

**В.С. Комаров, А.В. Креминский, Ю.Б. Попов**

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ МЕЗОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА НЕОСВЕЩЕННУЮ ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕРРИТОРИЮ**

Рассматривается уточненная комплексная методика прогнозирования, базирующаяся на оптимальном комплексировании двух альтернативных схем прогноза (они основаны на использовании метода оптимальной экстраполяции и модифицированного метода группового учета аргументов) и разработанная применительно к решению задачи пространственной экстраполяции мезометеорологических полей на неосвещенную данными аэрологических наблюдений территорию. Здесь же обсуждаются численные оценки качества такого прогнозирования, проведенного по данным многолетних наблюдений сети радиозондовых станций, представляющих типичный мезометеорологический полигон.

### **1. Введение**

Среди современных и актуальных проблем прикладной метеорологии важное место занимает проблема пространственной экстраполяции вертикальной структуры мезометеорологических полей (т.е. полей с характерным масштабом от десятков до сотен километров [1]) на неосвещенную данными аэрологических наблюдений территорию. Это обусловлено тем, что скорейшая реализация указанной проблемы требуется для решения многих народнохозяйственных и оборонных задач и, в частности таких, как:

- локальный численный прогноз погоды в районах с редкой сетью аэрологических станций;
- оценка пространственного распределения техногенных загрязняющих веществ (в том числе радионуклидов) на малые расстояния (до 100–200 км) от источников промышленных аварий;
- оперативное оценивание физического состояния атмосферы (и в первую очередь, ее температурного и ветрового режима) для выдерживания заданных траекторий полета снарядов и ракет, а также повышения точности и эффективности поражения цели на территории противника;
- метеорологическое обеспечение взлета и посадки различных летательных аппаратов, в том числе космических кораблей многоцелевого использования типа «ШАТТЛ» и т.п.

Здесь следует отметить, что для решения всех вышеперечисленных задач пространственная экстраполяция мезометеорологических полей должна осуществляться с большим разрешением по горизонтали (с шагом от 5 до 50 км [1]) и по высоте (с шагом от 100 до 500 м в слое 0–3 км и порядка 1–1,5 км в слое 3–16 км [2]), а также обеспечивать требуемую точность оценки этого поля в прогнозируемой точке. Так, например, для геофизического обеспечения современных ракетных и артиллерийских систем фронтового действия необходимо, чтобы оценка

средней температуры, зональной и меридиональной составляющих вектора среднего ветра (эти параметры представляют собой результаты усреднения указанных метеорологических величин по вертикали в заданных слоях атмосферы) проводилась со стандартной (среднеквадратической) погрешностью 1,0–1,2° и 1,0–1,2 м/с соответственно [3].

Вполне понятно, что на практике подобные требования выполнить достаточно сложно, поскольку решение задачи надежной экстраполяции трехмерной структуры мезометеорологических полей сталкивается с рядом трудностей.

В о - п е р в ы х , существующая мировая сеть аэрологических станций из-за своей крайней неоднородности и малой плотности (даже в наиболее освещенных данными наблюдений районах Европы и Северной Америки наикратчайшие расстояния между соседними станциями не бывают, за редким исключением, менее 300–400 км [4]) не позволяет оценить с необходимым качеством и разрешением трехмерную структуру мезометеорологических полей.

В о - в т о р ы х , даже наиболее распространенный в численных прогностических схемах метод оптимальной экстраполяции (он подробно описан в [4]) требует для своей реализации обязательного привлечения больших объемов исходной информации, а также расчета (по данным многолетних наблюдений) различных статистических характеристик пространственной структуры полей метеорологических величин и, в первую очередь, автокорреляционных функций.

В - т р е т ь и х , в имеющихся численных схемах пространственного прогноза, включая схему оптимальной экстраполяции, в качестве входной информации чаще всего используются значения централизованных полей, рассчитываемые с помощью глобального архива климатических норм (средних), представляемых обычно в узлах регулярной географической сетки с шагом 5° по широте и 10° по долготе [5], которая не позволяет осуществить экстра-

поляцию мезометеорологических полей с требуемым пространственным разрешением.

В-четвертых, существует определенный класс прикладных задач, связанных, например, с геофизическим обеспечением военно-технических систем в период ведения боевых действий, когда нарушен международный информационный обмен и требуется разработка специальных методов пространственной экстраполяции мезометеорологических полей, основанных на использовании только оперативных данных, поступающих с локальной сети аэрологических станций.

Учитывая все вышесказанное, а также отсутствие публикаций по затрагиваемому вопросу, специалистами Института оптики атмосферы СО РАН (под руководством В.С. Комарова) были развернуты в последние годы широкие фундаментально-прикладные исследования по проблеме разработки специальных методов и алгоритмов численной экстраполяции трехмерной структуры мезометеорологических полей в условиях информационной неопределенности, т.е. при ограниченном объеме экспериментальных данных (первые результаты исследований по данной проблеме приведены в [6–8]). В основу предложенных методик и алгоритмов был положен комплексный подход, базирующийся на процедуре оптимального комплексирования альтернативных методов прогноза, а именно: метода оптимальной экстраполяции (МОЭ) и модифицированного метода группового учета аргументов (ММГУА).

Статистическое оценивание качества такой процедуры, проведенное применительно к прогнозу мезомасштабных полей температуры и ветра [7], показало, что она дает вполне приемлемые для практики результаты и заметно повышает (по сравнению с МОЭ) точность пространственной экстраполяции. Однако из-за малого объема использованной при этом экспериментальной информации полученные результаты требуют дополнительной проверки на основе более представительных и статистически обеспеченных выборок аэрологических наблюдений.

В настоящей статье и обсуждаются результаты проверки качества пространственной экстраполяции мезометеорологических полей по комплексу альтернативных методов (МОЭ и ММГУА), проведенной, в отличие от [7], на достаточно полном эмпирическом материале.

## 2. Некоторые методические аспекты решения задачи пространственной экстраполяции мезометеорологических полей

Прежде чем рассмотреть некоторые методические аспекты решения поставленной задачи, сформулируем в общем виде само понятие пространственной экстраполяции полей метеорологических величин.

Пусть задана некоторая функция  $\xi(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)})$  нескольких независимых переменных. Проведем

через точки, в которых известны значения  $\xi(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)})$ ,  $n$ -мерную сферу минимального радиуса. Тогда, согласно [4], под понятием «экстраполяция функции  $\xi$ » будем понимать процедуру определения ее значений вне  $n$ -мерной сферы. Следовательно, задачу экстраполяции можно свести к определению значения функции в некоторой точке по известным ее значениям в других точках.

Эту задачу можно сформулировать применительно к случайному полю и более строго, используя некоторый математический аппарат.

Пусть в точках  $\mathbf{r}_i \in W_x \subset R^m$  (здесь  $\mathbf{r}_i$  – радиус-вектор точки, составленный пространственными координатами  $x, y, z$  и временем  $t$ , а  $i = 1, 2, \dots, n$  – число точек в некотором замкнутом множестве  $W_x$  конечномерного евклидова пространства  $R^m$ ) заданы значения однородного центрированного поля  $\xi$ . Тогда процедура пространственной экстраполяции поля в точку  $\mathbf{r}_i \notin W_x \subset R^m$  (т.е. нахождение его значения  $\xi(\mathbf{r}_i)$  вне множества  $W_x$  по известным значениям  $\xi(\mathbf{r}_i)$  в точках  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n$ , относящихся к множеству  $W_x$ ) сводится к выражению вида

$$\hat{\xi}(\mathbf{r}_0) = \Xi[\xi(\mathbf{r}_1), \xi(\mathbf{r}_2), \dots, \xi(\mathbf{r}_n)], \quad (1)$$

где вид функции  $\Xi$  определяется используемым способом экстраполяции и взаимным расположением точек  $\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n$ .

Поскольку в рассматриваемой задаче речь идет об экстраполяции однородного и центрированного мезометеорологического поля, в пределах которого, согласно [4], отмечаются горизонтальная однородность и изотропность и, следовательно, для него справедливы равенства

$$\bar{\xi}(\mathbf{r}_i) = \bar{\xi}(\mathbf{r}_k) = \dots = \bar{\xi}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\xi}^2(\mathbf{r}_i) = \sigma_{\xi}^2(\mathbf{r}_k) = \sigma_{\xi}^2; \quad (3)$$

$$\mu_{\xi}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_k) = \mu_{\xi}(\rho) \quad (4)$$

(здесь  $\bar{\xi}$  – среднее;  $\sigma_{\xi}^2$  – дисперсия и  $\mu_{\xi}(\rho)$  – нормированная корреляционная функция,  $\rho = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k|$  – расстояние между точками  $\mathbf{r}_i$  и  $\mathbf{r}_k$ ), то нами, как и ранее [6], в качестве основного способа пространственного прогноза структуры этого поля использован оригинальный подход, базирующийся на процедуре оптимального комплексирования двух различных альтернативных методов статистической экстраполяции (МОЭ и ММГУА).

При этом метод оптимальной экстраполяции применяется для выбора атмосферного уровня, где отмечается минимальная среднеквадратическая погрешность прогноза, а также для соответствующего (на том же уровне) восстановления поля  $\xi$  в заданной точке (с координатами  $x_0$  и  $y_0$ ), проводимого по известным его значениям в окружающих точках  $\mathbf{r}_i$

(т.е. на аэрологических станциях), находящихся вне области интерполяции. В то же время модифицированный метод группового учета аргументов используется для численного восстановления вертикальной структуры поля в прогнозируемой точке  $(x_0, y_0)$  уже во всем рассматриваемом слое атмосферы.

Поскольку подробное описание теоретических основ и алгоритмов МОЭ и ММГУА дается в [4, 6, 8], то в настоящей статье приводится лишь краткое изложение существа этих методов, несколько уточненное применительно к решению рассматриваемой задачи.

#### а) Метод оптимальной экстраполяции

В соответствии с методом оптимальной экстраполяции определение значения поля в точке  $\mathbf{r}_0 \notin W_x \subset R^m$  по данным его измерений в точках  $\mathbf{r}_i$  (т.е. по данным близрасположенных аэрологических станций с координатами  $x_i, y_i$ ) осуществляется с помощью выражения [4]

$$\xi(\mathbf{r}_0) = \sum_{i=1}^n a_i \xi(\mathbf{r}_i), \quad (5)$$

где  $a_i$  – весовые коэффициенты, подлежащие вычислению, а  $n$  – число использованных точек (станций).

При этом для оптимального оценивания значения поля  $\xi$  в точке  $\mathbf{r}_0$  требуется, чтобы при определении весовых коэффициентов  $a_i$  соблюдалось условие

$$\mathbf{E}[\mathbf{a}] = \mathbf{M} \left\{ [\tilde{\xi}(\mathbf{r}_0) - a_i \xi(\mathbf{r}_i)]^2 \right\} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $\tilde{\xi}(\mathbf{r}_0)$  – наблюдаемое значение поля  $\xi$  в точке  $\mathbf{r}_0$ ;  $\mathbf{M}$  – оператор математического ожидания.

Значение  $\min \mathbf{E}[\mathbf{a}]$  называется погрешностью оптимальной экстраполяции.

Для определения весовых коэффициентов  $a_i$  используется обычно система линейных уравнений (сокращенно СЛУ) вида [4]

$$\sum_{j=1}^n a_j \mu_{ij} + \eta^2 a_i = \mu_{0i} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

где  $\mu_{ij}$  и  $\mu_{0i}$  – коэффициенты пространственной корреляции истинных значений поля  $\xi$  в точках  $\mathbf{r}_i$  и  $\mathbf{r}_j$ , а также в точках  $\mathbf{r}_0$  и  $\mathbf{r}_i$  соответственно;  $\eta^2 = \Delta^2 / \sigma_\xi^2$  – так называемая мера ошибки измерения (здесь  $\Delta^2$  – дисперсия этой ошибки, а  $\sigma_\xi^2$  – дисперсия метеорологической величины  $\xi$ ).

Поскольку в решаемой задаче мы имеем дело с мезометеорологическими полями, которые, согласно [4], можно отнести к однородным и изотропным, то значения автокорреляционных функций  $\mu_{ij}$  и  $\mu_{0i}$  зависят только от расстояния между взятыми точками. Кроме того, из-за неизменности дисперсий  $\sigma_\xi^2$  (в пределах мезомасштабного полигона) и постоянства

ошибок радиозондовых наблюдений мера ошибки измерения в точках  $\mathbf{r}_0$  и  $\mathbf{r}_i$  одинакова.

На практике в алгоритмах МОЭ для оценки значений  $\mu_{ij}$  и  $\mu_{0i}$  в зависимости от расстояния

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (8)$$

обычно используются различные аналитические функции. В наших предыдущих работах [6–8] для аппроксимации пространственных корреляционных функций были применены следующие аналитические функции:

для температуры ( $T$ )

$$\mu_T(\rho) = \exp(-0,825 \rho^{0,92}) \quad (9)$$

для зонального ( $V_x$ ) и меридионального ( $V_y$ ) ветра

$$\mu_{V_x}(\rho) = \mu_{V_y}(\rho) = (1 - 0,98\rho) \exp(-0,98\rho). \quad (10)$$

В настоящей статье для аппроксимации эмпирических пространственных корреляционных функций температуры, зонального и меридионального ветра на уровне земли (данный уровень используется при прогнозе приземных полей методом оптимальной экстраполяции) взяты другие аналитические зависимости, заимствованные из [9], а именно:

для температуры

$$\mu_T(\rho) = \{ \exp(-\alpha\rho) \} \cos(\beta\rho), \quad (11)$$

где  $\alpha = 0,436$ , а  $\beta = 0,863$ ;

для зонального и меридионального ветра

$$\mu_{V_x}(\rho) = \mu_{V_y}(\rho) = (1 - \alpha\rho) \exp(-\rho)^2, \quad (12)$$

где  $\alpha = 1,162$ .

В формулах (11) и (12)  $\rho$  – расстояние, тыс. км.

#### б) Модифицированный метод группового учета аргументов

Рассмотрим теперь вкратце существо модифицированного метода группового учета аргументов (подробно он описан в [6]).

Пусть на интервале дискретных наблюдений  $t = 1, 2, \dots, N$  определены значения однородного централизованного поля в точках  $\mathbf{r}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Тогда по найденным значениям этого поля в одной из точек  $\mathbf{r}_i$ , находящейся на ближайшем расстоянии от точки  $\mathbf{r}_0$ , а также по результатам его оптимальной экстраполяции в данную точку, реализованной на уровне, где отмечается минимальная ошибка прогноза на момент времени  $t = N + 1$ , можно сформировать выборку пространственно-временных наблюдений вида

$$\{ \xi_i(h, t), h = 0, 1, \dots, h_k; t = 1, 2, \dots, N \};$$

$$\{ \xi_0(h, t), h = 0, 1, \dots, \bar{h} \leq h_k; t = N + 1 \}, \quad (13)$$

где  $\xi_i(h, t)$  – совокупность значений поля  $\xi$  в точке с координатами  $x_i$  и  $y_i$  на высотах  $h$ , полученных за ин-

тервал времени  $t$ , когда проводились дискретные измерения;  $\xi_0(h, t)$  – искомые значения того же поля в точке с заданными координатами  $x_0$  и  $y_0$  на высоте  $h$  в момент времени  $t = N + 1$ .

На основе выборки пространственно-временных наблюдений (13) и выбранного класса базисных функций, в качестве которых в алгоритме ММГУА взяты смешанные разностные динамико-стохастические модели вида [6]

$$\xi_0(h, N + 1) = \sum_{\tau=1}^{N^*} A(h, \tau) \xi_i(h, N + 1 - \tau) + \sum_{j=1}^{h-1} B(h, j) \xi_j(j, N + 1) + \xi(h, N + 1) \quad (14)$$

(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 величина  $\xi(h, N + 1)$  – ее невязка), осуществляются отбор и построение наилучшей прогнозирующей модели, а также процедура пространственной экстраполяции поля  $\xi$  из точки  $\mathbf{r}_i$  в точку  $\mathbf{r}_0$ .

При этом для выбора и построения наилучшей прогнозирующей модели ММГУА используются:

1. Метод направленного группового перебора, применяемый для оптимизации структуры модели с двухэтапной селекцией моделей по двум критериям, в качестве которых взяты:

а) финальная ошибка прогнозирования (X. Акаике [10])

$$FRE = \frac{(N - N^* - 1) + s}{(N - N^* - 1) - s} RSS(s) \quad (15)$$

$$\text{при } RSS(s) = \sum_{j=1}^{N-N^*-1} \left[ \xi_{h,N-j}^{(i)} - \hat{\xi}_{h,N-j}^{(i)}(s) \right]^2, \quad (16)$$

где  $RSS(s)$  – остаточная сумма квадратов для текущей модели  $\hat{\xi}_{h,N-j}^{(i)}(s)$ , содержащей «s» ненулевых оценок, определяющих сложность этой модели.

При этом отбор  $N^* + h$  лучших структур моделей вида (14) осуществляется по подборке  $n_1$ , содержащей наблюдения до момента времени  $t = N + 1$ , а оценка значений  $\hat{\xi}_{h,N-j}^{(i)}(s)$  проводится с помощью выражения

$$\hat{\xi}_{h,N-j}^{(i)}(s) = X \hat{\Theta}, \quad X \in M_{(N-N^*-1)(N^*+h)}, \quad \hat{\Theta} \in R^{(N^*+h)}, \quad (17)$$

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 подвыборке  $n_1$ , вычисляемая по специальным формулам [6] (здесь  $T$  – операция транспонирования);  $M_{m \times p}$  – множество вещественных матриц размерностью  $m \times p$ ;  $R^m$  –  $m$ -мерное евклидово пространство;

б) среднеквадратическая ошибка экстраполяции по подвыборке  $n_2$ , включающей в себя лишь наблюдения в момент времени  $t = N$ , а именно

$$|\xi_{h,N}^{(i)} - \hat{\xi}_{h,N}^{(i)}(s)| \rightarrow \min. \quad (18)$$

В формуле (18) минимум берется по всем  $N^* + h$  структурам, каждой из которых соответствует своя модель  $\hat{\xi}_{h,N}^{(i)}(s)$ .

2. Метод минимаксного оценивания, применяемый для получения оценок параметров модели  $\hat{\Theta}$  на всей выборке  $n_1 + n_2$ , которые позволяют гарантировать качество соответствующего прогноза, определяемое с помощью неравенства

$$E |E(\xi_{h,N+1}^{(0)}) - \hat{\xi}_{h,N+1}^{(0)}|^2 \leq \delta_{h,N+1} \quad (h = \bar{h} + 1, \dots, h_k), \quad (19)$$

где  $E(\bullet)$  – оператор математического ожидания, а  $\xi_{h,N+1}^{(0)}$  и  $\delta_{h,N+1}$  – минимаксные оценки, зависящие от дисперсии ошибки наблюдений и от априорной информации о максимально допустимых значениях погрешностей прогноза (экстраполяции).

В заключение следует отметить, что при выборе и построении наилучшей прогнозирующей модели ММГУА вектор  $\xi_0(h, N + 1)$  (он входит в состав исходной выборки пространственно-временных наблюдений) должен иметь не менее одного известного значения на той или иной высоте  $h$ , получаемого в нашем случае методом оптимальной экстраполяции на уровне минимума ошибки прогноза, а при реализации процедуры полного восстановления высотного профиля в точке  $\mathbf{r}_0$  с помощью этой модели используется предположение, что вертикальная структура поля в прогнозируемой точке  $\mathbf{r}_0$  идентична структуре того же поля в ближайшей к ней точке  $\mathbf{r}_i$ .

### 3. Оптимизация объема исходной выборки и числа лучших структур прогнозирующих моделей для построения оптимального численного алгоритма ММГУА

Описанный выше алгоритм ММГУА имеет в своей основе некоторые ограничения, связанные с процедурой формирования выборки пространственно-временных наблюдений (13) и с заданием числа лучших структур моделей, а именно:

- число уровней  $k$  не должно превышать 40;
- используемое количество исходных наблюдений  $N$  не должно быть более 100;
- число лучших структур моделей, перебираемых алгоритмом ММГУА, для первого этапа селекции, осуществляемой по критерию финальной ошибки прогноза (15), должно быть не менее 5 (меньшее их число может привести к получению плохой структуры модели) и не слишком большим, чтобы не вызвать слишком длительных по времени вычислений.

Предварительный анализ имеющихся аэрологических данных показывает, что первое из названных ограничений, связанное с допускаемым количеством уровней  $k = 40$ , вполне приемлемо для решения задачи

пространственной экстраполяции вертикальной структуры мезометеорологических полей. В то же время два последующих ограничения, связанных с выбором требуемого количества исходных наблюдений и числа лучших структур моделей, характеризуются достаточной неопределенностью. Поэтому, прежде чем использовать алгоритм ММГУА в практических расчетах, необходимо провести предварительные его исследования на предмет поиска оптимального объема исходной выборки и определения (на основе фактических данных) требуемого числа лучших структур моделей.

Учитывая это обстоятельство, авторами настоящей статьи были проведены специальные численные эксперименты по оценке качества вычислительного алгоритма ММГУА в зависимости от используемого количества исходных аэрологических данных, формирующих выборку пространственно-временных наблюдений (13), и от числа задаваемых структур прогнозирующих моделей. Подобная оценка была осуществлена на основе результатов многолетних (1971–1975 гг.) радиозондовых измерений температуры и ветра, проведенных на трех аэрологических станциях: Варшава, Минск и Львов (их координаты указаны ниже).

Численные эксперименты по оценке качества вычислительного алгоритма ММГУА показали, что: – для построения оптимальной вычислительной схемы пространственной экстраполяции поля  $\xi$  необходимо, чтобы количество наблюдений превышало количество уровней на единицу, т.е. число исходных реализаций  $N$  находилось бы из соотношения

$$N = k + 1, \quad (20)$$

где  $k$  – число взятых уровней, на которых имеются измерения метеорологической величины. При этом необходимо соблюдать условие, чтобы выборка исходных данных содержала не менее 7 реализаций поля  $\xi$ ;

– увеличение числа уровней  $k$  внутри рассматриваемого слоя атмосферы (но при условии, что  $k \leq 40$ ) приводит к заметному улучшению качества пространственной экстраполяции;

– оптимальное число задаваемых структур моделей в алгоритме ММГУА должно быть равным 15 (для слоя «уровень Земли – 3 км») и 10 (для слоя 4–10 км), так как в этом случае обеспечивается получение наилучшей структуры модели ММГУА и надежное пространственное прогнозирование поля  $\xi$ .

Наряду с этим была сделана также и оценка требуемой периодичности (временного шага) исходных данных, поскольку в существующей практике радиозондовые наблюдения обычно проводятся в два срока (в 0 и 12 ч по Гринвичу), т.е. с интервалом в 12 ч. На основе такой оценки было установлено, что для малых высот (ниже 3 км) лучшие результаты пространственной экстраполяции получаются в случае, когда данные аэрологических наблюдений взяты с временным интервалом в 24 ч, а для высот  $h > 3$  км

их целесообразно брать с интервалом в 12 ч. К тому же дополнительно установлено, что лучшие результаты пространственного прогноза получаются тогда, когда радиозондовые наблюдения берутся за срок 0 (24) ч по Гринвичу.

В заключение следует отметить, что, согласно [11], при пространственной экстраполяции мезометеорологических полей, осуществляемой в нижнем слое тропосферы, самые качественные результаты получаются при дискретности исходных данных, равной 6 ч и менее. Однако подобная временная дискретность достигается лишь при использовании данных лидарного зондирования.

#### 4. Результат статистической оценки качества пространственной экстраполяции полей температуры и ветра

Для проведения процедуры пространственной экстраполяции на основе оптимального комплексования двух альтернативных методов прогноза (МОЭ и ММГУА) и оценки качества такой экстраполяции нами были использованы данные многолетних (1971–1975 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 (схему см. [9, рис. 1]). При этом для расчетов из общего массива исходных данных выбраны лишь синхронные по времени (для всех станций) двухсрочные (0 и 12 ч по Гринвичу) наблюдения. Кроме того, все использованные данные радиозондовых наблюдений приведены к единой системе геометрических высот, которая включает, в отличие от [7], не 9, а 13 стандартных уровней, а именно: 0 (уровень земли); 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 и 8,0 км, позволяющих описать с большим вертикальным разрешением почти всю тропосферу, в том числе и пограничный слой.

Использование в решаемой задаче этих атмосферных уровней связано с тем, что процедура пространственной экстраполяции мезометеорологических полей (в нашем случае полей температуры и ветра) реализована применительно к задачам численного прогноза распространения техногенных загрязняющих веществ, обычно осуществляемого в тропосфере (при максимуме переноса примеси в пограничном слое [12]).

Следует к этому добавить, что для практических расчетов масштаба пространственного распространения облака какой-либо примеси обычно применяются не данные измерений температуры и ветра на отдельных уровнях, а результаты их осреднения по отдельным атмосферным слоям. Поэтому для формирования исходных массивов пространственно-временных наблюдений, используемых для решения задачи про-

пространственной экстраполяции мезометеорологических полей, была использована, как и в [7], процедура послойного осреднения температуры  $T$ , зональной  $V_x$  и меридиональной  $V_y$  составляющих вектора ветра, осуществляемого с помощью выражений вида

$$\langle T \rangle_{h_0,h} = \frac{1}{h-h_0} \int_{h_0}^h T(z) dz; \quad (21)$$

$$\langle V_x \rangle_{h_0,h} = \frac{1}{h-h_0} \int_{h_0}^h V_x(z) dz; \quad (22)$$

$$\langle V_y \rangle_{h_0,h} = \frac{1}{h-h_0} \int_{h_0}^h V_y(z) dz \quad (23)$$

(где  $z$  – высота, а знак  $\langle \bullet \rangle$  обозначает процедуру осреднения данных по вертикали в слое  $h-h_0$ , где  $h_0=0$  – высота нижней границы взятого слоя, а  $h$  – высота его верхней границы).

В качестве атмосферных слоев использованы следующие слои: 0–0,2; 0–0,4; 0–0,8; 0–1,2; 0–1,6; 0–2,0; 0–2,4; 0–3,0; 0–4,0; 0–5,0; 0–6,0 и 0–8,0 км. Здесь следует отметить, что слой 0–10 км (последний слой тропосферы) исключен из рассмотрения, поскольку вблизи уровня 10 км (~250 гПа) из-за влияния тропопаузы отмечается большая ошибка пространственной интерполяции (и, следовательно, экстраполяции) полей температуры и ветра, о чем можно судить из работы [13].

И наконец, статистическая оценка качества пространственной экстраполяции среднепослойных 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 (или просто средней температуры, среднего зонального (меридионального) ветра) осуществлялась с помощью стандартной (среднеквадратической) погрешности экстраполяции  $\delta_\xi$ , определяемой из выражения вида

$$\delta_\xi = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta \xi_i)^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

(здесь  $\Delta \xi_i = \xi_i^* - \xi_i$  –  $i$ -е отклонение полученного (в результате экстраполяции) значения метеорологической величины  $\xi_i^*$  от ее измеренного значения  $\xi_i$ , а  $n$  – число взятых реализаций), а также вероятности  $P$  ошибок (т.е. отклонений  $\Delta \xi_i$ ) менее некоторой заданной величины (для средней температуры менее  $\pm 1$ , ...,  $\pm 4$  и более  $\pm 4^\circ\text{C}$ , а для составляющих вектора среднего ветра менее  $\pm 1$ , ...,  $\pm 4$  и более  $\pm 4$  м/с).

Перейдем теперь к рассмотрению результатов численных экспериментов по оценке качества пространственного прогноза, проведенного на примере полей температуры и ветра на основе метода оптимальной экстраполяции (с использованием построенных нами аналитических функций вида (11) и (12)

[9]) и комплексного алгоритма. С этой целью воспользуемся табл. 1–4, содержащими значения стандартных погрешностей пространственной экстраполяции средней температуры  $\langle T \rangle_{h_0,h}$ , зональной  $\langle V_x \rangle_{h_0,h}$  и меридиональной  $\langle V_y \rangle_{h_0,h}$  составляющих вектора среднего ветра, а также вероятности ( $P$ ) ошибок прогноза тех же параметров менее заданной величины.

Сразу же подчеркнем, что в табл. 1–4 приводятся результаты точностных оценок лишь для двух расстояний (185 и 250 км) между прогнозируемой точкой и ближайшей к ней станцией, где имеются данные радиозондовых наблюдений. В нашем случае в качестве прогнозирующих точек взяты станции Варшава и Минск, а в качестве ближайших к ним точек – станции Брест и Каунас соответственно (см. [9, рис. 1]).

Отметим, что указанные расстояния между точками существенно меньше шага регулярной сетки, равного 300 км, который обычно используется в численных схемах прогноза погоды [1].

Анализ данных табл. 1–4 показывает, что:

– во-первых, комплексный алгоритм пространственной экстраполяции мезометеорологических полей, основанный на процедуре оптимального комплексирования двух альтернативных методов (МОЭ и ММГУА) и примененный в задаче численного прогноза средней температуры, зональной и меридиональной составляющих вектора среднего ветра, является достаточно эффективным (особенно при экстраполяции параметров  $\langle V_x \rangle_{h_0,h}$  и  $\langle V_y \rangle_{h_0,h}$ ), поскольку независимо от сезона и слоя атмосферы вероятность  $P$  ошибок, например менее  $\pm 2^\circ$  и  $\pm 2$  м/с составляет 0,63–0,81 (для средней температуры) и 0,70–0,80 (для составляющих вектора среднего ветра);

– во-вторых, комплексный алгоритм пространственного прогноза существенно улучшает (по сравнению с методом оптимальной экстраполяции) качество этого прогноза. Действительно, из табл. 1–4 следует, что величины превышения вероятности  $P$  ошибок пространственного прогноза рассматриваемых параметров менее  $\pm 2^\circ$  и  $\pm 2$  м/с, проведенного с помощью комплексного алгоритма, над вероятностью аналогичных ошибок того же прогноза, но осуществленного по методу оптимальной экстраполяции, составляют (независимо от сезона и слоя атмосферы): 0,07–0,11 для средней температуры, 0,11–0,15 – для среднего зонального и 0,14–0,29 – для среднего меридионального ветра;

– в-третьих, как и следовало ожидать, среднеквадратические погрешности ( $\delta$ ) пространственной экстраполяции параметров  $\langle T \rangle_{h_0,h}$ ,  $\langle V_x \rangle_{h_0,h}$  и  $\langle V_y \rangle_{h_0,h}$  возрастают по своей величине (хотя и незначительно) с увеличением расстояния между прогнозируемой и ближайшей к ней точками от 180 до 250 км. Лишь зимой при пространственной экстраполяции среднего зонального ветра отмечается обратная зависимость, т.е. уменьшение стандартной погрешности с ростом расстояния между теми же точками, которая прослеживается для всех атмосферных слоев с высотой верх-

ней границы  $h > 1200$  м. Подобная особенность обусловлена тем, что зимой (в отличие от лета) в умеренных широтах Северного полушария наблюдается интенсивный западный перенос [14]. А поскольку направление пространственной экстраполяции в сторону Минска совпадает с направлением этого переноса, и

напротив, экстраполяция в сторону Варшавы осуществляется навстречу переносу, то данное обстоятельство и является причиной нарушения прямой зависимости стандартной погрешности ( $\delta$ ) прогноза среднего зонального ветра от расстояния.

Таблица 1

Стандартные погрешности  $\delta$  и вероятности  $P$  ошибок пространственного прогноза среднепоисловых значений температуры, зонального и меридионального ветра менее и более заданной величины, проведенного методом оптимальной экстраполяции (1) и комплексным методом (2) до расстояния 180 км (зима)

Слой, м	Вероятность, $P$										$\delta$	
	$\leq \pm 1$		$\leq \pm 2$		$\leq \pm 3$		$\leq \pm 4$		$> \pm 4$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
а) Температура, °С												
0-200	40	49	70	78	81	89	90	99	10	1	1,8	1,4
0-400	38	49	69	77	80	89	90	99	10	1	1,9	1,4
0-800	36	47	69	77	79	89	89	98	11	2	2,0	1,5
0-1200	35	46	68	76	78	88	88	98	12	2	2,0	1,7
0-1600	34	44	67	75	76	87	87	98	13	2	2,1	1,8
0-2000	33	43	65	74	75	86	86	98	14	2	2,2	1,8
0-2400	33	42	65	72	74	85	85	97	15	3	2,3	1,8
0-3000	32	40	64	70	73	84	84	95	16	5	2,6	2,1
0-4000	32	39	62	69	72	82	83	94	17	6	2,9	2,3
0-5000	30	37	61	69	71	91	83	92	17	8	3,1	2,5
0-6000	28	34	60	68	70	80	82	91	18	9	3,3	2,6
0-8000	27	33	59	67	69	79	81	90	19	10	3,5	2,7
б) Зональный ветер, м/с												
0-200	22	42	55	80	73	83	87	97	13	3	3,2	1,8
0-400	22	42	55	79	74	83	87	97	13	3	3,3	1,9
0-800	23	41	56	78	75	82	87	97	13	3	3,3	2,0
0-1200	24	40	57	77	74	81	86	95	14	5	3,2	2,1
0-1600	25	40	57	77	76	81	86	95	14	5	3,1	2,2
0-2000	24	40	58	77	76	80	87	94	13	6	3,0	2,3
0-2400	23	40	60	76	76	80	86	94	14	6	2,8	2,3
0-3000	25	39	62	75	76	80	87	94	13	6	2,8	2,3
0-4000	26	39	63	75	76	80	86	93	14	7	2,7	2,4
0-5000	28	38	64	75	75	81	87	92	13	8	2,6	2,4
0-6000	27	37	63	75	76	80	89	92	11	8	2,6	2,4
0-8000	28	37	63	75	77	81	88	92	12	8	2,6	2,4
в) Меридиональный ветер, м/с												
0-200	24	40	54	1	72	86	89	95	11	5	2,7	2,0
0-400	24	40	54	78	72	85	89	95	11	5	2,8	2,1
0-800	25	39	54	77	73	84	88	94	12	6	2,8	2,1
0-1200	26	38	54	78	74	83	88	94	12	6	2,9	2,1
0-1600	25	37	53	77	75	82	89	93	11	7	2,9	2,2
0-2000	25	36	53	76	76	82	87	93	13	7	3,0	2,2
0-2400	25	36	55	76	77	82	88	92	12	8	2,9	2,2
0-3000	26	37	56	75	77	82	88	92	12	8	2,8	2,2
0-4000	26	36	57	75	77	83	90	92	10	8	2,7	2,2
0-5000	27	35	58	75	77	83	91	92	9	8	2,7	2,2
0-6000	28	34	57	75	77	82	91	92	9	8	2,7	2,2
0-8000	27	33	58	74	76	81	91	92	9	8	2,7	2,2

Таблица 2

Стандартные погрешности  $\delta$  и вероятности  $P$  ошибок пространственного прогноза среднепоисловых значений температуры, зонального и меридионального ветра менее и более заданной величины, проведенного методом оптимальной экстраполяции (1) и комплексным методом (2) до расстояния 180 км (лето)

Слой, м	Вероятность, $P$										$\delta$	
	$\leq \pm 1$		$\leq \pm 2$		$\leq \pm 3$		$\leq \pm 4$		$> \pm 4$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
а) Температура, °С												
0-200	44	51	75	81	87	94	92	100	8	0	1,5	1,2
0-400	40	50	73	81	86	94	92	100	8	0	1,5	1,3
0-800	38	49	72	80	84	94	91	100	9	0	1,6	1,3
0-1200	37	48	72	79	82	93	90	100	10	0	1,7	1,5

Слой, м	Вероятность, $P$										$\delta$	
	$\leq \pm 1$		$\leq \pm 2$		$\leq \pm 3$		$\leq \pm 4$		$> \pm 4$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0-1600	3,5	46	70	79	81	92	88	98	12	2	1,9	1,6
0-2000	35	44	69	77	80	92	88	98	12	2	2,0	1,7
0-2400	34	44	69	77	78	91	87	96	13	4	2,0	1,8
0-3000	33	40	68	76	77	90	88	95	12	5	2,5	2,0
0-4000	33	38	67	75	77	89	85	95	15	5	2,7	2,2
0-5000	31	37	66	74	76	89	84	93	16	7	2,8	2,3
0-6000	30	35	65	73	75	88	83	92	17	8	3,0	2,5
0-8000	28	35	63	72	72	87	82	92	18	8	3,2	2,6
б) Зональный ветер, м/с												
0-200	26	41	60	78	76	86	86	95	14	5	2,8	1,8
0-400	26	40	60	78	77	86	86	95	14	5	2,8	2,0
0-800	25	40	59	77	76	86	87	94	13	6	2,7	2,1
0-1200	26	41	60	77	78	86	86	94	14	6	2,7	2,2
0-1600	24	40	58	76	78	85	86	94	14	6	2,7	2,2
0-2000	24	39	57	76	79	84	87	94	13	6	2,6	2,2
0-2400	24	39	59	75	80	84	88	94	12	6	2,6	2,2
0-3000	24	39	60	75	80	84	88	93	12	7	2,6	2,2
0-4000	25	39	62	74	81	83	88	93	12	7	2,5	2,2
0-5000	26	39	62	74	80	83	88	93	11	7	2,5	2,2
0-6000	26	38	62	73	80	83	88	93	12	7	2,6	2,2
0-8000	26	38	61	73	79	82	88	92	12	8	2,5	2,2
в) Меридиональный ветер, м/с												
0-200	21	39	49	76	70	84	85	93	15	7	3,0	2,2
0-400	22	39	50	76	71	83	85	92	15	8	3,1	2,3
0-800	22	40	50	75	72	83	86	93	14	7	3,1	2,3
0-1200	21	39	51	74	72	82	86	92	14	8	3,1	2,4
0-1600	22	38	52	74	71	81	85	91	15	9	3,0	2,4
0-2000	23	38	53	74	72	81	87	90	13	10	2,9	2,4
0-2400	22	37	54	73	73	81	87	90	13	10	2,9	2,3
0-3000	23	37	54	73	73	81	87	90	13	10	2,9	2,4
0-4000	23	36	54	72	72	80	87	90	13	10	2,8	2,4
0-5000	24	36	55	73	73	80	88	90	12	10	2,8	2,4
0-6000	24	35	56	74	73	79	87	90	13	10	2,8	2,3
0-8000	24	35	55	73	73	79	87	90	13	10	2,8	2,4

Таблица 3

Стандартные погрешности  $\delta$  и вероятности  $P$  ошибок пространственного прогноза среднепоисловых значений температуры, зонального и меридионального ветра менее и более заданной величины, проведенного методом оптимальной экстраполяции (1) и комплексным методом (2) до расстояния 250 км (зима)

Слой, м	Вероятность, $P$										$\delta$	
	$\leq \pm 1$		$\leq \pm 2$		$\leq \pm 3$		$\leq \pm 4$		$> \pm 4$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
а) Температура, °С												
0-200	28	38	63	71	72	85	87	96	13	4	2,0	1,6
0-400	27	38	62	70	72	85	87	96	13	4	2,1	1,7
0-800	26	38	62	70	71	84	86	95	14	5	2,2	1,8
0-1200	26	37	61	70	70	83	85	95	15	5	2,3	1,9
0-1600	26	37	60	70	69	82	85	95	15	5	2,5	1,9
0-2000	25	36	59	70	68	80	83	94	17	6	2,7	2,0
0-2400	24	36	58	68	67	80	82	94	18	6	2,9	2,1
0-3000	24	35	56	66	66	79	82	94	18	6	3,0	2,2
0-4000	23	34	56	65	65	78	81	93	19	7	3,2	2,4
0-5000	22	33	55	65	64	76	80	92	20	8	3,3	2,6
0-6000	22	33	53	64	63	75	79	90	21	10	3,4	2,7
0-8000	20	32	53	63	62	75	78	90	22	10	3,6	2,8
б) Зональный ветер, м/с												
0-200	24	38	61	75	76	84	85	93	15	7	2,9	1,9
0-400	24	38	60	74	76	84	86	93	14	7	2,9	2,0
0-800	24	38	60	74	77	84	86	92	14	8	3,0	2,0
0-1200	23	37	61	75	77	84	85	91	15	9	3,0	2,0
0-1600	24	37	62	75	76	84	85	91	15	9	2,9	2,0
0-2000	25	38	61	75	77	83	85	91	15	9	2,8	2,1
0-2400	22	37	60	75	78	82	84	91	16	9	2,8	2,1
0-3000	23	36	59	73	78	82	83	90	17	10	2,9	2,2



Слой, м	Вероятность, $P$										$\delta$	
	$\leq \pm 1$		$\leq \pm 2$		$\leq \pm 3$		$\leq \pm 4$		$> \pm 4$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0-4000	24	35	59	72	78	83	83	90	17	10	3,0	2,2
0-5000	22	35	58	72	77	82	84	90	18	10	3,1	2,2
0-6000	22	34	57	72	76	82	83	90	18	10	3,2	2,2
0-8000	22	34	58	73	75	83	82	89	17	11	3,4	2,2
в) Меридиональный ветер, м/с												
0-200	25	36	50	75	68	83	82	93	18	7	3,2	2,1
0-400	24	36	50	75	69	83	82	93	18	7	3,2	2,2
0-800	24	37	49	74	70	83	83	93	17	7	3,3	2,2
0-1200	23	37	49	73	71	82	83	92	17	8	3,4	2,3
0-1600	23	36	48	72	72	81	84	91	16	9	3,4	2,4
0-2000	24	35	48	71	74	80	84	90	16	10	3,3	2,4
0-2400	24	35	48	71	75	80	84	90	16	10	3,2	2,4
0-3000	23	35	47	71	75	80	83	90	17	10	3,1	2,4
0-4000	24	34	48	70	75	80	84	90	16	10	3,0	2,4
0-5000	25	33	49	70	75	80	85	90	15	10	3,0	2,4
0-6000	25	32	49	70	74	81	84	90	16	10	3,1	2,5
0-8000	25	32	49	70	75	81	83	89	17	11	3,0	2,5

Таблица 4

Стандартные погрешности  $\delta$  и вероятности  $P$  ошибок пространственного прогноза среднеслойных значений температуры, зонального и меридионального ветра менее и более заданной величины, проведенного методом оптимальной экстраполяции (1) и комплексным методом (2) до расстояния 250 км (лето)

Слой, м	Вероятность, $P$										$\delta$	
	$\leq \pm 1$		$\leq \pm 2$		$\leq \pm 3$		$\leq \pm 4$		$> \pm 4$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
а) Температура, °C												
0-200	39	52	70	79	84	92	90	100	10	0	1,8	1,3
0-400	38	51	70	79	83	92	89	100	11	0	1,8	1,3
0-800	37	48	68	78	82	91	89	100	11	0	1,9	1,4
0-1200	36	46	67	77	81	90	88	99	12	1	2,0	1,6
0-1600	35	46	66	76	79	90	88	97	12	3	2,1	1,7
0-2000	35	45	65	75	78	89	87	97	13	3	2,3	1,8
0-2400	34	43	64	75	77	88	86	95	14	5	2,3	1,9
0-3000	33	42	64	75	76	87	85	94	15	6	2,6	2,1
0-4000	32	40	63	74	75	87	84	94	16	6	2,9	2,3
0-5000	30	39	62	73	74	86	83	92	17	8	2,9	2,4
0-6000	28	37	62	72	73	85	82	91	18	9	3,1	2,6
0-8000	27	36	61	72	73	84	80	90	20	10	3,4	2,8
б) Зональный ветер, м/с												
0-200	23	42	58	75	71	84	82	92	18	8	3,0	1,9
0-400	23	41	59	75	72	84	81	92	19	8	3,1	2,1
0-800	24	42	60	74	72	84	82	92	18	8	3,1	2,2
0-1200	24	40	59	73	72	83	82	92	18	8	2,9	2,3
0-1600	24	39	60	73	72	82	81	92	19	8	2,9	2,3
0-2000	25	38	60	73	71	84	82	92	18	8	2,8	2,3
0-2400	25	37	59	73	72	83	83	93	17	7	2,8	2,3
0-3000	25	36	60	72	74	83	83	92	17	8	2,9	2,3
0-4000	24	36	60	72	74	81	84	93	16	7	2,8	2,3
0-5000	24	35	60	71	74	82	83	93	17	7	2,8	2,3
0-6000	25	35	59	70	73	82	83	92	17	8	2,8	2,3
0-8000	25	35	59	70	73	81	82	93	18	7	2,7	2,4
в) Меридиональный ветер, м/с												
0-200	20	41	44	73	66	82	80	91	20	9	3,5	2,3
0-400	20	42	45	73	65	83	80	91	20	9	3,5	2,4
0-800	20	40	44	73	65	82	81	92	19	8	3,4	2,4
0-1200	21	41	46	72	66	81	82	91	18	9	3,5	2,5
0-1600	20	41	47	71	67	80	82	90	18	10	3,4	2,5
0-2000	22	40	47	71	68	80	82	90	18	10	3,4	2,4
0-2400	21	38	48	71	69	80	81	90	19	10	3,4	2,4
0-3000	21	39	49	71	70	80	81	88	19	12	3,3	2,6
0-4000	20	39	50	71	71	81	82	87	18	13	3,2	2,6
0-5000	22	39	50	71	72	82	83	86	17	14	3,2	2,6
0-6000	22	37	51	70	73	81	84	86	16	14	3,1	2,7
0-8000	23	37	51	70	74	80	84	86	16	14	3,0	2,7

Таким образом, результаты численных экспериментов по статистической оценке качества пространственной экстраполяции мезомасштабных метеорологических полей, проведенной на примере полей температуры и ветра, позволяют сделать два важных для практики вывода:

– комплексный подход к решению проблемы пространственной экстраполяции мезометеорологических полей на неосвещенную данными аэрологических наблюдений территорию дает существенно лучшие результаты прогноза, чем используемый в практике численного построения полей метод оптимальной экстраполяции;

– комплексный алгоритм пространственной экстраполяции мезометеорологических полей температуры и ветра является вполне перспективным (вероятность ошибок прогноза этих метеорологических величин менее  $\pm 2^\circ$  ( $\pm 2$  м/с) составляет даже до расстояния 250 км в основном более 0,70) и может с успехом использоваться при создании автоматизированных систем метеорологической поддержки локального мониторинга атмосферных загрязнений.

1. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 376 с.

2. Комаров В.С., Солдатенко С.А., Соболевский О.М. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 440–445.
3. Акселевич В.И. Физико-статистические методы восстановления физических параметров состояния тропосферы в задачах атмосферного мониторинга и военной геофизики: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: РГГМИ, 1994. 16 с.
4. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 359 с.
5. Гутерман И.Г., Вакалюк Ю.В. // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1983. Вып. 96. С. 3–16.
6. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 941–957.
7. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 958–965.
8. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 413–423.
9. Комаров В.С., Попов Ю.Б. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 8. С. 801–807.
10. Akaike H // Ann. Inst. Statist. Math. 1969. V. 21. P. 243–247.
11. Комаров В.С., Акселевич В.И., Гришин А.И., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Матвиенко Г.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 1039–1047.
12. Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 423 с.
13. Брюхань Ф.Ф. Методы климатической обработки и анализа аэрологической информации. М.: Гидрометеоздат, 1983. 112 с.
14. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др. Климатология. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 568 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
28 апреля 1998 г.

*V.S. Komarov, A.V. Kreminskii, Yu.B. Popov. Application of Joined Method of Forecasting in the Problems of the Mesometeorological Fields Spatial Extrapolation to the Territory with Lack of Observational Data.*

A revised joined method of forecasting based on optimal integration of two alternative forecasting schemes (optimal extrapolation and a modified method of group accounting for arguments), being developed for solution of the problem of mesometeorological fields spatial extrapolation to the territory devoid of data of aerological observations is treated in the paper. The results of qualitative numerical estimate of such forecast, based on the data of many-year observations, are discussed.