилей температуры, зонального и меридионального ветра до высоты 1600 м, проведенного с помощью соответствующего алгоритма ИВС «Метео» [1] для летнего периода и при соблюдении двух (отличных друг от друга) условий, когда процедура восстановления осуществляется либо для опорной аэрологической станции (в нашем случае это ст. Москва), где имеются высотные измерения, либо для удаленной от нее (на расстояние 171 км) ст. Рязань, где предполагается наличие лишь наземных данных.

Из табл. 1 следует, что предложенный для ИВС «Метео» алгоритм численного восстановления высотных профилей температуры, зонального и меридионального ветра, осуществленного в пограничном слое атмосферы по данным ст. Москва, где имеются высотные измерения, дает высокие по качеству результаты вплоть до уровня 1,6 км. При этом наилучшее качество восстановления характерно для температуры, когда $\theta \leq 17\%$.

В то же время для ст. Рязань, находящейся на расстоянии 171 км от опорной ст. Москва, качество восстановления, как и ожидалось, заметно ниже, и предложенный алгоритм дает приемлемые результаты только до высоты 800 м (для температуры) и в нижнем 300-метровом слое (для зонального и меридионального ветра). Однако если предположить,

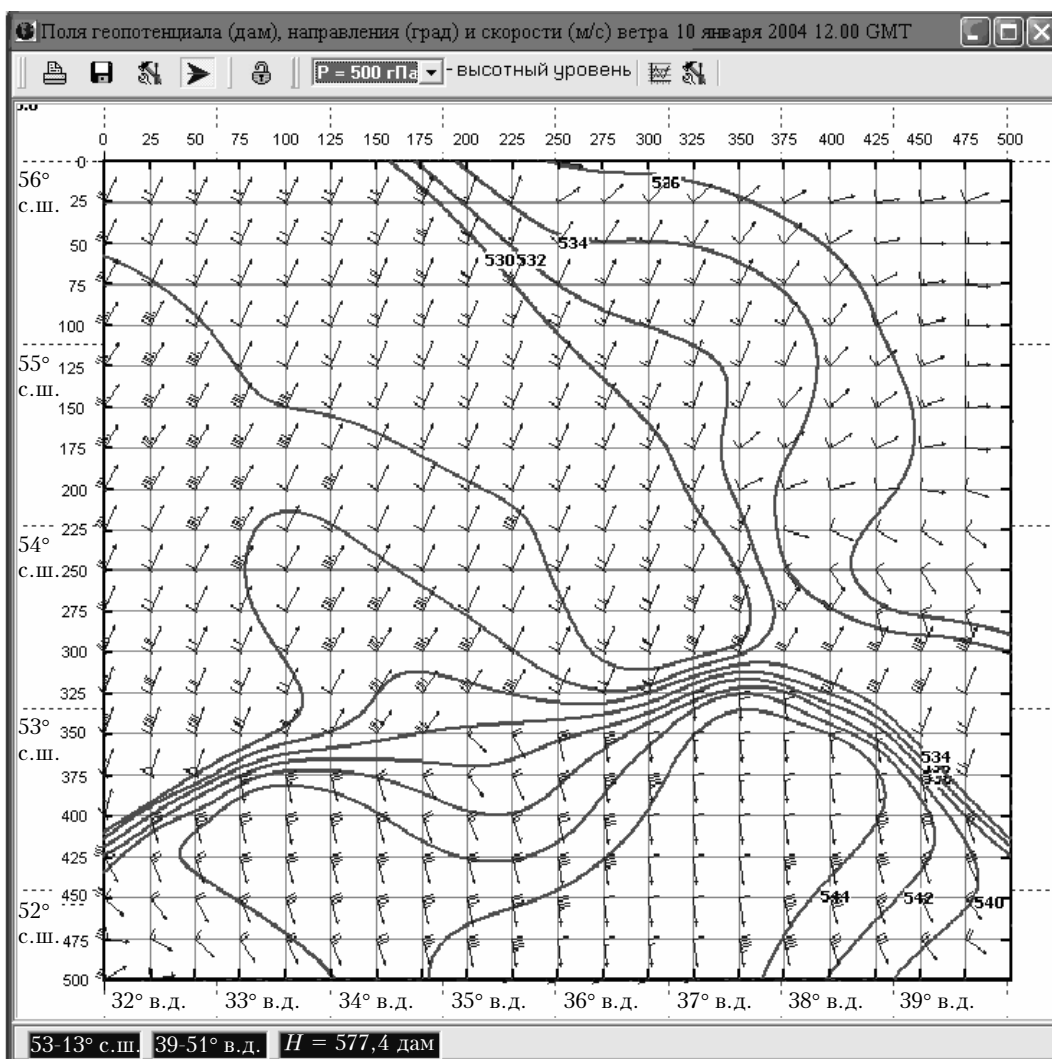


Рис. 3. Пример пространственной интерполяции мезомасштабных полей геопотенциала и ветра на изобарических поверхностях 500 гПа, проведенной для 10 января 2004 г. 12:00 GMT

Таблица 1

Среднеквадратические δ_ξ и относительные θ_ξ (%) погрешности восстановления вертикальных профилей температуры (T , °C), зонального (U , м/с) и меридионального (V , м/с) ветра, проводимого с помощью ИВС «Метео» для опорной станции Москва и контрольной ст. Рязань, находящейся от нее на расстоянии 171 км. Лето

Высота, км	ст. Москва						ст. Рязань					
	T		U		V		T		U		V	
	δ_T	θ_T	δ_U	θ_U	δ_V	θ_V	δ_T	θ_T	δ_U	θ_U	δ_V	θ_V
100	0,2	04	0,3	16	0,1	07	0,6	12	0,9	36	0,6	23
200	0,2	04	0,3	16	0,3	18	1,2	25	1,7	56	1,0	34
300	0,3	07	0,5	20	0,4	20	1,5	35	2,1	65	1,6	47
400	0,3	08	0,7	22	0,5	22	1,7	40	2,5	75	2,3	62
600	0,4	10	0,7	23	0,7	24	1,8	46	2,9	82	2,6	64
800	0,4	10	0,7	19	0,7	21	1,9	50	3,1	86	2,8	65
1000	0,4	10	0,7	18	0,7	19	2,0	56	3,3	87	3,1	67
1200	0,5	13	0,8	20	0,8	20	2,2	63	3,5	88	3,3	69
1600	0,6	17	1,0	24	1,0	24	2,4	70	3,8	89	3,5	70

что стандартные погрешности восстановления при уменьшении расстояния от опорной станции уменьшаются по экспоненциальному закону, то на удалении 100 км от нее они будут составлять, причем до

высоты 1000 м, порядка 0,3–1,2 °C (для температуры) и 0,4–1,9 м/с (для зонального и меридионального ветра), т.е. находиться на уровне ошибок радиозондовых измерений [4].

В табл. 2 приводятся результаты оценки качества сверхкраткосрочного прогноза температуры, зонального и меридионального ветра, представленные величинами стандартных δ_ξ и относительных θ_ξ (%) погрешностей такого прогноза, осуществленного с помощью соответствующего алгоритма ИВС «Метео» [1] для летнего периода по данным ст. Вена.

Из анализа табл. 2 следует, что предложенный алгоритм сверхкраткосрочного прогноза при заблаговременности $\tau = 3$ ч дает хорошие результаты прогноза. Действительно, при такой заблаговременности значения относительных погрешностей, причем для всех взятых метеорологических величин и высотных уровней, варьируют в пределах 24–36% (только для ветра на уровне станции, где сверхкраткосрочный прогноз реализуется главным образом по данным предшествующих наземных измерений, эти погрешности существенно больше и составляют 47–48%).

Заметно худшие результаты дает тот же алгоритм при $\tau = 6$ ч, хотя величины относительных погрешностей и в этом случае не превышают допустимого значения, равного 66%.

В качестве последнего примера рассмотрим результаты статистической оценки эффективности алгоритма, используемого в ИВС «Метео» (см. [1]) для пространственной экстраполяции (интерполяции) мезометеорологических полей. При этом для оценки точности взятого алгоритма в качестве контрольной точки (в нее проводилась пространственная экстраполяция, дающая худшие, чем интерполяция, результаты) была взята станция Смоленск, которая исключалась из заданной сети влияющих станций, куда входят Москва, Рязань, Сухиничи, Смоленск и Курск, и находилась на расстоянии 225 км от ближайшей опорной ст. Сухиничи. Важным является то, что в данном случае пространственная экстраполяция осуществлялась против западно-восточного переноса, так как ст. Смоленск находится к западу от влияющих станций. Для таких условий диагностика состояния атмосферы на основе гидродинамического подхода некорректна по своей физической сути [2].

На рис. 4 приведены результаты оценки качества алгоритма пространственной экстраполяции средних в слое значений температуры, зонального

и меридионального ветра (они широко применяются в задачах экологии и военной геофизики), представленные зависимостью величин стандартной погрешности такой экстраполяции от толщины атмосферного слоя ($h - h_0$). Здесь же показаны аналогичные зависимости для средних квадратических отклонений δ_ξ , рассчитанных для параметров $\langle T_{h_0, h} \rangle$, $\langle U_{h_0, h} \rangle$ и $\langle V_{h_0, h} \rangle$.

Кроме того, для оценки эффективности предложенного алгоритма (в сравнении с алгоритмом, использованным ранее в автоматизированной метеорологической системе [3]), на рис. 4 приводятся также значения стандартных погрешностей пространственной экстраполяции для случая, когда расчеты осуществлялись на основе аппарата калмановской фильтрации и упрощенной линейной динамико-стохастической модели.

Из анализа рис. 4 следует:

1) алгоритм пространственной экстраполяции, примененный в ИВС «Метео», дает вполне приемлемые для практики результаты, поскольку даже в худших условиях (т.е. когда экстраполяция осуществляется против западно-восточного переноса воздушных масс) стандартные погрешности оценивания параметров $\langle T_{h_0, h} \rangle$, $\langle U_{h_0, h} \rangle$ и $\langle V_{h_0, h} \rangle$ варьируют независимо от слоя атмосферы в пределах 0,7–1,2 °С зимой и 1,0–1,5 °С летом (для температуры) и соответственно 0,9–1,7 и 1,0–2,1 м/с (для ортогональных составляющих скорости ветра), т.е. они находятся на уровне среднеквадратических ошибок температурно-ветрового зондирования [4];

2) этот же алгоритм обеспечивает заметно лучшие результаты пространственной экстраполяции тех же параметров по сравнению с алгоритмом фильтрации Калмана, основанным на использовании упрощенной линейной динамико-стохастической модели и примененным ранее [5] в автоматизированной метеорологической системе. В подобном случае выигрыш по точности взятого в ИВС «Метео» алгоритма (в сравнении в алгоритмом, использующим упрощенную динамико-стохастическую модель) составляет независимо от сезона и слоя атмосферы от 1,1 до 2 раз (для температуры) и от 1,1 до 1,5 раза (для зонального и меридионального ветра).

Подытоживая полученные результаты статистической оценки качества алгоритмов восстановления,

Таблица 2

Стандартные δ_ξ и относительные (θ_ξ , %) погрешности сверхкраткосрочного (с заблаговременностью $\tau = 3$ и 6 ч) прогноза вертикальных профилей температуры (T , °С), зонального (U , м/с) и меридионального (V , м/с) ветра, проводимого с помощью ИВС «Метео» для ст. Вена. Лето

Высота, км	$\tau = 3$ ч						$\tau = 6$ ч					
	T		U		V		T		U		V	
	δ_T	θ_T	δ_U	θ_U	δ_V	θ_V	δ_T	θ_T	δ_U	θ_U	δ_V	θ_V
0	1,2	32	1,4	47	1,1	48	2,0	54	2,0	64	1,5	65
100	1,0	30	1,1	34	0,9	36	1,7	52	1,9	59	1,4	56
200	0,9	29	1,0	31	1,0	33	1,5	50	2,1	58	1,7	57
300	0,9	29	1,2	29	1,2	33	1,5	50	2,4	58	2,2	61
400	0,9	29	1,4	29	1,3	31	1,5	50	2,8	58	2,5	60
600	0,8	28	1,6	29	1,7	31	1,3	45	3,1	56	3,3	60
800	0,7	24	1,7	28	1,9	29	1,0	32	3,4	55	3,6	55

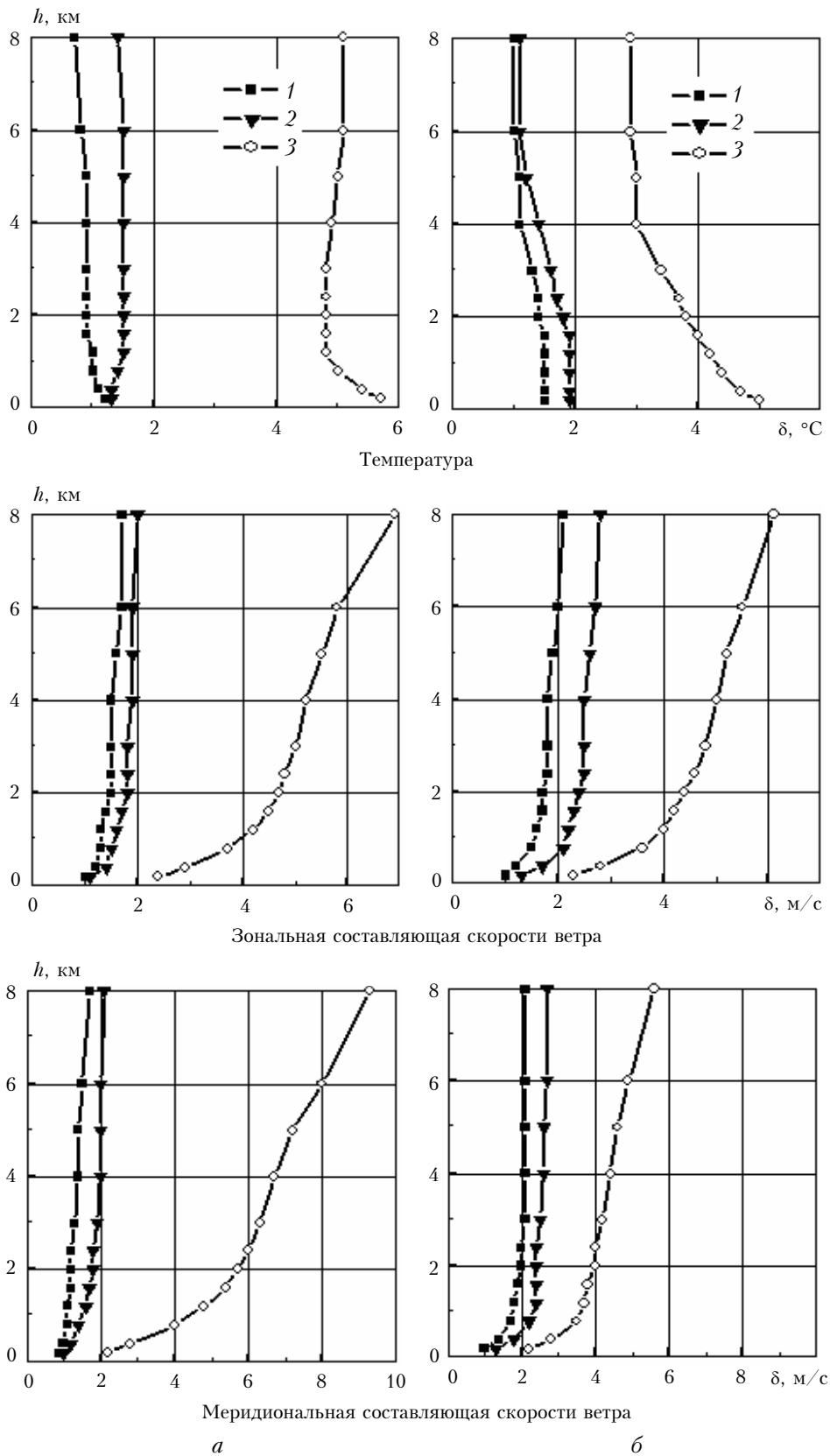


Рис. 4. Вертикальное распределение стандартных погрешностей δ_ξ пространственной экстраполяции средних в слое значений температуры и ортогональных составляющих скорости ветра, проведенной до расстояния 225 км с помощью ИВС «Метео» (1) и автоматизированной метеорологической системы [3] (2), а также соответствующие профили среднеквадратических отклонений σ_ξ (3): а – зима, б – лето

сверхкраткосрочного прогноза и пространственной экстраполяции (интерполяции) мезометеорологических полей, использованных в ИВС «Метео», можно констатировать, что, во-первых, все эти алгоритмы являются достаточно надежными, причем алгоритм пространственной экстраполяции к тому же дает заметно меньшие погрешности, чем алгоритм, примененный ранее при создании автоматизированной метеорологической системы, а во-вторых, сама информационно-вычислительная система «Метео» является достаточно эффективной и, следовательно, может быть применена для метеорологической поддержки решения различных задач атмосферной оптики, дистанционного зондирования и экологии.

1. Комаров В.С., Горев Е.В., Богушевич А.Я., Лавриненко А.В. Информационно-вычислительная система «Метео» для метеорологической поддержки прикладных задач. Часть 1. Описание структуры системы // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 7. С. 654–660.

2. 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.

3. Комаров В.С., Богушевич А.Я., Ильин С.Н., Креминский А.В., Попов Ю.Б., Попова А.И. Автоматизированная метеорологическая система для оперативной обработки аэрологической информации, диагностики и прогноза параметров состояния атмосферы в области мезомасштаба. Часть 2. Результаты испытания системы // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 708–715.

4. Guide to meteorological instrument and observing practices. Paris: WMO, 1984. 130 p.

5. Комаров В.С., Богушевич А.Я., Ильин С.Н., Креминский А.В., Попов Ю.Б., Попова А.И. Автоматизированная метеорологическая система для оперативной обработки аэрологической информации, диагностики и прогноза параметров состояния атмосферы в области мезомасштаба. Часть 1. Описание структуры системы // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 699–707.

V.S. Komarov, E.V. Gorev, A.Ya. Bogushevich, A.V. Lavrinenko. The «Meteo» data processing system for solution of meteorological application problems. Part 2. Results of system tests.

The results of testing and statistical estimation of the quality of algorithms used in the data processing system «Meteo» for retrieval, interpolation, nowcasting and prediction of the field of meteorological parameters (geopotential, temperature, and orthogonal wind velocity components) on mesoscale are discussed.