

В.С. Комаров, А.В. Креминский

**ОБЪЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ
МЕЗОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ
ОПТИМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ**

Предлагается оригинальный подход к решению задачи объективного анализа мезометеорологических полей, который базируется на процедуре оптимального комплексирования двух альтернативных методов пространственной интерполяции (оптимальной интерполяции и модифицированной версии метода группового учета аргументов – ММГУА). Рассматриваются его методология, алгоритмы и результаты апробации на примере данных температуры и ветра.

1. Введение

В последние годы в связи с возросшими требованиями к данным атмосферного мониторинга ограниченных территорий появилась большая необходимость в разработке современных и эффективных методов объективного анализа мезометеорологических полей, т.е. полей с характерным масштабом от десятков до сотен километров [1]. Здесь и далее под понятием «объективный анализ мезометеорологических полей» будем понимать процедуру построения этого поля, или, иначе, процедуру определения значений метеорологических величин в точках некоторой мезомасштабной сетки по данным измерений на станциях.

Скорейшее решение этой проблемы обусловлено и тем, что объективный анализ является непременным этапом обработки метеорологической информации и обычно предшествует решению многих задач гидрометеорологии и экологии и, в частности, таких как:

- локальный численный прогноз погоды на основе уравнений мезометеорологии, который требует наличия прогностической модели с шагом от 5 до 50 км [1];
- оценивание специализированных метеорологических характеристик (например, усредненной по площади температуры, ее горизонтальных градиентов, аналогичных градиентов составляющих скорости ветра и т.п.), рассчитываемых обычно по данным объективного анализа и используемых для решения различных прикладных задач;
- диагноз и прогноз пространственного распространения техногенных загрязняющих веществ в воздушных бассейнах ограниченных территорий (например, большого города или промышленной зоны).

Здесь следует обратить внимание на одно важное обстоятельство. В отличие от объективного анализа макрометеорологических полей, получившего широкое применение на практике (см., например, [2–4]) подобный анализ мезометеорологических полей (особенно их трехмерной структуры) еще не нашел своего должного развития, поскольку он сталкивается с двумя трудностями. Одна из них связана с достаточно малой плотностью существующей сети аэрологических станций, для которой даже наименьшее расстояние между ближайшими станциями составляет около 300 – 400 км, а это явно не удовлетворяет требованиям объективного анализа мезометеорологических полей. А вторая из этих трудностей обусловлена определенными недостатками применяемых в объективном анализе методов пространственной интерполяции, поскольку, например, метод полиномиальной аппроксимации характеризуется произвольным выбором алгебраических полиномов, осуществляемым без всякого учета свойств анализируемых метеорологических полей, а метод оптимальной интерполяции хотя и дает лучшие результаты, чем метод полиномиальной аппроксимации (сравнение этих методов приведено в [5]), но требует для своей реализации предварительного обобщения больших объемов исходной информации и расчета необходимых статистических характеристик (и в первую очередь, коэффициентов пространственной корреляции).

Учитывая все вышесказанное и необходимость существенного улучшения (с точки зрения запросов практики) качества объективного анализа трехмерной структуры мезометеорологиче-

ских полей, в настоящей статье предлагается оригинальный подход к решению поставленной задачи, который базируется на процедуре оптимального комплексирования двух альтернативных методов пространственной интерполяции (метода оптимальной интерполяции и модифицированной версии метода группового учета аргументов – ММГУА). О методических основах этого подхода и результатах его апробации на примере данных температуры и ветра и пойдет речь ниже.

2. Методические основы объективного анализа мезометеорологических полей по комплексу альтернативных методов

Объективный анализ полей температуры и ветра, базирующийся на альтернативных методах пространственной интерполяции (или экстраполяции), проводится, как и в [5], в два этапа. На первом этапе с помощью метода оптимальной интерполяции осуществляется построение приземного и высотных полей рассматриваемой метеорологической величины и выбор атмосферного уровня, где отмечается минимальная ошибка восстановления. А на втором этапе по данным объективного анализа мезометеорологического поля на уровне с минимальной ошибкой восстановления, осуществленного методом оптимальной интерполяции, а также по данным имеющихся станций строится прогностическая модель ММГУА, с помощью которой проводится восстановление вертикальных профилей той же метеорологической величины во всех точках взятой регулярной сетки с шагом ΔS (в нашем случае он равен 25 км, что согласно [1] соответствует шагу сетки, требуемому при прогнозе мезометеорологических процессов).

Здесь сразу же следует отметить, что подобный комплексный подход к построению трехмерного мезометеорологического поля был описан и обоснован нами ранее в [6], где решалась близкая (к объективному анализу) задача пространственного прогноза того же поля на неосвоенную данными наблюдений территорию. Однако эта задача по своей методологии и алгоритму решения несколько отличается от методологии и алгоритмов объективного анализа и, следовательно, последние требуют краткого рассмотрения.

Остановимся в первую очередь на методологических основах объективного анализа приземного мезометеорологического поля, который, как было сказано выше, проводился с помощью метода оптимальной интерполяции, использующего соотношение вида [3]

$$\xi_0 = \bar{\xi}_0 + \sum_{i=1}^n p_i \xi'_i, \quad (1)$$

где ξ_0 – искомое значение метеорологической величины в узле регулярной сетки с индексом 0; $\bar{\xi}_0$ – среднее (климатическое) значение метеорологической величины в искомом узле регулярной сетки, причем для мезометеорологического полигона $\bar{\xi}_0 = \bar{\xi}_i = \bar{\xi}$ [4]; $\xi'_i = \xi_k - \bar{\xi}_k$ – отклонение метеорологической величины от нормы в точке k ; i – индекс, относящийся к наблюдениям на станциях; n – число станций, привлекаемых для расчета значений метеорологической величины в узле сетки; p_i – весовые коэффициенты.

В соответствии с [3] вся процедура объективного анализа сводится к следующему.

По расположению $n + 1$ точек (n станций и одного узла регулярной сетки), находящихся на территории некоторого мезометеорологического полигона, вычисляются расстояния

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

между каждой парой этих точек (в выражении (1) через x_i и y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) обозначены координаты точки). Эти расстояния образуют матрицу $n(n + 1)$ расстояний вида

$$\begin{pmatrix} 0 & l_{12} & l_{13} & \dots & l_{1n} & l_{10} \\ l_{21} & 0 & l_{23} & \dots & l_{2n} & l_{20} \\ l_{31} & l_{32} & 0 & \dots & l_{3n} & l_{30} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & l_{n3} & \dots & 0 & l_{n0} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

Формулы (1)–(7) и были положены в основу расчетной схемы (рис. 1) в методике объективного анализа приземного и высотного мезометеорологических полей и выбора уровня, где отмечается минимальная погрешность интерполяции (экстраполяции).

После объективного анализа методом объективной интерполяции (экстраполяции) начинается следующая процедура объективного анализа, но уже трехмерной структуры рассматриваемого мезометеорологического поля (его вычислительная схема показана на рис. 2). Поскольку в настоящей статье с этой целью использован алгоритм ММГУА, схожий с алгоритмом в [6], то рассмотрим лишь его главную суть, которая заключается в следующем.

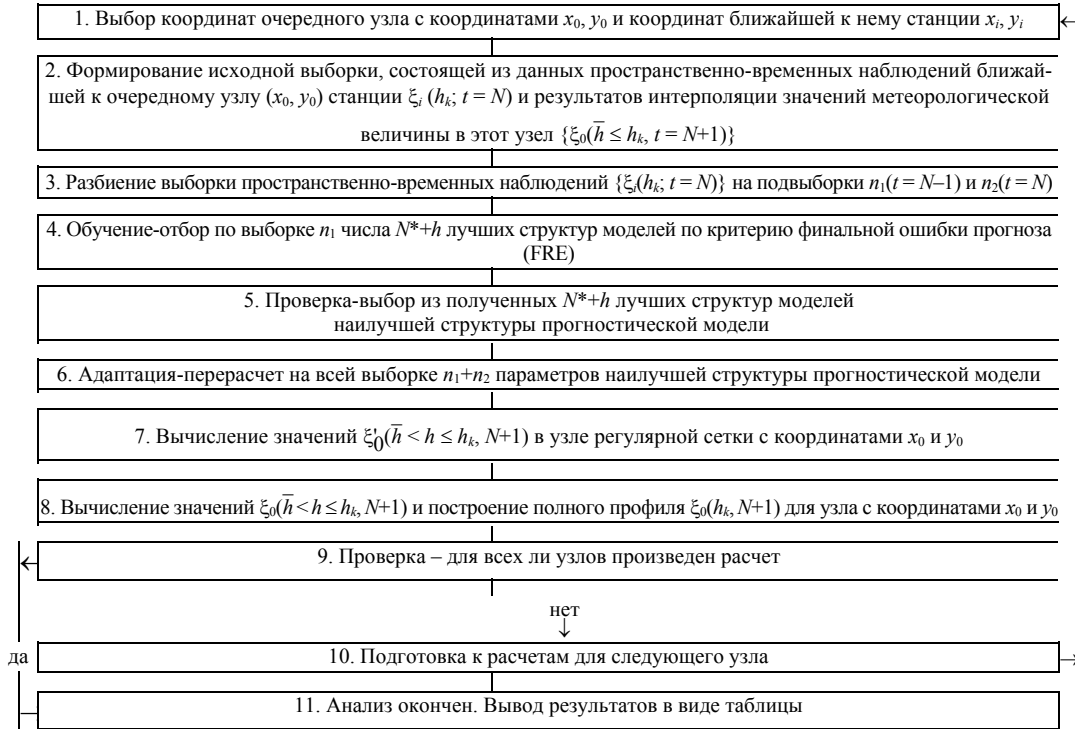


Рис. 2. Блок-схема расчета вертикальных профилей метеорологической величины в узле регулярной сетки по алгоритму ММГУА

Вначале по результатам восстановления значения метеорологической величины в узле регулярной сетки с индексом «0», а также по данным пространственно-временных наблюдений за этой величиной

$$\begin{aligned} & \{\xi_i(h, t), h = 0, 1, \dots, h_k; t = 1, \dots, N\}, \\ & \{\xi_0(h, t), h = 0, 1, \dots, \bar{h} \leq h_k; t = N + 1\} \end{aligned} \quad (8)$$

(где h – высота; t – время; N – количество профилей), которые формируются по результатам зондирования ближайшей (к рассматриваемому узлу) станции, строится система линейных регрессионных моделей вида [6]

$$\xi_0(h, N + 1) = \sum_{\tau=1}^{N^*} A(h, \tau) \xi_i(h, N + 1 - \tau) + \sum_{j=1}^{h-1} B(h, j) \xi_0(j, N + 1) + \varepsilon(h, N + 1) \quad (9)$$

при $h = \bar{h} + 1; \bar{h} + 2; \dots; h_k$.

Здесь N^* – порядок запаздывания по времени ($N^* < [N - h - 1]/2$); $A(h, 1), \dots, A(h, N)$ и $B(h, 0), \dots, B(h, h-1)$ – неизвестные параметры модели, а $\varepsilon(h, N+1)$ – невязка модели.

Затем осуществляется процедура выбора наилучшей модели (9), для чего вначале (в соответствии с [9]) производится предварительное разделение общей выборки на выборку A (она

содержит наблюдения до времени $t = N-1$ включительно) и выборку B , содержащую наблюдения только в момент времени $t = N$, а уж потом осуществляется сам выбор этой модели с помощью двух специальных методов.

1) Метод направленного группового перебора для оптимизации структуры модели с двухэтапной селекцией моделей, проводимой с помощью:

– финальной ошибки прогнозирования (Х. Акаике) вида

$$FRE = \frac{(N - N^* - 1) + s}{(N - N^* - 1) - s} RSS(s), \quad (10)$$

где $RSS(s) = \sum_{j=1}^{N-N^*-1} [(\xi_{h,N-j}^{(i)} - \hat{\xi}_{h,N-j}^{(i)}(s))]^2$ – остаточная сумма квадратов для текущей модели $\hat{\xi}_{h,N-j}^{(i)}$,

содержащей s ненулевых оценок параметров. При этом оценка значений $\hat{\xi}_{h,N-j}^{(i)}$ осуществляется с помощью выражения

$$\hat{\xi}_{h,N-j}^{(i)} = X\hat{\Theta}, \quad X \in M_{(N-N^*-1) \times (N^*+h)}, \quad \Theta \in R^{N^*+h}, \quad (11)$$

где $\hat{\Theta} = [\hat{A}_{h,1}, \dots, \hat{A}_{h,N^*}, \hat{B}_{h,0}, \dots, \hat{B}_{h,N-1}]^T$ – минимаксная оценка параметров по выборке A , вычисляемая по специальным формулам (см. [6]), а T – операция транспонирования; R – евклидово пространство k -мерных векторов; $M_{m \times p}$ – пространство матриц размерностью $m \times p$;

– среднеквадратической ошибки прогноза на контрольной выборке (выборка B):

$$\left| (\xi_{h,N}^{(i)} - \hat{\xi}_{h,N}^{(i)}(s)) \right|^2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

причем минимум берется по всем $N^* + h$ структурам, каждой из которых соответствует модель.

2) Метод минимаксного оценивания для получения оценок параметров модели, позволяющей гарантировать качество соответствующего прогноза, которое может быть оценено с помощью неравенства

$$E \left| E(\xi_{h,N+1}^{(0)} - \hat{\xi}_{h,N+1}^{(0)}) \right|^2 \leq \delta_{h,N+1} (h = \bar{h} + 1, \dots, h_k), \quad (13)$$

где $E(\cdot)$ – оператор математического ожидания, позволяющий производить усреднение по всевозможным реализациям ошибок наблюдения, а $\hat{\xi}_{h,N+1}^{(0)}$ и $\delta_{h,N+1}$ – минимаксные оценки, зависящие от дисперсии ошибок наблюдения σ^2 и от априорной информации о максимально допустимых отклонениях величин прогноза, определяемых из выражения

$$\Delta_{h,N+1} = \max \left| (\xi_{h,t}^{(i)}) \right| \quad (h = 0, 1, \dots, h^*), \quad (14)$$

$t = 1, \dots, N$

или задаваемых пользователем.

Заключительным этапом интерполяции данных в узел сетки с индексом «0» является нахождение недостающих компонент вертикального профиля $\xi_0(\bar{h} < h \leq h_k, N+1)$, определяемых с помощью формул вида

$$\xi_0(\bar{h} < h \leq h_k, N+1) = \bar{\xi}_0(\bar{h} < h \leq h_k) + \xi'_0(\bar{h} < h \leq h_k, N+1), \quad (15)$$

где $\bar{\xi}_0(\bar{h} < h \leq h_k)$ – вертикальный профиль средних (климатических) значений метеорологической величины, полученный для узла сетки при условии, что на территории мезометеорологического полигона $\bar{\xi}_0 = \bar{\xi}_i = \bar{\xi}$ [4]; $\xi'_0(\bar{h} < h \leq h_k, N+1)$ – профиль случайных отклонений той же величины для рассматриваемого узла, восстановленного по алгоритму ММГУА, и построение всего профиля с учетом данных уровня с минимальной ошибкой прогноза $\xi_0(h \leq h_k, t = N+1)$.

Описанная выше комплексная методика и была использована в задаче объективного анализа мезометеорологических полей температуры и составляющих вектора ветра, т.е. в задаче определения профилей этих метеорологических величин в точках регулярной мезомасштабной сетки по данным измерений окружающих аэрологических станций.

3. Результаты статистической оценки качества объективного анализа

Для проведения объективного анализа и оценки его качества нами были использованы данные специальных радиозондовых наблюдений пяти аэрологических станций, представляющих некоторый мезометеорологический полигон (его схема с соответствующей регулярной сеткой представлена на рис. 3), который расположен на территории западных областей Украины и Белоруссии. При этом полученная выборка радиозондовых наблюдений охватывает период с 24 ноября по 7 декабря 1991 г., а сами данные, как и в [5], приведены к системе геометрических высот, включающих в себя 10 уровней с $h = 0, 200, 400, 800, 1200, 1600, 2000, 4000, 6000$ и 8000 м.

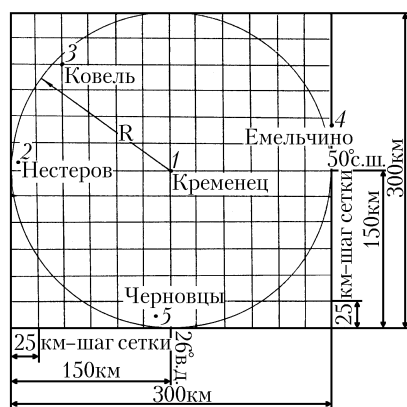


Рис. 3. План мезометеорологического полигона площадью 300x300 км, который был использован для апробации комплексного алгоритма объективного анализа

Поскольку объективный анализ мезометеорологических полей рассматривается нами применительно к решению задачи диагноза и прогноза пространственного распространения техногенных загрязняющих веществ, то этот анализ, как и в [5], проводится не по данным уровней наблюдений за температурой и ветром, а по данным их усреднения по отдельным атмосферным слоям, заключенным между уровнем станции $h = 0$ и высотами h . На практике такие характеристики обычно называют средней температурой и средним ветром, а обозначают их в виде $\langle T \rangle_h$, $\langle U \rangle_h$ и $\langle V \rangle_h$ соответственно.

Здесь следует подчеркнуть, что для составляющих вектора ветра, вследствие особенностей взятой измерительной аппаратуры, в качестве нижней границы атмосферных слоев принимается не уровень станции, а высота 200 м. Кроме того, из-за ограниченного числа станций, взятых для объективного анализа, нами наряду с интерполяцией была использована также и процедура экстраполяции, однако она применялась лишь в тех случаях, когда узлы регулярной сетки располагались вне области интерполяции, находящейся в пределах окружности с радиусом R (см. рис. 3) или вблизи ее границы.

Оценка качества объективного анализа осуществлялась в работе с помощью двух статистических характеристик: стандартной (средней квадратической) погрешности интерполяции (δ) и значений вероятности (P) ошибок менее некоторой заданной величины, причем для приземной и средней температуры она менее $\pm 1, \dots, \pm 4^\circ\text{C}$ и более $\pm 4^\circ\text{C}$, а для составляющих вектора ветра менее $\pm 1, \dots, \pm 4$ м/с и более ± 4 м/с.

Остановимся несколько подробнее на используемом нами способе оценки качества объективного анализа, поскольку на практике существуют несколько способов такой оценки. В частности, среди них наибольшее распространение в настоящее время получили два способа, один из которых основан на сравнении результатов объективного и синоптического анализов (этот способ использован, например, в [10, 11]), а другой базируется на определении значений метеорологической величины на контрольной станции по данным окружающих станций, ми-

ную вычисления этих значений в точках регулярной сетки (см., например, [4]). Поскольку привлекательной стороной второго способа является его объективность, то он и был использован для оценки качества объективного анализа трехмерной структуры полей температуры и ветра в пределах взятого мезометеорологического полигона.

Рассмотрим теперь результаты численных экспериментов по оценке качества объективного анализа мезометеорологических полей, причем остановимся вначале на оценке успешности объективного анализа, основанного на использовании метода оптимальной интерполяции (экстраполяции). С этой целью воспользуемся табл. 1, содержащей для двух станций взятого мезометеорологического полигона стандартные (средне-квадратические) погрешности (δ_c) и значения вероятности (P) ошибок подобного объективного анализа менее и более некоторой заданной величины (подобный анализ проведен для полей приземной (T) и средней ($\langle T \rangle_h$) температуры, а также среднего зонального ($\langle U \rangle_h$) и меридионального ($\langle V \rangle_h$) ветра). Анализ данных табл. 1 показывает, что:

– во-первых, наилучшие результаты объективного анализа полей температуры и составляющих вектора ветра, проведенного с помощью методов оптимальной интерполяции и оптимальной экстраполяции, отмечаются соответственно в приземном слое и в слое 200–400 м. Так, например, вероятность оптимальной интерполяции (экстраполяции) приземной температуры даже с ошибкой менее $\pm 1^\circ\text{C}$ (эта величина допустимой ошибки близка к стандартной погрешности измерения температуры радиозондом) составляет около 0,75 (0,63);

– во-вторых, объективный анализ, проводимый с помощью оптимальной интерполяции, дает хорошие результаты и для других атмосферных слоев, но только для поля средней температуры $\langle T \rangle_h$ (для полей зональной и меридиональной составляющих скорости ветра подобный анализ совершенно не пригоден и требует применения иных методов интерполяции).

Таблица 1

Стандартные погрешности (δ) и значения вероятностей (P) ошибок объективного анализа полей температуры, зонального и меридионального ветра менее заданной величины, проведенного для станции Кременец (1) и методом оптимальной интерполяции, а для станции Нестеров (2) методом оптимальной экстраполяции

Слой, км	δ		Вероятность, P									
			$< \pm 1$		$< \pm 2$		$< \pm 3$		$< \pm 4$		$> \pm 4$	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
а) Температура, $T, ^\circ\text{C}$												
0	0,8	1,0	0,75	0,63	0,94	0,94	1,00	0,94	1,00	0,94	0,00	0,06
0–0,4	1,1	1,5	0,73	0,50	0,94	0,81	1,00	0,81	1,00	1,00	0,00	0,00
0–0,8	1,0	2,0	0,69	0,19	0,94	0,69	1,00	0,88	1,00	0,94	0,00	0,06
0–1,2	1,0	2,2	0,69	0,25	0,94	0,63	1,00	0,88	1,00	0,88	0,00	0,13
0–1,6	1,1	2,3	0,64	0,19	0,94	0,50	0,94	0,88	1,00	0,88	0,00	0,13
0–2,0	1,4	2,3	0,61	0,19	0,94	0,56	0,94	0,88	0,94	0,88	0,06	0,13
0–4,0	1,5	2,4	0,61	0,25	0,88	0,38	0,94	0,75	0,94	0,88	0,06	0,13
0–6,0	1,7	2,6	0,50	0,13	0,81	0,44	0,94	0,69	0,94	0,81	0,06	0,19
0–8,0	1,9	2,7	0,44	0,13	0,81	0,44	0,94	0,69	0,94	0,81	0,06	0,19
б) Зональный ветер, $U, \text{ м/с}$												
0,2–0,4	0,8	1,9	0,75	0,56	1,00	0,75	1,00	0,88	1,00	0,88	0,00	0,13
0,2–0,8	1,6	4,3	0,44	0,38	0,75	0,56	0,94	0,63	1,00	0,69	0,00	0,31
0,2–1,2	2,4	6,4	0,25	0,38	0,63	0,38	0,75	0,56	0,94	0,56	0,06	0,44
0,2–1,6	2,6	7,4	0,13	0,31	0,44	0,38	0,75	0,50	0,88	0,50	0,13	0,50
0,2–2,0	2,9	8,4	0,19	0,25	0,38	0,31	0,69	0,38	0,81	0,50	0,19	0,50
0,2–4,0	3,2	9,2	0,19	0,19	0,38	0,25	0,69	0,31	0,81	0,44	0,19	0,56
0,2–6,0	3,7	10,8	0,19	0,13	0,38	0,19	0,56	0,25	0,81	0,25	0,19	0,75
0,2–8,0	3,9	11,4	0,25	0,06	0,38	0,13	0,56	0,19	0,75	0,25	0,25	0,75
в) Меридиональный ветер, $V, \text{ м/с}$												
0,2–0,4	0,5	0,5	0,63	0,56	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
0,2–0,8	1,3	2,0	0,44	0,25	0,75	0,50	0,94	0,69	1,00	1,00	0,00	0,00
0,2–1,2	2,4	3,2	0,38	0,13	0,56	0,31	0,75	0,56	0,94	0,69	0,06	0,31
0,2–1,6	2,8	3,7	0,25	0,13	0,44	0,31	0,75	0,44	0,88	0,69	0,12	0,31
0,2–2,0	3,4	3,9	0,19	0,06	0,38	0,31	0,69	0,44	0,81	0,63	0,19	0,38
0,2–4,0	3,6	4,0	0,19	0,06	0,38	0,19	0,69	0,38	0,81	0,63	0,19	0,38
0,2–6,0	4,5	14,4	0,19	0,00	0,38	0,13	0,56	0,44	0,75	0,69	0,25	0,31
0,2–8,0	5,2	14,5	0,13	0,00	0,31	0,19	0,44	0,31	0,69	0,63	0,31	0,38

О качестве объективного анализа мезометеорологических полей, но осуществленного по комплексу альтернативных методов (метода оптимальной интерполяции (экстраполяции) и мо-

дифицированной версии МГУА) можно судить по данным табл. 2, которая содержит те же, что и в табл. 1, статистические оценки этого качества. Анализ данных табл. 2 показывает, то:

а) в отличие от поля температуры, комплексный алгоритм, взятый для объективного анализа поля ветра, существенно улучшает (по сравнению с одной оптимальной интерполяцией) качество этого анализа. Действительно, если вероятность (P) ошибок, например менее ± 2 м/с, составляет при комплексном анализе около 0,75–0,90 для зональной и 0,60–0,80 для меридиональной составляющих среднего ветра (причем для всех или большей части рассматриваемых атмосферных слоев), то схожая вероятность тех же ошибок, но для объективного анализа, проведенного только на основе оптимальной интерполяции, имеет место (независимо от составляющей среднего звена) лишь для самых нижних слоев, расположенных на высотах менее 0,8–1,2 км;

б) объективный анализ, основанный на процедуре оптимального комплексирования двух альтернативных методов экстраполяции (метода оптимальной экстраполяции и ММГУА), дает, в отличие от анализа методом оптимальной экстраполяции, существенно лучшие результаты, причем для всех рассматриваемых мезометеорологических полей, т.е. полей температуры, зонального и меридионального ветра. При этом приемлемое для практики качество объективного анализа (при вероятности ошибок менее ± 2 (± 2 м/с) более 0,60) отмечается для значительной толщи тропосферы (для средней температуры до высоты 4 км, а для составляющих среднего ветра до уровня 6–8 км).

Таблица 2

Стандартные погрешности (δ) и значения вероятностей (P) ошибок объективного анализа полей температуры, зонального и меридионального ветра менее заданной величины, проведенного по комплексу методов оптимальной интерполяции или экстраполяции и ММГУА для станции Кременец (1) и станции Нестеров (2)

Слой, км	δ		Вероятность, P									
			< ± 1		< ± 2		< ± 3		< ± 4		> ± 4	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
а) Температура, T , °C												
0–0,4	1,0	1,9	0,75	0,55	0,95	0,85	1,00	0,90	1,00	0,95	0,00	0,05
0–0,8	1,6	2,1	0,50	0,45	0,75	0,75	0,90	0,80	0,95	1,00	0,05	0,00
0–1,2	1,8	2,2	0,40	0,40	0,70	0,70	0,75	0,80	0,95	0,95	0,05	0,05
0–1,6	2,1	2,3	0,35	0,35	0,60	0,60	0,85	0,85	0,95	0,95	0,05	0,05
0–2,0	2,4	2,3	0,25	0,35	0,55	0,60	0,70	0,85	0,85	0,90	0,15	0,10
0–4,0	3,1	2,8	0,20	0,30	0,55	0,60	0,65	0,75	0,70	0,80	0,30	0,20
0–6,0	3,3	2,8	0,20	0,20	0,45	0,55	0,60	0,75	0,65	0,80	0,35	0,20
0–8,0	3,4	2,7	0,20	0,20	0,45	0,55	0,60	0,75	0,65	0,85	0,35	0,15
б) Зональный ветер, U , м/с												
0,2–0,8	1,8	1,9	0,65	0,60	0,85	0,85	0,90	0,90	0,95	0,95	0,05	0,05
0,2–1,2	1,8	1,7	0,55	0,60	0,85	0,80	0,85	0,95	0,95	0,95	0,05	0,05
0,2–1,6	1,7	1,3	0,55	0,70	0,75	0,85	0,90	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
0,2–2,0	1,9	1,1	0,50	0,65	0,85	0,90	0,90	1,00	0,90	1,00	0,10	0,00
0,2–4,0	1,6	1,5	0,55	0,70	0,90	0,80	0,90	0,90	0,95	1,00	0,05	0,00
0,2–6,0	2,0	1,1	0,55	0,65	0,80	0,95	0,85	1,00	0,90	1,00	0,10	0,00
0,2–8,0	2,3	1,2	0,60	0,80	0,75	0,85	0,80	0,95	0,90	1,00	0,10	0,00
в) Меридиональный ветер, V , м/с												
0,2–0,8	1,7	2,2	0,55	0,45	0,80	0,75	0,95	0,80	1,00	1,00	0,00	0,00
0,2–1,2	2,0	2,1	0,30	0,40	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	0,95	0,15	0,05
0,2–1,6	1,7	2,0	0,40	0,35	0,75	0,60	0,80	0,85	1,00	0,95	0,00	0,05
0,2–2,0	1,5	2,0	0,25	0,35	0,75	0,60	1,00	0,85	1,00	0,90	0,00	0,10
0,2–4,0	2,2	2,2	0,25	0,30	0,65	0,60	0,90	0,75	1,00	0,80	0,00	0,20
0,2–6,0	2,7	1,9	0,15	0,20	0,40	0,55	0,75	0,75	0,85	0,80	0,15	0,20
0,2–8,0	2,7	2,3	0,15	0,20	0,35	0,55	0,70	0,75	0,00	0,85	0,15	0,15

4. Заключение

Опыт проведенных численных экспериментов по статистической оценке качества объективного анализа трехмерной структуры мезометеорологических полей, осуществленного на примере полей температуры и ветра, позволяет сделать два важных для метеорологической практики вывода:

– во-первых, объективный анализ поля температуры (при условии, что узлы регулярной сетки находятся внутри области интерполяции с радиусом R , см. рис. 3) следует проводить с

помощью метода оптимальной интерполяции, обеспечивающего вполне приемлемую для практики точность построения этого поля, а объективный анализ поля ветра при этом же условии необходимо проводить уже на основе комплексного алгоритма, включающего в себя алгоритмы оптимальной интерполяции и ММГУА, поскольку данный алгоритм обеспечивает лучшую точность, чем метод оптимальной интерполяции;

– во-вторых, для объективного анализа полей температуры и ветра в тех случаях, когда узлы регулярной сетки располагаются вне области интерполяции с радиусом R , всегда следует использовать только комплексный алгоритм, так как он дает достаточно высокую точность пространственного прогноза, которую не может дать метод оптимальной экстраполяции.

В заключение следует отметить, что полученные результаты требуют дополнительной проверки на основе более полного статистического материала, охватывающего большие по продолжительности периоды аэрологических наблюдений и представляющего разные мезометеорологические полигоны, которые должны быть расположены в различных физико-географических районах.

1. Белов П. Н., Борисенко Е. П., Панин Б. Д. Численные методы прогноза. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 376 с.
2. Белов П. Н. Практические методы численного прогноза погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 335 с.
3. Белоусов С. Л., Гандин Л. С., Машкович С. А. Обработка оперативной метеорологической информации с помощью электронных вычислительных машин. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 282 с.
4. Гандин Л. С., Каган Р. Л. Статистические методы интерполяции метеорологических данных. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 359 с.
5. Комаров В. С., Креминский А. В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 7. С. 958–965.
6. Комаров В. С., Креминский А. В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 7. С. 941–957.
7. Казакевич Д. И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 319 с.
8. Либерман Ю. М. // Применение статистических методов в метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1978. С. 162–165.
9. Кочерга Ю. Л. // Автоматика. 1991. N 5. С. 80–86.
10. Четвериков И. А. // Труды ЦИП. 1962. Вып. 102. С. 3–12.
11. Berghthorsson P., Doos V. R. // Tellus. 1955. V. 7. N 3. P. 329–340.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
10 июля 1995 г.

V. S. Komarov, A. V. Kreminskiy. Objective Analysis of Mesometeorological Fields Three-dimensional Structure Based on Optimum Integration of Spatial Interpolation Alternative Methods.

An original approach to solution of the problem of mesometeorological fields objective analysis is proposed based on the procedure of optimum integration of two alternative methods of spatial interpolation (optimum interpolation and MGAAM). Methodology, algorithms, and test results are discussed by the example of temperature and wind data.