

Ю.Б. Попов ¹, В.И. Акселевич ², А.В. Креминский ¹, В.В. Курушев ³,
А.В. Лавриненко ¹, Н.Я. Ломакина ¹

Комплексный алгоритм пространственно-временной экстраполяции мезометеорологических полей в задачах атмосферно-экологического мониторинга ограниченных территорий

¹ *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

² *Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург*

³ *Главный гидрометеорологический центр, г. Москва*

Поступила в редакцию 30.12.2002 г.

Рассматриваются оригинальная методика и алгоритм пространственно-временной экстраполяции мезометеорологических полей, базирующийся на использовании процедуры оптимального комплексирования модифицированного метода группового учета аргументов и метода калмановской фильтрации. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований качества комплексного алгоритма при его применении в задаче пространственной экстраполяции полей температуры и ветра на неосвещенную данными наблюдений территорию.

Введение

В последние годы в связи с возросшими требованиями к данным атмосферно-экологического мониторинга ограниченных территорий (например, крупного города или промышленной зоны) появилась потребность в разработке новых, более надежных методов и алгоритмов пространственной экстраполяции метеорологических полей в области мезомасштаба. Ключевую роль в переносе загрязняющих веществ в атмосфере играют температура и ветер, поэтому определение полей этих метеовеличин необходимо для оценки пространственного распространения техногенных загрязнений на малые (до 100–200 км) расстояния.

Для решения подобных экологических задач необходимо, чтобы значения мезомасштабных полей температуры и ветра задавались с требуемым разрешением по высоте и горизонтали. Так, согласно [1, 2], экстраполяция метеорологических полей в пограничном слое атмосферы, где отмечается основной перенос техногенных примесей, должна проводиться с шагом от 200 до 400 м по высоте и с шагом от 5 до 20 км по горизонтали.

На практике выполнить такие жесткие требования достаточно сложно, поскольку:

– масштаб экстраполяции мезометеорологических полей существенно меньше расстояний между станциями мировой аэрологической сети (эти расстояния варьируют в основном в пределах 300–400 км [3] и только в густо населенных районах земного шара) и, следовательно, по данным такой сети станций нельзя надежно оценить структуру указанных полей с большим пространственным разрешением;

– используемые в современных схемах объективного анализа метеорологических полей методы пространственной интерполяции и экстраполяции (например, методы оптимальной интерполяции, полиномиальной и сплайновой аппроксимации [3, 4]) не дают надежных результатов в районах с редкой сетью станций, а также при прогнозе этих полей на неосвещенную данными наблюдений территорию.

Учитывая все это, специалистами Института оптики атмосферы в середине 90-х гг. прошлого столетия был разработан оригинальный динамико-стохастический алгоритм решения задачи пространственной экстраполяции мезометеорологических полей, базирующийся на использовании процедуры комплексирования метода оптимальной экстраполяции, который широко используется в практике объективного анализа метеорологических полей, с модифицированным методом группового учета аргументов (ММГУА). Подробное описание этого алгоритма приведено в [5, 6].

Несмотря на свои заметные преимущества перед традиционными методами регрессионного анализа, этот алгоритм обладает рядом недостатков. В частности, для его реализации необходима некоторая выборка предварительных пространственно-временных наблюдений, а для расчета весовых коэффициентов в уравнении оптимальной экстраполяции [3] требуются также пространственные корреляционные функции, полученные по данным многолетних измерений.

В связи с этим в настоящей статье предлагается оригинальный динамико-стохастический алгоритм решения задачи пространственной экстраполяции метеорологических полей в области мезомасштаба. Он бази-

руется на использовании процедуры комплексирования модифицированного метода группового учета аргументов с методом калмановской фильтрации и лишен недостатков, свойственных комплексу ММГУА с методом оптимальной экстраполяции.

Важной особенностью предлагаемого комплексного алгоритма является то, что он позволяет проводить пространственную экстраполяцию мезометеорологических полей не только в моменты поступления измерений, но и на интервале наблюдений, т.е. в промежутках между стандартными (синоптическими) сроками. Другой особенностью алгоритма является различная схема его реализации в зависимости от числа наблюдений. При числе наблюдений $K < h + 1$ (где h – число взятых высотных уровней, включая приземный) процедура пространственной экстраполяции осуществляется на основе только одного метода калмановской фильтрации, базирующегося на использовании упрощенной динамико-стохастической модели. При числе наблюдений $K \geq h + 1$ экстраполяция проводится по следующему алгоритму:

- на первом этапе с помощью метода калмановской фильтрации осуществляется экстраполяция приземных значений требуемой метеорологической величины в заданную точку пространства по данным измерений окружающих станций;

- на втором этапе с помощью ММГУА и данных аэрологических наблюдений ближайшей (к точке прогноза) станции с общим объемом $K = h$ в заданный момент времени в точке прогноза проводится восстановление этой метеовеличины на требуемых высотных уровнях атмосферы.

Ниже приводится описание предложенного алгоритма и рассмотрены результаты оценки его качества по данным многолетних аэрологических наблюдений локальной сети станций.

1. Постановка задачи и описание алгоритмов ее решения

Задача пространственной экстраполяции централизованного метеорологического поля ξ заключается в оценке его значений в точке пространства с координатами (x_n, y_n, z_n) , где измерения отсутствуют, на основе данных наблюдений ξ_i в точках с координатами (x_i, y_i, z_i) ($i = 1, 2, \dots, n - 1$) и некоторой математической модели, описывающей изменения поля ξ в пространстве и времени. Предлагаемый комплексный алгоритм предполагает одновременное использование ММГУА и метода калмановской фильтрации, отличающихся видом пространственно-временных моделей и процедурой расчетов. Кратко рассмотрим основные особенности используемых алгоритмов.

а) Модифицированный метод группового учета аргументов

Модифицированный метод группового учета аргументов, согласно [5, 6], является методом струк-

турно-параметрической идентификации, который позволяет на основе ограниченной по объему априорной информации синтезировать прогнозирующие модели в условиях частичной или полной неопределенности наших знаний о структуре моделируемого процесса и свойствах шумов в исходных данных. В алгоритме ММГУА в качестве базисных функций берутся разностные динамико-стохастические модели:

$$\xi_{h,K+1} = \sum_{\tau=1}^{K^*} A_{h,\tau} \xi_{h,K+1-\tau} + \sum_{j=0}^{h-1} B_{h,j} \xi_{j,K+1} + \varepsilon_{h,K+1}, \quad (1)$$

$$h = h^* + 1, h^* + 2, \dots, h_{\max}$$

(здесь K^* – порядок запаздывания по времени ($K^* < [K - h - 1]/2$); $A_{h,1}, \dots, A_{h,K^*}$ и $B_{h,0}, \dots, B_{h,h-1}$ – неизвестные параметры модели; $\varepsilon_{h,K+1}$ – невязка модели), а в качестве исходных данных – пространственно-временные наблюдения за значениями централизованного поля ξ в точках i вида

$$\{\xi_{h,k}, h = 0, 1, \dots, h_{\max}, k = 1, \dots, K\}, \quad (2)$$

$$\{\xi_{h,k}, h = 0, 1, \dots, h^* \leq h_{\max}, k = K+1\}.$$

В выражениях (1) и (2) h – высота; h^* – высота верхнего уровня измерений в момент времени $K + 1$; h_{\max} – максимальная высота наблюдений до момента времени K ; k – текущее время наблюдений; K – длина выборки.

Следует отметить, что первое слагаемое в правой части уравнения (1) отражает связь между наблюдениями на высоте h в момент $K + 1$ и в предыдущие моменты времени, которая возникает вследствие ненулевого радиуса корреляции временной корреляционной функции для мезомасштабных атмосферных процессов. Второе слагаемое отражает корреляционную связь между высотными уровнями в момент времени $K + 1$, которая возникает из-за процессов турбулентного перемешивания и упорядоченных вертикальных движений.

Для определения наилучшей прогнозирующей модели вида (1) и успешного на ее основе прогноза (восстановления) вертикальной структуры поля ξ в точке i используются все исходные пространственно-временные наблюдения (2). Эти наблюдения предварительно разбиваются на две отдельные выборки: на обучающую выборку a_1 (она содержит все наблюдения до момента времени $k = K - 1$ включительно) и контрольную выборку a_2 , содержащую наблюдения только в момент времени $k = K$. Кроме того, с той же целью (т.е. для нахождения наилучшей прогнозирующей модели) используются два специальных метода.

1) Метод направленного группового перебора для оптимизации структуры модели с двухэтапной селекцией моделей, осуществляемой с помощью таких критериев селекции, как:

- финальная ошибка прогнозирования (Х. Акаике [7])

$$FRE = \frac{(K - K^* - 1) + s}{(K - K^* - 1) - s} RSS(s), \quad (3)$$

где $RSS(s) = \sum_{j=1}^{K-K^*-1} [\xi_{h,K-j} - \hat{\xi}_{h,K-j}(s)]^2$ – остаточная

сумма квадратов для текущей модели $\hat{\xi}_{h,K-j}(s)$, содержащей s ненулевых оценок параметров;

– среднеквадратическая ошибка прогноза на контрольной выборке, т.е. выборке a_2 :

$$|\xi_{h,K} - \hat{\xi}_{h,K}(s)|^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где минимум берется по всем K^*+h структурам, каждой из которых соответствует своя модель $\hat{\xi}_{h,K}(s)$.

2) Метод минимаксного оценивания (ММО) [8], используемый для получения оценок параметров прогнозирующей модели $\hat{\Theta}$, которая позволяет гарантировать качество соответствующего прогноза, оцениваемое с помощью выражения

$$\mathbf{M}|\mathbf{M}(\xi_{h,K+1}) - \hat{\xi}_{h,K+1}|^2 \leq \delta_{h,K+1} \quad (5)$$

$(h = h^* + 1, \dots, h_{\max}),$

где $\mathbf{M}(\bullet)$ – оператор математического ожидания, производящий осреднение по всевозможным реализациям ошибок наблюдений; $\hat{\xi}_{h,K+1}$ и $\delta_{h,K+1}$ – минимаксные оценки, зависящие от дисперсии ошибок наблюдений и от априорной информации о максимально допустимых погрешностях прогноза.

б) Метод фильтрации Калмана

Данный метод относится к методам теории марковской оптимальной фильтрации [10] и обеспечивает оценку искомым переменных с минимальной среднеквадратической ошибкой на каждом шаге оценивания. Для постановки задачи пространственного прогноза в терминах фильтра Калмана изменяющиеся в пространстве и времени метеорологические величины были представлены в виде следующей динамической системы [9]:

$$\begin{cases} X_1(k+1) = X_n(k)(1 - \beta \Delta r_{n1})(1 - \alpha \Delta t) + \omega_1(k); \\ X_2(k+1) = X_n(k)(1 - \beta \Delta r_{n2})(1 - \alpha \Delta t) + \omega_2(k); \\ \dots \\ X_{n-1}(k+1) = X_n(k)(1 - \beta \Delta r_{n,n-1})(1 - \alpha \Delta t) + \omega_{n-1}(k); \\ X_n(k+1) = X_n(k)(1 - \alpha \Delta t) + \omega_n(k), \end{cases} \quad (6)$$

где

$$|X_1(k+1), X_2(k+1), X_3(k+1), \dots, X_n(k+1)|^T = \mathbf{X}(k+1)$$

– вектор состояния, элементами которого являются значения однородного централизованного поля ξ в точках с координатами x_i и y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) в момент времени $k+1$ (причем $X_n(k+1)$ – значение метеовеличины в точке (x_n, y_n) , недоступной для измерений);

Δr_{ni} – расстояние между прогнозируемой точкой n с координатами (x_n, y_n) и точками измерений $i = 1, 2, \dots, n-1$; Δt – интервал дискретизации по времени; $k = 0, 1, 2, \dots, K$ – текущее время с интервалом дискретизации Δt ($t_k = k\Delta t$);

$$\mathbf{\Omega}(k) = |\omega_1(k), \omega_2(k), \omega_3(k), \dots, \omega_n(k)|^T$$

– вектор-столбец шумов состояния.

Система разностных уравнений (6) задана в предположении, что временные и пространственные корреляционные функции искомого метеопараметра ξ в области мезомасштаба могут быть аппроксимированы (с малой погрешностью) экспоненциальными выражениями:

$$\mu_\xi(\tau) = \exp(-\alpha\tau); \quad (7)$$

$$\mu_\xi(\rho) = \exp(-\beta\rho), \quad (8)$$

где $\alpha = 1/\tau_0$ – коэффициент, обратно пропорциональный радиусу временной корреляции τ_0 ; $\beta = 1/\rho_0$ – коэффициент, обратно пропорциональный радиусу пространственной корреляции ρ_0 .

Кроме того, специфика мезомасштаба позволяет применить метод расщепления и осуществить оценку (прогноз) метеорологических величин на фиксированном высотном уровне, без учета взаимозависимости между соседними уровнями. Таким образом, для каждого высотного диапазона должен использоваться свой фильтр Калмана, причем каждый фильтр будет обрабатывать измерения, полученные для заданного высотного уровня на всех аэрологических станциях заданного мезомасштабного полигона. Совокупность этих измерений, полученных синхронно в момент времени k , описывается системой уравнений наблюдений вида

$$\begin{cases} Y_1(k) = X_1(k) + \varepsilon_1(k); \\ Y_2(k) = X_2(k) + \varepsilon_2(k); \\ \dots \\ Y_{n-1}(k) = X_{n-1}(k) + \varepsilon_{n-1}(k), \end{cases} \quad (9)$$

где $Y_i(k) = \xi_i(k) - \bar{\xi}(k)$ – централизованное значение поля в i -й точке (здесь $\xi_i(k)$ и $\bar{\xi}(k)$ – соответственно измеренное в i -й точке и среднее полигонное значение метеовеличины на уровне h в момент времени k), а $\varepsilon_i(k)$ – ошибки измерений ($i = 1, 2, \dots, n-1$).

На основе уравнений (6), (9) и аппарата калмановской фильтрации осуществляется синтез алгоритма оценивания вектора состояний $\mathbf{X}(k+1)$ (подробнее см. [9, 10]).

В общем виде работа комплексного алгоритма оценивания описана во введении. Следует особо подчеркнуть, что при его разработке были использованы основные преимущества рассмотренных выше методов. Как ранее отмечалось, задача пространственного прогноза решается в два этапа. На первом этапе методом фильтрации Калмана по совокупности измерений, полученных на всех $(n-1)$ аэрологических станциях, осуществлялся прогноз централизованного значения метеовеличины в горизонтальной плоскости

в точку с заданными координатами (x_n, y_n) на уровне земли. На втором этапе с помощью ММГУА на основе наилучшей модели для точки i (ближайшей к точке прогноза) и прогностического значения метеовеличины на уровне земли (полученного на первом этапе) выполняется восстановление всего высотного профиля. Окончательно восстановление завершается добавлением среднего полигонного значения $\bar{\xi}(k)$ на том же уровне h к полученным центрированным значениям метеопараметра.

Отметим, что для корректной работы ММГУА необходимо, чтобы объем измерений (число измеренных высотных профилей) превышал число высотных уровней [6]. Поэтому пока число измерений $K < h + 1$ пространственный прогноз осуществляется с помощью фильтров Калмана, реализованных для каждого высотного уровня. А далее, при $K \geq h + 1$, используется комплексный алгоритм, описанный выше.

Блок-схема алгоритма оценивания представлена на рис. 1. Рассмотрим работу входящих в алгоритм блоков.

Блок 1 – обеспечивает ввод данных о числе станций $n - 1$, проводящих аэрологические измерения; о числе требуемых вертикальных профилей (т.е. числе наблюдений) K и количестве высотных уровней h , а также задает координаты точки (или точек) прогноза (x_n, y_n) .

Блок 2 – обеспечивает задание прямоугольных координат станций (x_i, y_i) , где проводятся измерения (если их нет, то для получения прямоугольных координат предварительно осуществляется перевод географических в прямоугольные координаты), даты и срока прогноза, а также числа измеренных высотных профилей K .

Блок 3 – обеспечивает проверку условия $K \leq h + 1$ (выполнение условия $K = h + 1$ разрешает работу алгоритма ММГУА в комплексе с фильтром Калмана).

Если $K < h + 1$, то реализуется только процедура фильтрации Калмана, с помощью которой осуществляется прогноз как приземных значений температуры T_0 , зонального U_0 и меридионального V_0 ветра, так и их средних в слое значений, т.е. $\langle T \rangle_{h_0, h}$, $\langle U \rangle_{h_0, h}$ и $\langle V \rangle_{h_0, h}$ (в дальнейшем для простоты записи индекс h_0, h при символе $\langle \bullet \rangle$ опускается).

Блок 4 – обеспечивает ввод массива, включающего данные о приземной (T_0) и средней ($\langle T \rangle_{h_0, h}$) температуре, приземном и среднем зональном (U , $\langle U \rangle_{h_0, h}$) и меридиональном (V , $\langle V \rangle_{h_0, h}$) ветре в i -х точках, где проводились измерения, а также расчет средних полигонных значений ($\bar{\xi}$) и стандартных отклонений (σ_ξ) для выбранного мезометеорологического полигона.

Блоки 5–6–7 – обеспечивают организацию циклов для перебора заданных точек прогноза $n \leq J$, высотных уровней (слоев) $h \leq K$ и станций $i \leq n - 1$.

Блок 8 – обеспечивает расчет расстояний Δr_{ni} от заданной точки прогноза n до i -х точек, где проводились измерения метеорологических величин T, U, V и $\langle T \rangle$, $\langle U \rangle$ и $\langle V \rangle$, для чего используется соотношение

$$\Delta r_{ni} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (10)$$

Блок 9 – обеспечивает расчет отклонений измеренного значения T_0, U, V и $\langle T \rangle, \langle U \rangle, \langle V \rangle$ от нормы (среднего полигонного), т.е. осуществляет расчет по выражению (11).

Блок 10 – обеспечивает повторение циклов расчета для используемых станций $i = i + 1$.

Блок 11 – обеспечивает расчет искомым значений $T_0, \langle T \rangle, U_0, \langle U \rangle$ и $V_0, \langle V \rangle$ в точке с координатами (x_n, y_n) с использованием алгоритма фильтрации Калмана и средних полигонных норм, для чего берет формула

$$\xi_n = \bar{\xi} + \hat{\xi}_n, \quad (11)$$

где $\hat{\xi}_j$ – оценка (прогноз) центрированного значения метеорологической величины.

Блок 12 – обеспечивает определение номера высотного уровня $h = h + 1$.

Блок 13 – обеспечивает определение номера требуемой точки прогноза $n = n + 1$.

Блок 14 – обеспечивает вывод результатов пространственного прогноза (искомых значений $T_0, \langle T \rangle, U_0, \langle U \rangle, V_0, \langle V \rangle$).

Блок 15 – обеспечивает при $K = h + 1$, т.е. при условии работы алгоритма ММГУА, ввод массива исходных данных приземной и средней в слое температуры ($T_0, \langle T \rangle$), приземного и среднего в слое зонального ($U_0, \langle U \rangle$) и меридионального ($V_0, \langle V \rangle$) ветра в i -х точках, а также расчет средних полигонных значений (норм) $\bar{\xi}$ и стандартных отклонений σ_ξ для выбранного мезомасштабного полигона.

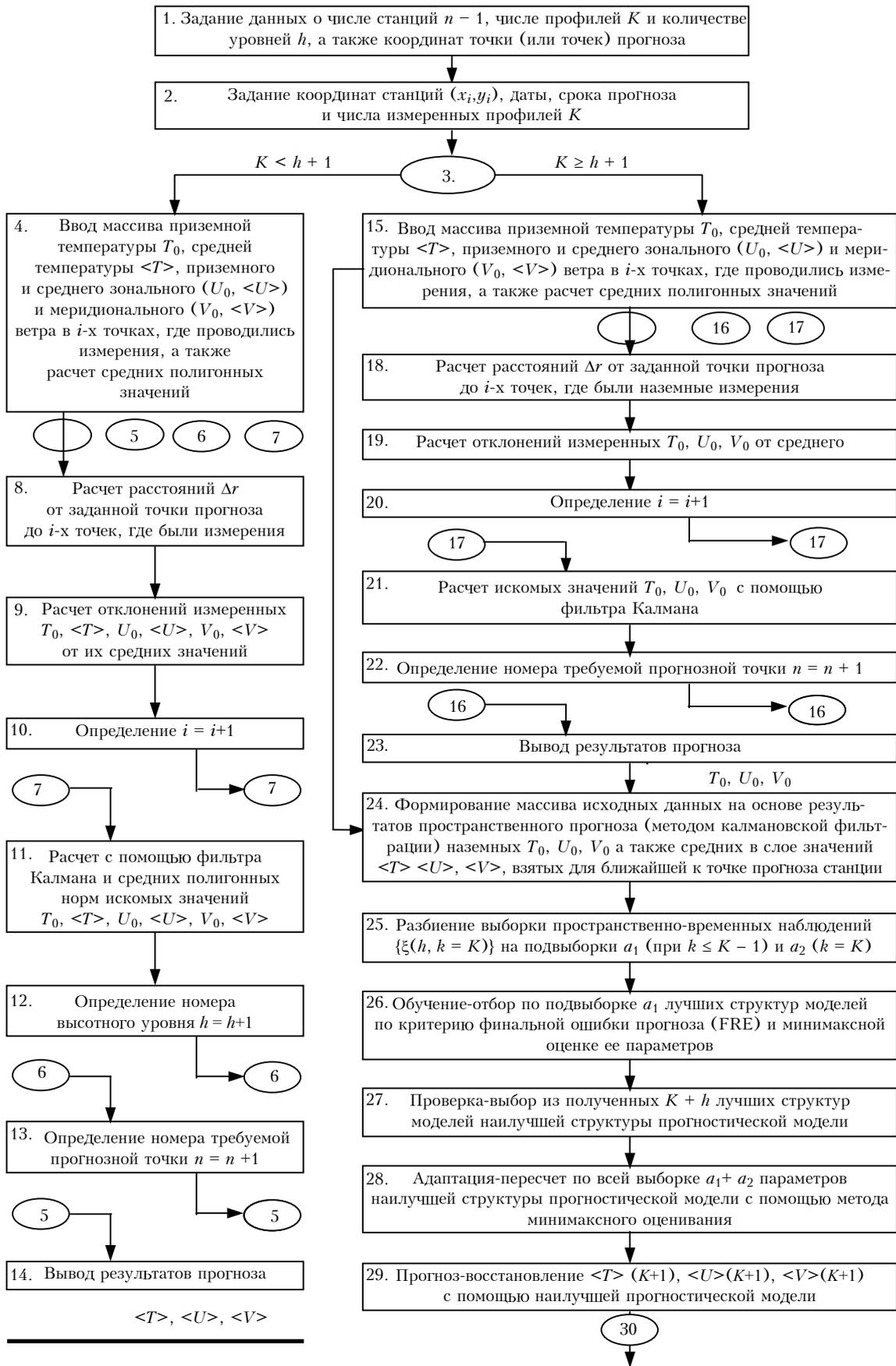
Блоки 16–20 – соответствуют блокам 5–10, но только применительно к расчету наземных значений T_0, U_0, V_0 .

Блок 21 – обеспечивает расчет искомым значений центрированных полей приземной температуры T_0 , приземного зонального U_0 и меридионального V_0 ветра в точке с координатами x_n, y_n с использованием фильтра Калмана.

Блок 22 – обеспечивает определение номера требуемой точки прогноза $n = n + 1$.

Блок 23 – обеспечивает вывод результатов пространственного прогноза приземных центрированных значений температуры, зонального и меридионального ветра (T_0, U_0, V_0), проведенного методом фильтрации Калмана.

Блок 24 – обеспечивает формирование выборок пространственно-временных наблюдений на основе результатов пространственного прогноза приземной температуры (T_0), приземного зонального (U_0) и меридионального (V_0) ветра, осуществленного методом фильтрации Калмана, а также массива с данными средней температуры $\langle T \rangle$, среднего зонального $\langle U \rangle$ и меридионального $\langle V \rangle$ ветра, взятых за предшествующие (прогнозу) сроки для ближайшей (к искомой прогнозной точке x_n, y_n) i -й точки (станции).



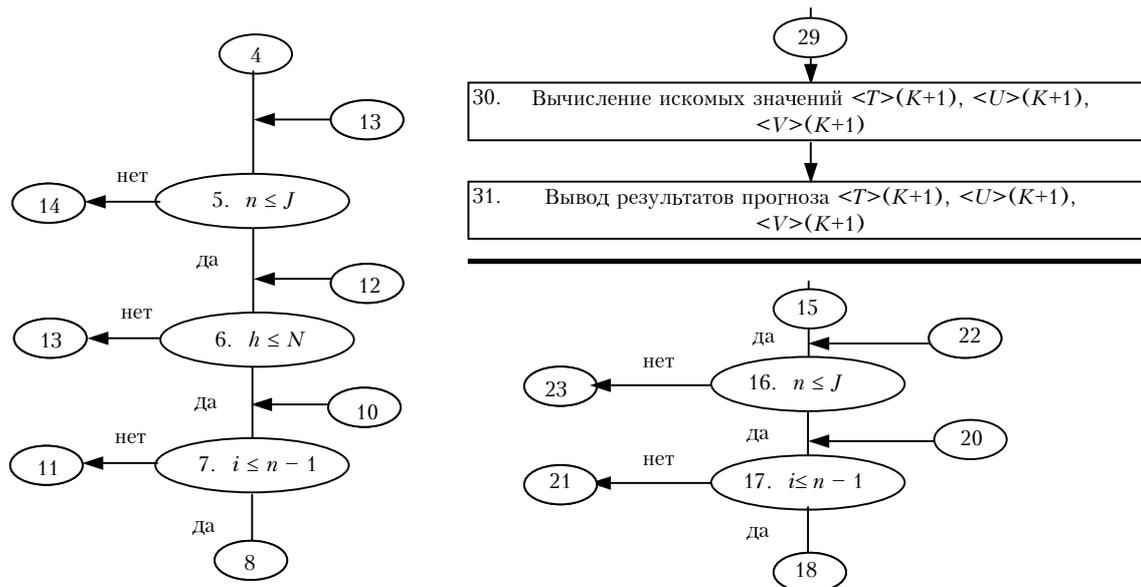


Рис. 1. Блок-схема пространственного прогноза по комплексной методике с использованием фильтра Калмана и ММГУА

Блок 25 – обеспечивает разбиение выборки пространственно-временных наблюдений $\{\xi(h, k = K)\}$ на две подвыборки: a_1 (при $k \leq K - 1$) и a_2 (при $k = K$).

Блок 26 – обеспечивает обучение-отбор по подвыборке a_1 лучших структур прогнозирующих моделей ММГУА по критерию финальной ошибки прогноза (FRE) и с помощью минимаксной оценки ее параметров.

Блок 27 – обеспечивает по подвыборке a_2 проверку-выбор наилучшей структуры прогнозирующей модели ММГУА.

Блок 28 – обеспечивает адаптацию-пересчет по всей выборке $a_1 + a_2$ параметров наилучшей структуры прогнозирующей модели с помощью метода минимаксного оценивания.

Блок 29 – обуславливает прогноз-восстановление с помощью наилучшей прогностической модели ММГУА значений $\langle T \rangle (K + 1)$, $\langle U \rangle (K + 1)$ и $\langle V \rangle (K + 1)$ в точке пространства с координатами (x_n, y_n) .

Блок 30 – обуславливает вычисление с помощью выражения

$$\xi(h^* < h \leq h_{\max}, K + 1) = \bar{\xi}(h^* < h \leq h_{\max}) + \hat{\xi}(h^* < h \leq h_{\max}, K + 1) \quad (12)$$

(здесь $\bar{\xi}(h^* < h \leq h_{\max})$ – средний профиль среднепоислойных значений метеовеличины; $\hat{\xi}(h^* < h \leq h_{\max}, K + 1)$ – профиль случайных отклонений той же метеовеличины, рассчитанных с помощью наилучшей прогностической модели ММГУА на момент времени $k = K + 1$ искомого профиля заданной метеорологической величины, включающего значения приземной (T_0) и средней температуры $\langle T \rangle$, приземного и среднего зонального U_0 , $\langle U \rangle$ и меридионального V_0 , $\langle V \rangle$ ветра, для точки с координатами (x_n, y_n)).

Блок 31 – обеспечивает вывод спрогнозированных значений $\langle T \rangle (K + 1)$, $\langle U \rangle (K + 1)$ и $\langle V \rangle (K + 1)$.

2. Оценка точности алгоритма пространственного прогноза

Для оценки качества комплексного алгоритма при его использовании в задаче пространственного прогноза мезомасштабных полей температуры и ветра были использованы пятилетние двухсрочные (0 и 12 ч по Гринвичу) наблюдения 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.), представляющих типичный мезометеорологический полигон. При этом в качестве контрольной станции, куда осуществляется пространственный прогноз, была использована станция Варшава, расположенная на расстоянии 185 км от ближайшей станции Брест, имеющей данные аэрологических наблюдений.

Поскольку пространственный прогноз рассматривается нами применительно к оценке распространения облака загрязнения, то, согласно [11], были взяты не сами измерения температуры и ветра на отдельных атмосферных уровнях, а их средние в слое значения, определяемые из выражения

$$\langle \xi \rangle_{h_0, h} = \frac{1}{h - h_0} \int_{h_0}^h \xi(z) dz, \quad (13)$$

где символ $\langle \bullet \rangle$ обозначает процедуру осреднения по вертикали в некотором слое атмосферы $\Delta H = h - h_0$ (здесь h_0 и h – высота нижней и верхней границ слоя, причем h_0 соответствует уровню земной поверхности); ξ – значение метеорологической величины.

На рис. 2 приведены результаты исследований экстраполяции полей средних в слое значений

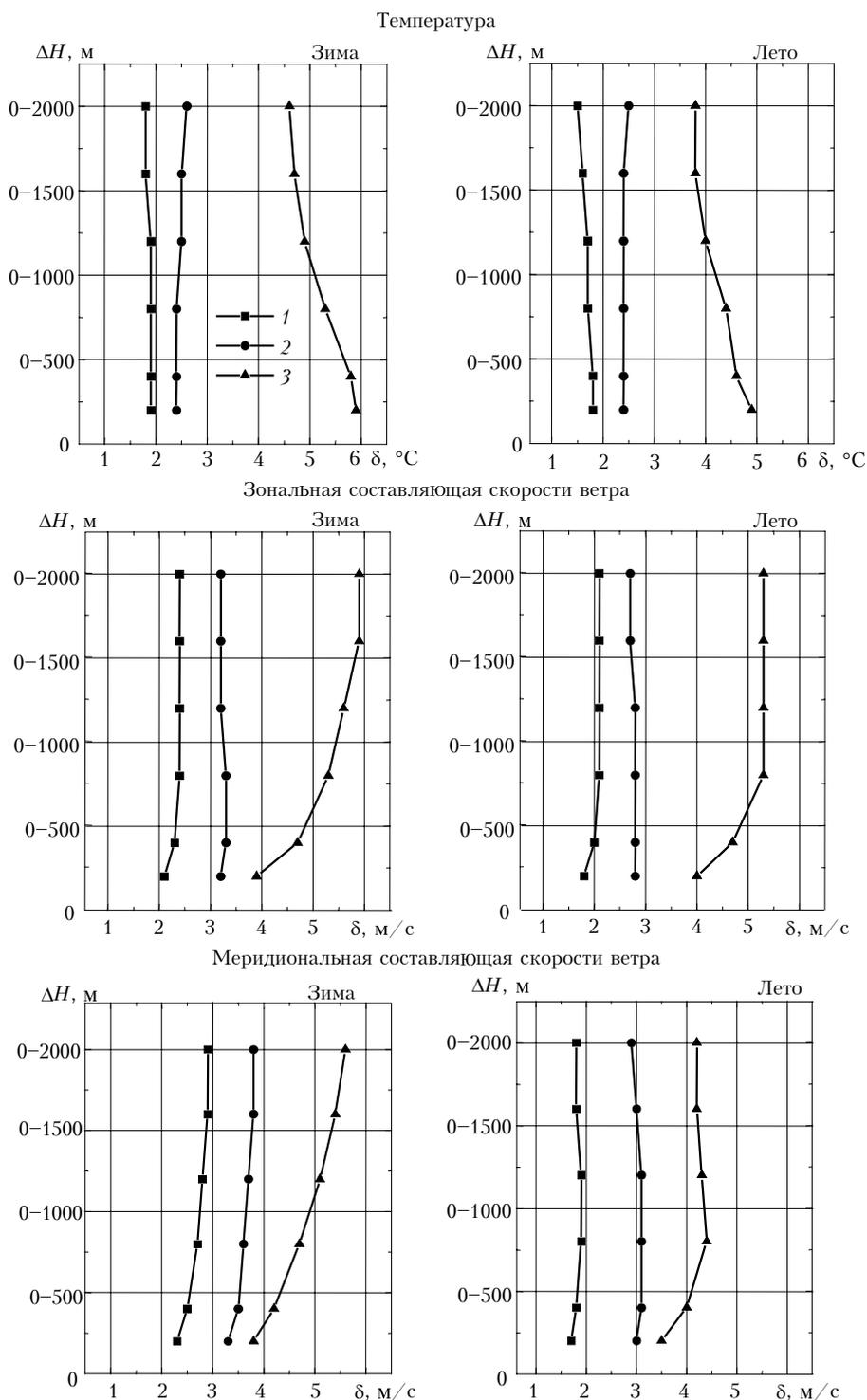


Рис. 2. Зависимости от высоты средневладратических погрешностей экстраполяции средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра до расстояния 185 км, проведенной на основе комплексного алгоритма (1) и метода оптимальной экстраполяции (2), а также соответствующие стандартные отклонения (3)

температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра. Зависимости построены для комплексного алгоритма и метода оптимальной экстраполяции. Из графиков следует, что комплексный алгоритм обеспечивает выигрыш в точности при сравнении с методом оптимальной экстраполяции. Так, например, независимо от сезона, слоя атмо-

сферы и метеовеличины значения средневладратических погрешностей пространственного прогноза δ в 1,3–1,8 раза меньше тех же погрешностей, полученных при применении метода оптимальной экстраполяции.

К тому же следует добавить, что предложенный комплексный динамико-стохастический алгоритм име-

ет и другие заметные преимущества перед методом оптимальной экстраполяции, а именно:

– пространственный прогноз полей метеорологических величин в области мезомасштаба осуществляется в реальном масштабе времени (в темпе поступления данных оперативных наблюдений), т.е. без привлечения архивной информации;

– в промежутке между моментами поступления фактических измерений (т.е. на интервалах времени, меньших, чем интервал между синоптическими сроками) возможно провести пространственный прогноз за счет решения разностных (дифференциальных) уравнений состояния с более мелким шагом дискретизации;

– в комплексном алгоритме возможна адаптация к неизвестным параметрам динамической модели (например, к заданным интервалам временной и пространственной корреляции).

Все это позволяет сделать общий вывод о том, что комплексный алгоритм, основанный на использовании процедуры комплексирования метода калмановской фильтрации с ММГУА, является достаточно эффективным и может быть с успехом применен в задачах численной оценки пространственного распространения техногенных загрязняющих веществ в пределах ограниченной территории.

1. 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.

Yu.B. Popov, V.I. Akselevich, A.V. Kreminskiy, V.V. Kurushev, A.V. Lavrinenko, N.Ya. Lomakina.
Combined algorithm for spatiotemporal extrapolation of mesometeorological fields in problems of atmospheric-ecological monitoring of local territories.

An original technique and algorithm for spatiotemporal extrapolation of mesometeorological fields based on the procedure of optimal complexation of the modified method of clustering of arguments and the Kalman filtering method are considered. The results of experimental study of the combined algorithm are discussed for the case of its application to the problem of spatial interpolation of the temperature and wind fields to a territory not covered by observations.

2. Комаров В.С., Солдатенко С.А., Соболевский О.М. Гидродинамический мезомасштабный прогноз облачности и аэрозольных образований // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 440–445.
3. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 359 с.
4. Гордин В.А. Математические задачи гидрометеорологического прогноза погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 264 с.
5. Комаров В.С., Креминский А.В. Оптимальное комплексирование альтернативных методов пространственного прогноза в задачах атмосферно-экологического мониторинга. Часть 1. Методология и алгоритмы // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 941–957.
6. Комаров В.С. Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. Томск: Изд-во «Спектр» СО РАН, 1997. 256 с.
7. Акаике Х. Развитие статистических методов // Современные методы идентификации систем. М.: Мир, 1983. С. 148–176.
8. Кочерга Ю.Л. Минимаксное оценивание случайных параметров линейной регрессии при эллипсоидальных ограничениях // Автоматика. 1991. № 2. С. 65–71.
9. Комаров В.С., Попов Ю.Б. Оценивание и прогнозирование параметров состояния атмосферы с помощью алгоритма фильтра Калмана. Часть 1. Методические основы // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 4. С. 255–259.
10. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана–Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.
11. Брюхань Ф.Ф. Методы климатической обработки и анализа аэрологической информации. М.: Гидрометеоиздат, 1983. 112 с.