

**В.С. Комаров, А.Я. Богусевич, С.Н. Ильин, А.В. Креминский,  
Ю.Б. Попов, А.И. Попова**

## **Автоматизированная метеорологическая система для оперативной обработки аэрологической информации, диагностики и прогноза параметров состояния атмосферы в области мезомасштаба.**

### **Часть 1. Описание структуры системы**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 10.12.2004 г.

Рассмотрены основные функции, структура и технические характеристики автоматизированной метеорологической системы, разработанной в Институте оптики атмосферы СО РАН и предназначенной для информационного обеспечения (прогностическими данными) решения различных прикладных задач.

#### **Введение**

Решение широкого круга прикладных задач, связанных с проведением мониторинга техногенных загрязнений в пределах ограниченных воздушных бассейнов (например, в пределах большого города или промышленной зоны), с обеспечением безопасности взлета и посадки воздушных судов, с повышением эффективности лидарного зондирования атмосферы в условиях сложной метеобстановки (туман, интенсивные осадки, низкая сплошная облачность и т.п.), требует не только разработки новых и надежных методов численной диагностики и прогноза метеорологических полей в области мезомасштаба, но и автоматизации всех звеньев получения, обработки и отображения аэрологической информации. Однако до сих пор эти проблемы не решены на должном уровне.

С учетом данных обстоятельств в Институте оптики атмосферы СО РАН в последние годы были проведены широкие исследования по разработке новых методов диагностики и прогноза метеорологических полей в области мезомасштаба и созданию автоматизированных метеорологических систем для информационной поддержки решения прикладных задач. Некоторые результаты подобных исследований обобщены в работах [1–4].

Здесь следует подчеркнуть, что к настоящему времени специалистами института разработан широкий комплекс новых методов пространственного и временного прогнозирования метеорологических полей в области мезомасштаба, базирующихся впервые на использовании малопараметрических моделей динамико-стохастического типа и аппарата калмановской фильтрации (см. обзор [4]). Тем не менее до сих пор проблема создания современной

автоматизированной системы, реализующей эти методы и алгоритмы, еще не решена.

Рассмотренная в [2, 3] первая версия такой системы, реализующей некоторые алгоритмы обработки данных и диагностики мезометеорологических полей, имела определенные ограничения и недостатки. В частности, эта система не рассчитана на ввод и обработку метеорологической информации, поступающей от сети аэрологических станций в виде стандартных бюллетеней КН-04. В качестве базового алгоритма для диагностики метеорологических полей в пределах мезомасштаба в ней использован недостаточно эффективный алгоритм, который основан на применении модифицированного метода группового учета аргументов (ММУГА), требующего для своей реализации наличия выборки определенного объема  $N = k + 1$  ( $k \geq 5$  — число взятых уровней) и обязательного комплексирования с методом оптимальной интерполяции (экстраполяции). Кроме того, в системе отсутствует модуль, обеспечивающий сверхкраткосрочный прогноз параметров состояния атмосферы.

В связи с этим на повестку дня встал вопрос о скорейшем создании такой автоматизированной метеорологической системы (АМС), которая не только бы обеспечила реализацию алгоритмов ввода и обработки пространственно-распределенной аэрологической информации и прогнозирования мезометеорологических полей в пространстве и времени, но и разрабатывалась бы на основе современных информационных технологий и эффективных программных средств.

В настоящей статье, являющейся обобщением результатов наших исследований, проведенных в 2001–2003 гг. по проблеме создания автоматизированной метеорологической системы, рассмотрены

основные структурные особенности, состав и технические характеристики этой системы.

## 1. Назначение и основные функции автоматизированной метеорологической системы

Автоматизированная метеорологическая система, разработанная в виде многофункционального и профессионально-ориентированного вычислительного комплекса, предназначена для решения таких функциональных задач, как:

- пространственная экстраполяция средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра (подобные параметры обычно используются в задачах прогноза атмосферных загрязнений и метеорологического обеспечения решения задач военной геофизики [4]) вдоль заданной траектории или на территорию, не освещенную данными наблюдений (на глубину до 250–300 км), осуществляемая по результатам оперативных измерений локальной сети аэрологических станций;

- объективный анализ мезометеорологических полей (а именно, полей геопотенциала, температуры, точки росы и ветра) в задаваемых районах, проводимый по данным локальной сети аэрологических станций с учетом возможного изменения размеров (в рамках мезомасштаба), ориентации (относительно линии «север–юг») и пространственного разрешения (шага) регулярной сетки точек;

- сверхкраткосрочный (с заблаговременностью до 6–12 ч) прогноз параметров состояния атмосферы (температуры и ветра), проводимый по данным измерений отдельных станций для заданного района.

Рассмотрим основные функции, которые реализует автоматизированная метеорологическая система, исходя из перечисленных выше функциональных задач. Воспользуемся с этой целью блок-схемой АМС, представленной на рис. 1.

Как видно из рис. 1, рассматриваемая система реализована в виде ряда модулей (подсистем), каждый из которых выполняет специфические функции. В число этих модулей входят:

- 1) подсистема обработки и преобразования входной информации;
- 2) подсистема пространственной экстраполяции метеорологических полей;
- 3) подсистема объективного анализа мезометеорологических полей;
- 4) подсистема сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы;
- 5) подсистема представления и визуализации результатов расчета;
- 6) интерфейс пользователя.

Работа всех перечисленных подсистем (1)–(5) осуществляется с помощью интерфейса пользователя (6). Он же осуществляет вывод результатов расчета на монитор, принтер, а также на жесткий диск, с которого предполагается в дальнейшем реализовать процедуру передачи полученных результатов по каналам связи потребителям прогностической информации.

## 2. Краткая характеристика подсистем АМС

Дадим краткую характеристику всем подсистемам автоматизированной метеорологической системы, о которых шла речь в разд. 1.

### 2.1. Подсистема обработки и преобразования входной информации

Подсистема обработки и преобразования входной информации является вспомогательным функциональным модулем программно-алгоритмического обеспечения автоматизированной метеорологической системы и предназначена:

- 1) для интерактивного ввода и дешифрирования аэрологической информации (т.е. данных

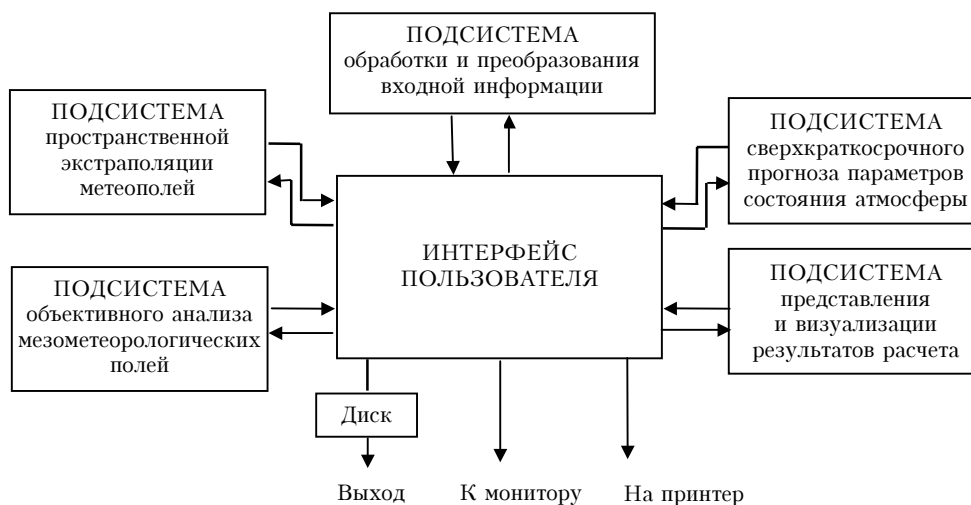


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной метеорологической системы

температурно-ветрового зондирования), поступающей в виде бюллетеней КН-04 [5]. Следует сразу же отметить, что обрабатывается не весь бюллетень, а лишь его две части:

– ТТАА, из которой берутся последовательно сведения о дате и сроке наблюдения (00 или 12 ч по Гринвичу), данные о синоптическом индексе аэрологической станции, результаты наблюдений за давлением  $p$  (гПа), температурой воздуха  $T$  (°C), дефицитом точки росы  $\Delta T_d$  (°C), направлением  $d$  (град) и скоростью  $U$  (м/с) ветра у поверхности земли, а также данные геопотенциала  $H$  (гпм), температуры, дефицита точки росы, направления и скорости ветра на стандартных изобарических поверхностях: 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 и 100 гПа;

– ТТВВ, содержащая сведения о месте и времени наблюдений и данные на уровнях особых точек в вертикальных профилях температуры или профилях ветра;

2) для выбора, преобразования и формирования аэрологической информации в требуемых видах и форматах, а также для ее записи в виде выходных файлов:

– типа  $G$ , содержащих данные геопотенциала, температуры, точки росы, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра на шести стандартных изобарических уровнях: 925, 850, 700, 500, 400 и 300 гПа;

– типа  $M$ , содержащих данные температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, приведенные к системе геометрических высот: 0 (уровень земной поверхности), 200, 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400, 3000, 4000, 5000, 6000 и 8000 м;

– типа  $S$ , включающих сведения о приземных и средних в слое значениях температуры и ортогональных составляющих скорости ветра, рассчитанных для следующих атмосферных слоев: 0–200, 0–400, 0–800, 0–1200, 0–1600, 0–2000, 0–2400, 0–3000, 0–4000, 0–5000, 0–6000 и 0–8000 м.

При этом все три файла  $G$ ,  $M$ ,  $S$ , наряду со смысловой информацией, содержат дополнительные сведения о синоптическом индексе станции, ее географических координатах и высоте над уровнем моря, а также о числе содержащихся в файле бюллетеней, поступивших от этой станции (оно составляет не более 62, что соответствует 1 мес).

Кроме того следует отметить, что при подготовке файлов типа  $M$  применяется процедура интерполяции значений температуры и ортогональных составляющих скорости ветра со стандартных изобарических поверхностей и уровней особых точек на сетку геометрических высот, осуществляемая на основе выражения

$$\xi(h_m) = \xi(h_r) + \frac{h_m - h_r}{h_{r+1} - h_r} [\xi(h_{r+1}) - \xi(h_r)], \quad (1)$$

где  $h_m$  – высота интерполяционного уровня;  $h_r$  – высота основных изобарических поверхностей и уровней особых точек;  $r$  – номер высотного уровня.

И наконец, при подготовке файлов типа  $S$  используется процедура расчета средних в слое значений температуры и ортогональных составляющих скорости ветра (эти параметры широко применяются в метеообеспечении войск, а также при прогнозе пространственного распространения загрязняющих веществ), приводимого, согласно [6], на основе выражения

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

которое, полагая, что  $h_0 = 0$  и  $h = h_s$ , и представляя интеграл в виде суммы, можно переписать в виде

$$\langle \xi \rangle_{h_s, h_0} = \sum_{i=1}^s \left\{ \left( \frac{\xi(h_{i-1}) + \xi(h_i)}{2} \right) \left( \frac{h_i - h_{i-1}}{h_s} \right) \right\}, \quad (3)$$

где  $\langle \bullet \rangle$  обозначает процедуру осреднения данных наблюдений в некотором слое атмосферы  $h_s - h_0$  (здесь  $h_0 = 0$  совпадает с уровнем земной поверхности,  $h_s$  – высота верхней границы  $s$ -го слоя атмосферы), а  $i = 1, 2, \dots, s$  – номер высотного уровня;

3) для поиска и восстановления отсутствующих данных, исходя из предположения, что в реальных условиях неизбежны ситуации, когда от станций температурно-ветрового зондирования поступают данные с грубыми ошибками (например, ошибки, связанные с вводом буквенных символов (вместо кодовой цифры) в кодовой пятизначной группе, с пропуском целиком кодовой группы и т.п.) или эти данные полностью отсутствуют. В подобных случаях возникает необходимость восстановления недостающей информации, поскольку без нее становится не совсем корректной последующая работа алгоритмов пространственного и временного прогнозирования, которые разработаны в предположении, что измерения для заданной конфигурации локальной измерительной сети и имеющейся периодичности наблюдений присутствуют всегда.

С учетом этого в подсистему обработки и преобразования входной информации был включен программный модуль, обеспечивающий численное восстановление недостающей информации. При этом в основу соответствующего алгоритма положены аппарат калмановской фильтрации и полиномиальная модель второго порядка с изменяющимися во времени коэффициентами полинома (их подробное описание дается в [7]).

Этот алгоритм реализует следующую последовательность действий:

– проверяются файлы типа  $G$  и  $M$  на наличие информации (бюллетеней) за последний срок измерений, т.е. определяется факт поступления данных от используемых станций;

– формируется (на основе анализа файлов типа  $G$  и  $M$ ) вспомогательная диагональная матрица  $J_0(k)$  (где  $k$  – время), причем ее размерность соответствует числу используемых станций ( $n \times n$ ). При отсутствии или низком качестве данных, поступающих от  $i$ -й станции ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), соответствующему

диагональному элементу  $\mathbf{J}_0(k)$  присваивается значение «0». Если же данные присутствуют и не несут грубых ошибок, то присваивается значение «1»;

– осуществляется группировка данных (для каждой метеорологической величины и изобарического (высотного) уровня) в вектор измерений  $\mathbf{Y}(k)$ , где

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{H}(k, x, y) \times \mathbf{X}(k) + \mathbf{E}(k). \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{H}(k, x, y)$  – переходная матрица измерений ( $x$  и  $y$  – координаты);  $\mathbf{X}(k)$  – вектор состояния в момент времени  $k$ ;  $\mathbf{E}(k)$  – вектор ошибок измерений;

– задаются (для инициации алгоритма фильтрации) начальные данные  $\hat{\mathbf{X}}(0)$ ,  $\mathbf{P}(0|0)$ ,  $\mathbf{R}_\alpha$ ,  $\mathbf{R}_E$ , где, согласно [7],  $\hat{\mathbf{X}}(0)$  – начальный вектор оценивания;  $\mathbf{P}(0|0)$  – начальная корреляционная матрица ошибок оценивания;  $\mathbf{R}_\alpha$  и  $\mathbf{R}_E$  – корреляционные матрицы шумов состояния и наблюдений, диагональными элементами которых являются соответственно известные значения дисперсий метеовеличины и среднеквадратические ошибки ее измерений (они могут быть заимствованы из [8]), а остальные элементы являются «нулями»;

– обрабатываются данные измерений  $\mathbf{Y}(k)$  с помощью адаптивного фильтра Калмана вида [7]:

$$\hat{\mathbf{X}}(k) = \hat{\mathbf{X}}(k|k-1) + \mathbf{J}_0(k) \cdot \mathbf{G}(k) \cdot [\mathbf{Y}(k) - \mathbf{H}(k, x, y) \cdot \mathbf{X}(k|k-1)] \quad (5)$$

(здесь  $\hat{\mathbf{X}}(k)$  – оценка вектора состояния на момент времени  $(k)$ ;  $\hat{\mathbf{X}}(k|k-1)$  – расчет вектора предсказанных оценок на момент времени  $k$  по данным на

шаге  $(k-1)$ ;  $\mathbf{G}(k)$  – матрица весовых коэффициентов). Для описания  $\mathbf{Y}_i(k)$  используется полиномиальная модель второго порядка с изменяющимися во времени коэффициентами

$$\mathbf{Y}_i(k) = \xi_i(k) = a_0(k) + a_1(k)x_i + a_2(k)y_i + a_3(k)x_i y_i + a_4(k)x_i^2 + a_5(k)y_i^2 + \epsilon(k),$$

где

$$[a_0(k), a_1(k), \dots, a_5(k)]^T = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_6(k)]^T = \mathbf{X}(k)$$

– вектор состояния динамической системы в  $k$ -й момент времени;  $\epsilon(k)$  – ошибка измерения;  $\Gamma$  – оператор транспонирования;

– осуществляется оценка векторов  $\hat{\mathbf{X}}(k)$  и матриц ковариаций ошибок оценивания  $\mathbf{P}(k|k)$  для всех изобарических (высотных) уровней и метеовеличин, которые сохраняются для рекуррентного использования в следующей итерации  $(k+1)$ ;

– восстанавливаются значения метеорологической величины  $\hat{\xi}_i$  по выражению:

$$\hat{\xi}_i(k) = \hat{X}_1(k) + \hat{X}_2(k)x_i + \hat{X}_3(k)y_i + \hat{X}_4(k)x_i y_i + \hat{X}_5(k)x_i^2 + \hat{X}_6(k)y_i^2, \quad (6)$$

где  $x_i, y_i$  – прямоугольные координаты  $i$ -х станций с утраченными данными;

– заносятся восстановленные данные в файлы  $G$  и  $M$  для соответствующих станций (вместо отсутствующей информации).

Общая блок-схема подсистемы обработки и преобразования аэрологической информации, поступающей в виде бюллетеней КН-04, представлена на рис. 2.

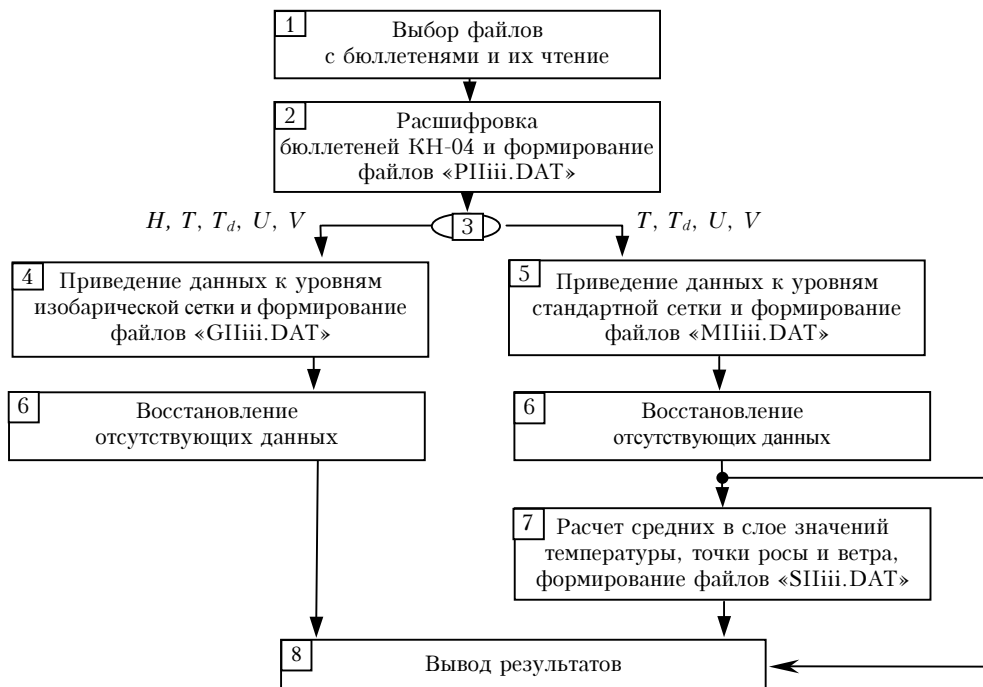


Рис. 2. Блок-схема подсистемы обработки и преобразования метеорологической информации

## 2.2. Подсистема пространственной экстраполяции метеорологических полей

Данная подсистема является одной из основных подсистем АМС и предназначена для пространственной экстраполяции средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра в заданную точку пространства с координатами  $(x_n, y_n)$  или вдоль траектории с заданным азимутом  $\alpha$  (град) и шагом экстраполяции  $\Delta l$  (км), проводимой по данным наблюдений локальной сети аэрологических станций, взятым в срок прогнозирования и за три предыдущих срока (в этом случае осуществляется полная настройка фильтра Калмана и обеспечивается наилучшее качество оценивания). Эта подсистема ориентирована на метеорологическую поддержку локального мониторинга техногенных загрязнений, обеспечение безопасности взлета и посадки воздушных судов и т.п.

Программно-алгоритмические средства этой подсистемы разработаны на базе оригинального динамико-стохастического алгоритма (он достаточно подробно описан в [4, 9]). Здесь же укажем лишь его главные особенности.

В качестве исходной прогностической модели взята малопараметрическая динамико-стохастическая модель, основанная на использовании уравнений состояния вида:

$$\left. \begin{aligned} X_i(k+1) &= X_n(k)[1 - X_{n+2}(k)\Delta\rho_{in}][1 - X_{n+1}(k)\Delta t] + \omega_i(k), \\ X_n(k+1) &= X_n(k)[1 - X_{n+1}(k)\Delta t] + \omega_n(k), \\ X_{n+1}(k+1) &= X_{n+1}(k) + \omega_{n+1}(k), \\ X_{n+2}(k+1) &= X_{n+2}(k) + \omega_{n+2}(k), \end{aligned} \right\} (7)$$

где  $X_i(k+1)$  и  $X_n(k)$  – значения поля  $\xi$  в  $i$ -й ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) и  $n$ -й точках, находящихся соответственно на освещенной и не освещенной метеорологической информацией территории, в  $(k+1)$ -й и  $k$ -й момент времени;

$$\Delta\rho_{in} = \left[ (x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 \right]^{1/2}$$

– расстояние от точки экстраполяции до каждой аэрологической станции;  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$  – интервал времени между последовательными измерениями;

$$X_{n+1} = X_{n+1}(t) = \alpha, \quad X_{n+2} = X_{n+2}(t) = \beta$$

– значения аппроксимирующих коэффициентов в выражениях:

$$\mu_\xi(\tau) = \exp(-\alpha\tau) \text{ и } \mu_\xi(\rho) = \exp(-\beta\rho)$$

(здесь  $\mu_\xi(\tau)$  и  $\mu_\xi(\rho)$  – временная и пространственная корреляционные функции;  $\tau$  – сдвиг во времени и  $\rho$  – расстояние), положенных в основу модели (7);  $\omega_i(k)$  и  $\omega_n(k)$  – случайные возмущения, учитывающие стохастический характер модели;  $\omega_{n+1}$  и  $\omega_{n+2}$  – случайные процессы типа «белого шума».

Наряду с уравнениями состояния вида (7) использовано также уравнение наблюдений

$$Y_i(k) = \xi_i(k) = X_i(k) + \varepsilon_i(k), \quad (8)$$

где  $Y_i(k) = \xi_i(k)$  – значение метеорологической величины в  $i$ -й точке (на  $i$ -й станции) в  $k$ -й момент времени;  $\varepsilon_i(k)$  – ошибки измерения в тот же момент времени.

В уравнении (8) в качестве  $\xi_i(k)$  используется центрированное значение, для расчета которого берется выражение:

$$\xi_i(k) = \xi_i^*(k) - \bar{\xi}(k), \quad (9)$$

где  $\xi_i^*(k)$  – измеренное значение метеорологической величины в  $i$ -й точке, а  $\bar{\xi}(k)$  – среднее полигонное значение той же метеорологической величины.

Уравнения (7) и (8) полностью определяют структуру алгоритма оценивания [10], причем в силу нелинейности уравнений (7) в качестве метода синтеза этого алгоритма взят расширенный фильтр Калмана. При записи уравнений (7) и (8) в матричной форме, т.е. в виде

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi[\mathbf{X}(k)] + \mathbf{\Omega}(k); \quad (10)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{H}\mathbf{X}(k) + \mathbf{E}(k) \quad (11)$$

(здесь  $\Phi[\mathbf{X}(k)]$  – переходная вектор-функция состояния;  $\mathbf{\Omega}(k)$  – вектор шумов состояния;  $\mathbf{H}$  – матрица наблюдений;  $\mathbf{E}(k)$  – вектор шумов наблюдений в  $k$ -момент времени), уравнение оптимального оценивания вектора состояния  $\hat{\mathbf{X}}(k+1)$  на момент времени  $k+1$  имеет вид [4, 9]:

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) + \mathbf{G}(\hat{\mathbf{X}}, k+1) \cdot [\mathbf{Y}(k+1) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k+1|k)], \quad (12)$$

где  $\hat{\mathbf{X}}(k+1|k)$  – вектор предсказанных оценок на момент времени  $(k+1)$  по данным на шаге  $k$ , причем  $\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \Phi(\hat{\mathbf{X}}(k))$ ;  $\mathbf{G}$  – матрица весовых коэффициентов.

Расчет весовых коэффициентов  $\mathbf{G}$  подробно описан в [4, 9], а окончательная оценка значений метеорологической величины  $\xi$  в точке экстраполяции ( $n$ ) осуществляется на основе выражения

$$\hat{\xi}_n(k) = \hat{Y}_n(k) = \hat{X}_n(k) + \bar{Y}(k). \quad (13)$$

Здесь  $\bar{Y}(k) = \bar{\xi}(k) = \sum_{i=1}^3 q_i \xi_i / \sum_{i=1}^3 q_i$  – средневзвешенное значение поля  $\xi$ , рассчитываемое по данным трех ближайших (к точке экстраполяции) станций с использованием весовых коэффициентов

$q_i = 1 - \left( \rho_{in} / \sum_{i=1}^3 \rho_{in} \right)$ , где  $\rho_{in} = \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2}$  – расстояние  $i$ -й станции от точки экстраполяции  $(x_n, y_n)$ .

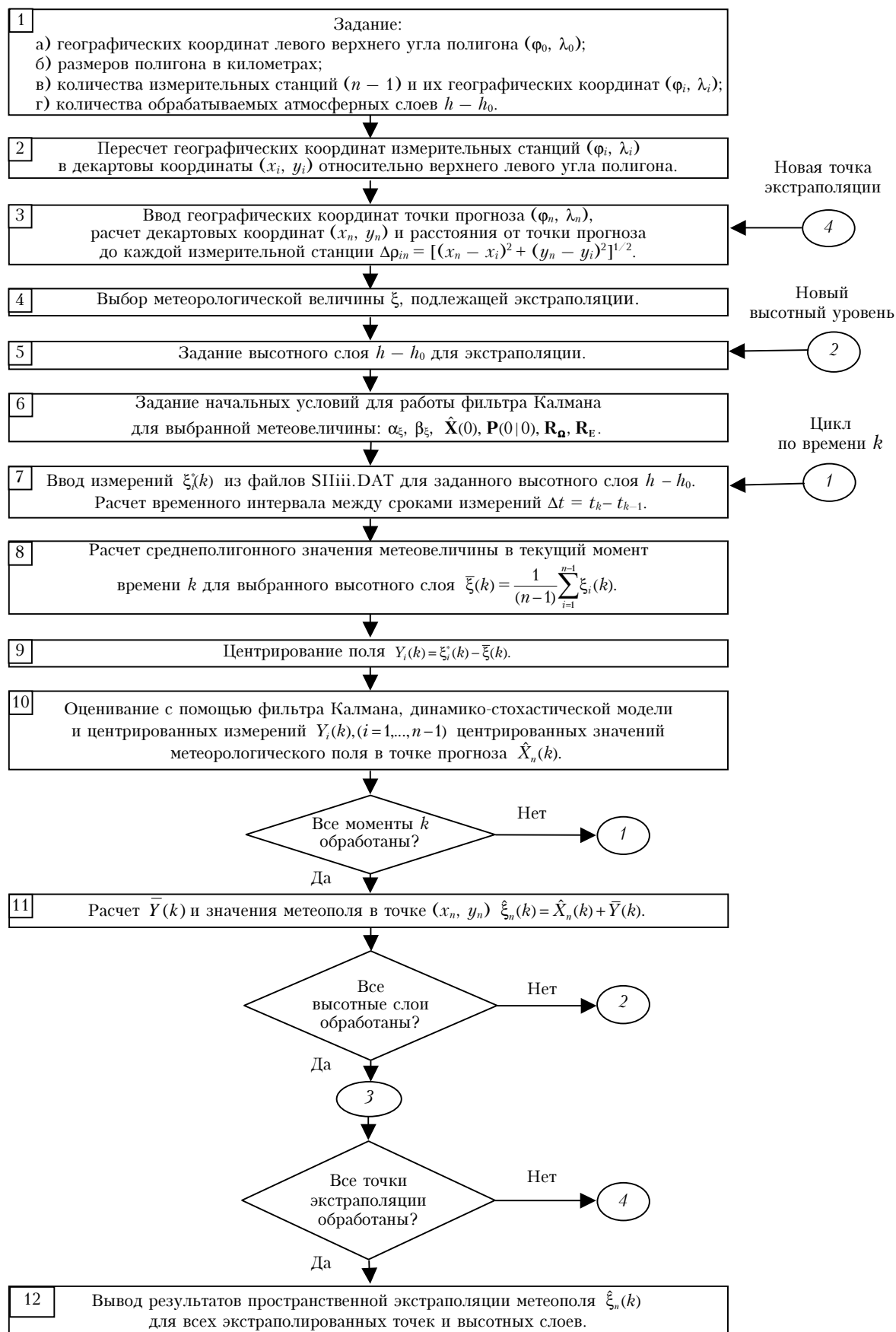


Рис. 3. Блок-схема подсистемы пространственной экстраполяции метеорологических полей

Общая блок-схема подсистемы пространственной экстраполяции метеорологических полей представлена на рис. 3.

### 2.3. Подсистема объективного анализа мезометеорологических полей

Данная подсистема является второй основной подсистемой АМС, где осуществляется объективный анализ (т.е. пространственная интерполяция в узлы регулярной сетки) мезометеорологических полей (в нашем случае полей геопотенциала, температуры, точки росы и ортогональных составляющих скорости ветра), проводимый для каждой взятой изобарической поверхности (см. подразд. 2.1) по данным измерений окружающих аэрологических станций и ориентированный на информационную поддержку процедуры локального прогноза погоды в задаваемых районах, разрабатываемого на основе уравнений мезометеорологии [11].

Поскольку объективный анализ мезометеорологических полей в рассматриваемой подсистеме осуществляется на основе того же алгоритма, который использован при пространственной экстраполяции, то он здесь не рассматривается (его описание дано в подразделе 2.2 и в [4, 7, 12]). Основным отличием объективного анализа от пространственной экстраполяции является то, что в нем оценка значений метеорологической величины проводится не для отдельной точки или траектории, а для узлов заданной регулярной сетки.

### 2.4. Подсистема сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы

Эта подсистема является третьей из основных подсистем АМС и предназначена для решения задачи сверхкраткосрочного (с заблаговременностью до 6–12 ч) прогноза приземных и средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, результаты которого необходимы, например, для информационной поддержки локального прогнозирования уровня техногенного загрязнения.

Программно-алгоритмическое обеспечение этой подсистемы разработано на базе оригинального динамико-стохастического алгоритма (см. [4, 13]), в основу которого положены аппарат калмановской фильтрации и малопараметрическая модель, определяемая системой линейных стохастических уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} X_1(k+1) &= X_1(k)[1 - X_2(k)\Delta t] + \omega_1(k), \\ X_2(k+1) &= X_2(k) + \omega_2(k), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где  $X_1(k)$  и  $X_1(k+1)$  – переменные состояния (в нашем случае соответствуют центрированным значениям метеорологической величины  $\xi^0$ ) в момент времени  $k$  и  $(k+1)$ , причем момент времени  $(k+1)$  соответствует моменту прогноза;  $X_2(k)$ ,  $X_2(k+1)$  – значения аппроксимирующего коэффициента  $\alpha$  в ис-

ходной автокорреляционной функции  $\mu(\tau) = \exp(-\alpha\tau)$  (здесь  $\alpha = 1/\tau_0$ ,  $\tau_0$  – радиус временной корреляции,  $\tau$  – период упреждения), взятой для вывода основного (первого) уравнения системы (14);  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  – интервал времени между последовательными измерениями;  $\omega_1(k)$ ,  $\omega_2(k)$  – случайные возмущения, учитывающие стохастический характер модели (процесс типа «белого шума»).

Наряду с уравнениями вида (14) в разработанном алгоритме используется также уравнение наблюдений:

$$Y(k) = \xi^0(k) = X_1(k) + \varepsilon(k). \quad (15)$$

В уравнении (15)  $Y(k) = \xi(k)$  – текущие центрированные измерения метеорологической величины в дискретный момент времени  $k$ ;  $\varepsilon(k)$  – ошибка измерения.

Уравнения (14) и (15), записанные в матричной форме, т.е. в виде

$$\left. \begin{aligned} X(k+1) &= \Phi(x, k) + \Omega(k), \\ Y(k) &= H(k) \cdot X(k) + E(k) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

(здесь  $\Phi$  – переходная вектор-функция состояний;  $H$  – переходная матрица наблюдений;  $\Omega(k)$  и  $E(k)$  – векторы шумов состояния и наблюдений соответственно), позволяют полностью определить структуру алгоритма оценивания [14]. Уравнение фильтрации для этого случая соответствует (12).

Поскольку в рассмотренном алгоритме поступающие измерения предварительно расщепляются на регулярную и центрированную (флуктуационную) компоненты и прогнозируется лишь флуктуационная составляющая, то выражение для прогноза метеорологической величины  $\xi$  имеет вид

$$\hat{\xi}(t_n|t_k) = \bar{\xi}(t_k) + \hat{\xi}^0(t_n|t_k) = \bar{\xi}(t_k) + [(1 - \hat{X}_2(k)\Delta t_n) \cdot \hat{X}_1(k)], \quad (17)$$

где  $\hat{\xi}(t_n|t_k)$  – прогностическое значение метеорологической величины  $\xi$  для момента  $t_n$ , полученное по данным, сформированным к моменту времени  $t_k$  ( $t_n > t_k$ );  $\bar{\xi}(t_k)$  – среднее во времени, рассчитанное к моменту последнего измерения  $t_k$ ;  $\hat{\xi}^0(t_n|t_k)$  – прогноз значения флуктуационной компоненты на момент времени  $t_n$ ;  $\hat{X}_1(k)$  – оценка величины  $\hat{\xi}^0(t_k)$ , полученная с помощью фильтра Калмана на шаге  $k$ ;  $\hat{X}_2(k)$  – оценка величины  $\alpha$  на шаге  $k$ ;  $\Delta t_n = (t_n - t_k)$  – глубина прогноза.

Общая блок-схема подсистемы сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы представлена на рис. 4.

### 2.5. Подсистема представления и визуализации результатов расчета

Подсистема представления и визуализации результатов расчета является второй вспомогательной подсистемой, обеспечивающей реализацию таких операций, как:

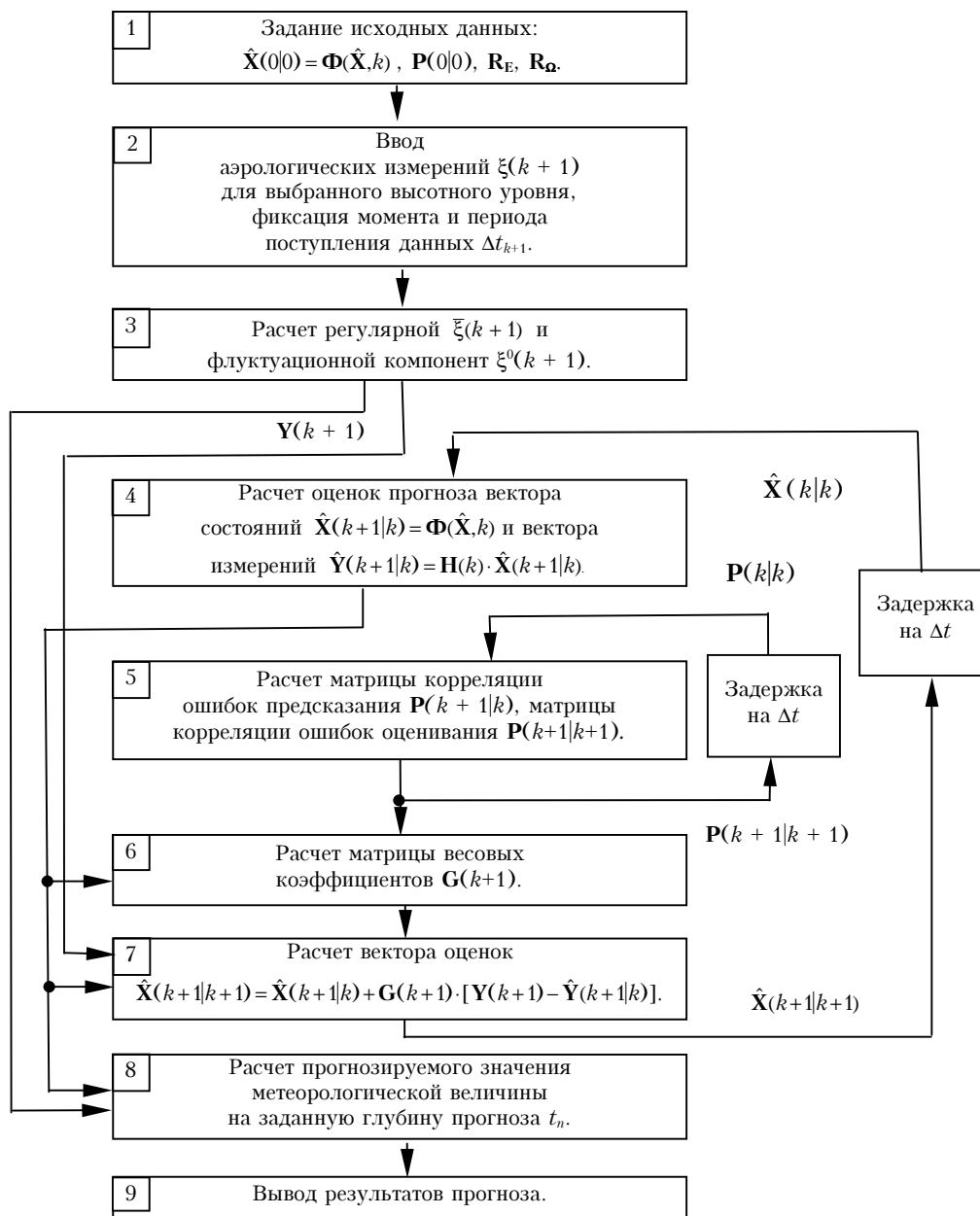


Рис. 4. Блок-схема подсистемы сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы

– представление результатов пространственной экстраполяции, объективного анализа и сверхкраткосрочного прогноза мезометеорологических полей в табличном и графическом виде;

– построение по данным объективного анализа мезометеорологических полей их картографических изображений в виде изолиний выбранной метеорологической величины (изолинии проводятся для геопотенциала – через 1 (0,5) дкм, для температуры и точки росы – через 1 (0,5) °С, для ортогональных составляющих скорости ветра – через 1 (0,5) м/с;

– вывод данных расчета на экран видеомонитора, файл или печать в табличном или графическом (картографическом) видах.

### 3. Программное обеспечение и технические характеристики автоматизированной метеорологической системы

При выборе базовых программных средств, используемых при разработке программного обеспечения для автоматизированной метеорологической системы, учитывалась возможность их интегрирования в операционной среде Windows. Вторым аспектом, который учитывался при подобном выборе, являлось требование наилучшей программной совместимости отдельных программных модулей при работе в общем программном пакете.



Для выполнения второго требования при разработке всех программных приложений, входящих в состав программного пакета АМС, было отдано предпочтение компании Borland Inc. При этом для разработки Windows приложения АМС было отдано предпочтение продукту Borland Inc — системе Delphi 6.0, которая относится к так называемым системам быстрой разработки приложений (Rapid Application Development — Rad). Эта система дает очень удобный интерфейс, органически соединяющийся с интерфейсом Windows. Программы Delphi, как правило, представляют собой единичный EXE-файл, который достаточно скопировать и запускать с Windows там, где это нужно.

Программное обеспечение АМС включает следующие компоненты:

1) AIROLOG.EXE — головное Windows-приложение, реализующее интерфейс пользователя АМС и интегрирующее остальные компоненты в единый программный пакет;

2) AIROLOG.HLP — файл справочной системы программного обеспечения, включающий инструкции для работы оператора с программой;

3) AIROLOG.CNT — файл содержания справки, включающий заголовки всей справочной информации;

NORHEM.TXT — файл, содержащий вспомогательную информацию о станциях северного полушария, включающую синоптические индексы, географические координаты (широту и долготу) и высоту станций (над уровнем моря), а также их имена и страны принадлежности.

Что касается технических характеристик АМС, то она реализована на персональном компьютере Pentium-4 с оперативной памятью 256 Мбайт, ориентирована на работу в операционной среде Windows-98, -2000, XP и позволяет решать целевые задачи для мезомасштабных полигонов размером до 500×500 км с соблюдением следующих условий:

— количество используемых аэрологических станций	3 и более
— разрешение по пространству	10–50 км
— разрешение по времени	1–3 ч
— диапазон высот	0–9 км
— минимальное количество исходных измерений	2–3.

В заключение следует сказать, что об эффективности разработанной системы можно судить по результатам ее испытаний. Результаты подобных испытаний, проведенных на основе реальных аэрологических измерений (они были представлены в виде стандартных бюллетеней КН-04), будут являться предметом второй части настоящей статьи.

*V.S. Komarov, A.Yu. Bogushevich, S.N. Il'in, A.V. Kreminskii, Yu.B. Popov, A.I. Popova. Automated meteorological system for fast processing of aerological information, diagnostics, and forecast of parameters of the atmospheric state on mesoscale. Part 1. Description of system structure.*

The main functions, structure, and technical characteristics of the automatized meteorological system developed in the Institute of the Atmospheric Optics SB RAS are considered. The system is intended for information provision (with forecasted data) of solution of various applied problems.

1. *Комаров В.С.* Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. 256 с.
2. *Комаров В.С., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Хвациевский Д.Н.* Автоматизированная система метеорологической поддержки локально-регионального мониторинга атмосферных загрязнений // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 553–568.
3. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Метеорологические исследования в ИОА СО РАН в период 1980–1999 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 18–31.
4. *Комаров В.С., Попов Ю.Б., Суворов С.С., Кураков В.А.* Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. 236 с.
5. *Код для передачи данных вертикального зондирования атмосферы КН-04(FM-35; FM-36).* Л.: Гидрометеониздат, 1967. 31 с.
6. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 264 с.
7. *Комаров В.С., Попова А.И., Попов Ю.Б.* Адаптивный алгоритм пространственного прогнозирования метеорологических полей на основе фильтра Калмана и полиномиальной модели второго порядка // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 2. С. 558–562.
8. *Решетов В.В.* Требования к точности измерений, разрешению в пространстве и во времени для информации о состоянии атмосферы // Тр. ЦАО. 1978. Вып. 133. С. 55–64.
9. *Зуев В.Е., Комаров В.С., Ильин С.Н., Попова Ю.Б., Попова А.И., Суворов С.С.* Пространственный прогноз параметров состояния атмосферы в области мезомасштаба на основе динамико-стохастического подхода // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 10. С. 921–926.
10. *Leonides C.T.* (Editor). Control and Dynamic systems. Advances in Theory and Applications. Academic Press. A. Subsidiary of Harcourt Brace. Jovanovich Publishers, 1976. 407 p.
11. *Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Е.Д.* Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 376 с.
12. *Комаров В.С., Попов Ю.Б., Попова А.И., Кураков В.А., Курушев В.В.* Алгоритмы пространственно-временного прогноза метеопараметров на основе фильтра Калмана с использованием полиномиальной модели второго порядка // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 11. С. 1007–1011.
13. *Комаров В.С., Ильин С.Н., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Матвиенко Г.Г., Попов Ю.Б.* Об опыте использования алгоритма фильтра Калмана в задаче сверхкраткосрочного прогноза составляющих среднего ветра по данным лидарных измерений // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 2. С. 175–179.
14. *Арсенин В.Я.* Методы математической физики и специальные функции. М.: Наука, 1984. 383 с.