

Численное восстановление полей температуры и ветра в области мезо- β -масштаба на основе динамико-стохастического подхода

В.С. Комаров, А.В. Лавриненко, В.В. Будаев, Е.В. Горев*

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

Поступила в редакцию 28.05.2008 г.

Рассматриваются методические основы и результаты исследования алгоритма численного восстановления полей температуры и ветра в области мезо- β -масштаба, осуществляемого по данным единичной аэрологической станции и локальной сети метеорологических станций с использованием аппарата калмановской фильтрации и двумерной динамико-стохастической модели.

Ключевые слова: фильтр Калмана, двумерная динамико-стохастическая модель, температура, ветер, численное моделирование.

В работах [1, 2] предложен новый методический подход к решению задачи численного восстановления вертикальных профилей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы (ПСА) при отсутствии данных высотных наблюдений, основанный на использовании алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели и реализованный для точек пространства, где проводятся аэрологические измерения. Однако на практике возникает часто и другая задача, связанная с получением информации о физическом состоянии ПСА не только в точке, где проводятся аэрологические наблюдения, но и в местах расположения метеорологических станций, находящихся на небольших (менее 100–200 км) расстояниях от единичной станции высотного зондирования. В этом случае речь идет уже о задаче численного восстановления трехмерной структуры метеорологических полей в области мезо- β -масштаба (т.е. в области с характерными размерами 20–200 км [3]), осуществляемого на основе данных единичной аэрологической станции (либо системы лидарного или акустического зондирования) и некоторого ограниченного числа метеорологических станций.

Возросший интерес к скорейшему решению подобной задачи обусловлен тем, что результаты численного восстановления метеорологических полей (и, в частности, полей температуры и ветра) в ПСА позволяют:

– существенно расширить функциональные возможности лидарных и акустических систем дистанционного зондирования за счет численной оценки

(по данным их измерений) физического состояния пограничного слоя атмосферы не только в месте расположения подобных систем, но и в пределах всей окружающей мезо- β -масштабной области;

– провести прогнозирование пространственного распространения загрязняющих веществ на малые расстояния (до 50–100 км) от источника их выброса в атмосферу;

– повысить эффективность метеорологического обеспечения решения специальных задач военной геофизики и т.п.

Ранее (см., например, [4,5]) специалистами Института оптики атмосферы СО РАН для решения задачи численного восстановления метеорологических полей в области мезомасштаба было предложено несколько методических подходов, базирующихся на применении аппарата калмановской фильтрации и различных типов динамико-стохастических моделей. Но использовать предложенные в [4, 5] динамико-стохастические модели для решения поставленной задачи невозможно, поскольку для своей реализации они требуют получения метеорологических данных с не менее чем трех станций высотного зондирования.

С учетом этого обстоятельства в настоящей статье предлагается иной, чем в [4, 5], методический подход, позволяющий восстановить трехмерную структуру полей температуры и ветра в области мезо- β -масштаба по данным наблюдений локальной сети метеорологических станций и данным единичной станции (или одной дистанционной системы) высотного зондирования.

Сформулируем теперь постановку задачи и рассмотрим коротко особенности предложенной методики и алгоритма ее решения.

Пусть в заданной мезо- β -масштабной области имеются две точки с координатами (x_0, y_0) и (x_1, y_1) ,

* Валерий Сергеевич Комаров; Андрей Викторович Лавриненко; Вадим Владимирович Будаев; Евгений Владимирович Горев (gorov@iao.ru).

в первой из которых проводятся лишь наземные метеорологические наблюдения, а во второй осуществляются аэрологические измерения. В подобном случае задача численного восстановления какого-либо высотного метеорологического поля ξ , являющегося центрированным, однородным и случайным полем, в точке с координатами (x_0, y_0) , где имеются лишь наземные наблюдения, заключается в численной оценке (с помощью заданной математической модели) его значений на высоте h и в момент времени t_0 по наземным данным в той же точке и данным аэрологических измерений в точке (x_1, y_1) , взятым в момент времени t_0 и предшествующие моменты времени $t_0 - j$ ($j = 1, 2, \dots, K$). Здесь следует подчеркнуть, что, согласно [6], для мезо- β -масштабной области характерны достаточно высокая однородность и изотропность метеорологических полей.

Для решения поставленной задачи в качестве математической модели использована двумерная динамико-стохастическая модель вида

$$\xi_h(k) = \sum_{m=h}^{h+i} \sum_{j=0}^K d_{j,m} \xi_m(k-j) + \varepsilon_h(k), \quad (1)$$

где $\xi_h(k)$ — значение высотного метеорологического поля на некоторой фиксированной высоте h (она расположена в пределах пограничного слоя атмосферы) и в момент времени k ; m — номер высотного уровня, для которого выполняется процедура восстановления поля ξ , причем m меняется от h до $h+i$ (здесь $i = 1, 2, \dots, n$ — максимальное число высотных уровней, учитываемых при восстановлении этого поля на уровне h); $j = 0, 1, \dots, K$ — значение дискретного времени, определяющего размер предиктора алгоритма фильтра Калмана; $d_{j,m}$ — неизвестные параметры модели, подлежащие оцениванию и определяющие взаимную зависимость значений поля $\xi_h(k)$ с его значениями в предыдущие моменты времени $k-j$ на заданной высоте и вышележащих i -х уровнях (для восстановления поля в работе взяты $j = 3$ и $i = 2$); $\varepsilon_h(k)$ — невязка модели, определяемая стохастичностью атмосферных процессов.

Задача численного восстановления высотного метеорологического поля ξ в мезо- β -масштабной области решается в два этапа.

На первом этапе по данным аэрологических наблюдений за полем ξ в точке (x_1, y_1) , взятым в момент времени t_0 и предшествующие моменты времени $t_0 - j$ для высотного уровня h и i -х вышележащих уровней, а также по его наземным измерениям в точке (x_0, y_0) дается оценка параметров модели $d_{j,m}$.

На втором этапе, исходя из предположения о слабой изменчивости вектора оцененных параметров модели $\mathbf{D} = d_{j,m}$ в пределах рассматриваемого слоя атмосферы, а также на всей территории заданного мезо- β -масштабного полигона, осуществля-

ется оценка [на основе уравнения восстановления и аэрологических данных в точке (x_1, y_1)] поля ξ в заданной точке (x_0, y_0) , в момент времени t_0 и на высоте $h+1$. При этом уравнение восстановления можно записать в следующем виде:

$$\bar{\xi}_{h+1}^{(0)}(k) = \sum_{m=h}^{h+1} \sum_{j=0}^K \hat{d}_{j,m} \xi_{m+1}^{(1)}(k-j), \quad (2)$$

где $\bar{\xi}_{h+1}^{(0)}(k)$ — оценка метеорологического поля ξ на высоте $h+1$ и в момент времени k , полученная для точки (x_0, y_0) , где нет аэрологических измерений; $\hat{d}_{j,m}$ — оценки параметров модели (1), сделанные для h -го высотного уровня по данным аэрологических измерений в точке (x_1, y_1) ; $\xi_{m+1}^{(1)}(k-j)$ — измеренные значения того же поля ξ в точке (x_1, y_1) в момент времени с k по $k-j$ и на высотных уровнях с $h+1$ по $h+i+1$.

Поскольку в выражениях (1) и (2) в качестве исходных данных берутся не сами измеренные значения поля ξ , а его центрированные значения, то процедура восстановления выполняется по той же схеме, что и в работе [1], когда результирующая оценка высотного метеорологического поля ξ в точках (x_0, y_0) складывается из оценки регулярной составляющей этого поля $\bar{\xi}$ и оценки его флуктуационной составляющей ξ' , т.е.

$$\xi = \bar{\xi} + \xi'. \quad (3)$$

Заметим, что в выражениях (1) и (2) обозначение штриха было опущено. В дальнейшем этот штрих также будет опускаться.

Регулярная составляющая поля $\bar{\xi}$ вычисляется как сглаженная средняя по нескольким предыдущим наблюдениям, взятым для точки (x_1, y_1) на фиксированной высоте:

$$\bar{\xi}_h(k) = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \xi_h(k-j). \quad (4)$$

Здесь p — глубина временного окна, используемого для оценки регулярной составляющей поля ξ (в нашем случае $p = 3$).

Остановимся теперь коротко на алгоритме численного восстановления вертикальной структуры поля ξ в заданной точке (x_0, y_0) , находящейся в пределах мезо- β -масштабной области и имеющей лишь наземные метеорологические данные. Вначале по данным аэрологических наблюдений в точке (x_1, y_1) , находящейся в той же мезо- β -масштабной области, осуществляется оценка неизвестных параметров $d_{j,m}$ в модели (1). Для этого используются:

1) система разностных уравнений состояния вида

$$\mathbf{X}_{k+1}^t = \Psi_k \cdot \mathbf{X}_k^t + \omega_k^t, \quad (5)$$

где \mathbf{X}_k^t – вектор состояния размерностью $n = (i + 1)K$, включающий в себя все неизвестные и подлежащие оцениванию параметры $d_{j,m}$ для текущего дискретного времени k ; Ψ_k – матрица перехода для дискретной системы размерностью $(n \times n) = [(i + 1)K(i + 1)K]$; ω_k^t – вектор случайных возмущений системы (вектор шумов состояния) размерностью $n = (i + 1)K$.

Следует отметить, что если на взятом интервале времени параметры \mathbf{X}_k^t в среднем по времени не изменяются (а это можно предположить), то матрица перехода Ψ_k будет соответствовать единичной матрице \mathbf{I} размерностью $(n \times n)$ и выражение (5) будет иметь вид

$$\mathbf{X}_{k+1}^t = \mathbf{X}_k^t + \omega_k^t; \quad (6)$$

2) модель измерений, по данным которых в алгоритме фильтра Калмана осуществляется оценка состояния системы, причем в общем случае она описывается аддитивной смесью полезного сообщения и ошибки измерения:

$$\mathbf{Y}_k^0 = \xi_k^0 = \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{X}_k^t + \varepsilon_k^0, \quad (7)$$

где \mathbf{Y}_k^0 – вектор фактических измерений, представляющий собой скаляр-число, т.е. измерение на высоте h и в момент времени k ; \mathbf{H}_k – вектор наблюдений размерностью $n = (i + 1)K$, определяющий функциональную связь между истинными значениями переменных состояния и фактическими измерениями, элементами которого являются значения измерений поля $\xi_h(k)$ на заданных уровнях в пределах фиксированного слоя атмосферы, в данном и предыдущие моменты времени на глубину K :

$$\mathbf{H}_k = \|y_0(k-1), y_0(k-2), \dots, y_0(k-K), y_1(k-1), \dots, y_{i+1}(k-K)\|;$$

ε_k^0 – вектор ошибок (шумов) измерений в момент времени k .

На основе выражений (6) и (7) с помощью линейного фильтра Калмана [7] и решается задача оценивания вектора состояния.

Затем по полученным оценкам вектора состояния \mathbf{X}_k^a осуществляется вычисление для точки (x_0, y_0) , где нет аэрологических измерений, самого значения высотного метеорологического поля $\xi_{h+1}^{(0)}(k)$. С этой целью используется выражение (2), записанное в матричном виде

$$\xi_{h+1}^{(0)}(k) = \mathbf{Y}_k^0 = \mathbf{H}_k^* \cdot \mathbf{X}_k^0, \quad (8)$$

где \mathbf{H}_k^* – вектор перехода размерностью $n = (i + 1)K$, применяемый для вычисления значений заданного метеорологического поля на высотном уровне $h + 1$ в момент времени k ; \mathbf{X}_k^0 – полученная на первом этапе оценка вектора состояния в момент времени k .

Описанный выше алгоритм численного восстановления метеорологических полей в области мезо-β-масштаба был исследован на предмет его эффективности при применении в задаче трехмерной (по горизонтали и высоте) экстраполяции полей температуры и ветра, осуществляемой в пределах пограничного слоя атмосферы.

Поскольку для оптимальной оценки качества такой экстраполяции требуются данные по меньшей мере двух близкорасположенных аэрологических станций, одна из которых является контрольной, нами в качестве исходной информации использованы данные трех европейских станций: Штутгарт (48°50' с.ш., 09°12' в.д.), Кюммсбрукк (49°26' с.ш., 11°54' в.д.) и Мюнхен (48°15' с.ш., 11°33' в.д.), расположенных друг от друга на самых минимальных расстояниях. При этом все данные двухсрочных (00 и 12 ч по Гринвичу) радиозондовых наблюдений, полученных за январь и июль 2007 г., были приведены (с помощью линейной интерполяции и с учетом данных особых точек и главных изобарических поверхностей: 1000, 925, 850 и 700 гПа) к системе геометрических высот: 0 (уровень земной поверхности), 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 и 1600 м.

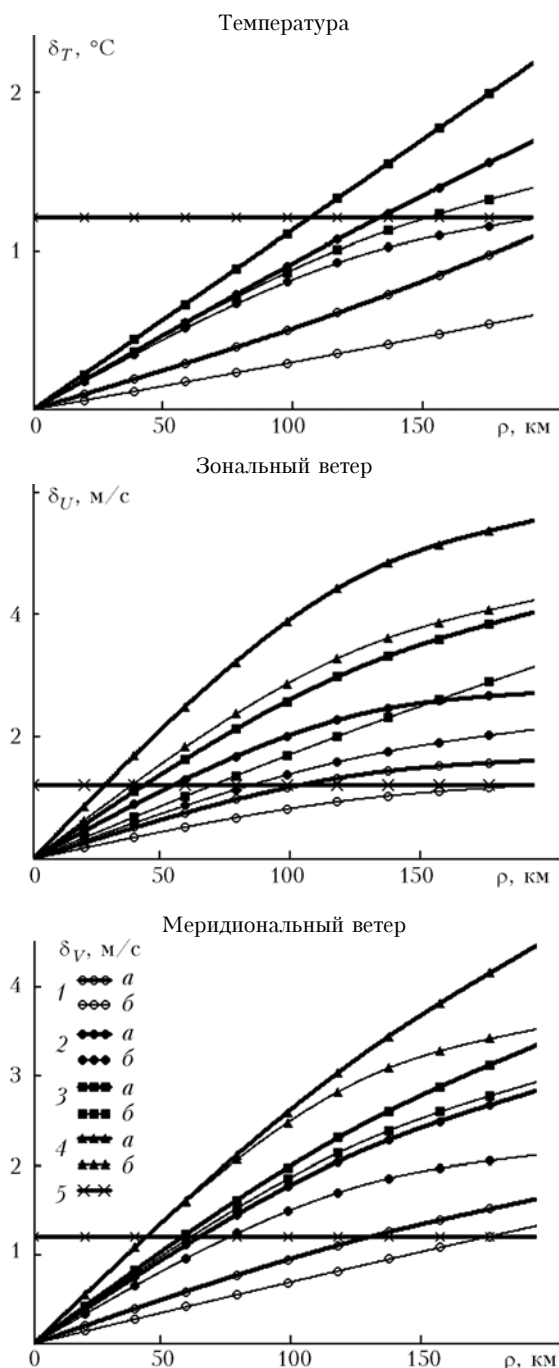
Для оценки точности и эффективности алгоритма численного восстановления в качестве базовой аэрологической станции (по ее данным определялись параметры математической модели $d_{j,m}$) взята ст. Кюммсбрукк, а в качестве контрольных точек (для них осуществлялась экстраполяция по высоте) использованы ст. Мюнхен и Штутгарт, расположенные от ст. Кюммсбрукк на расстояниях 175 и 195 км соответственно.

В то же время сама подобная оценка, осуществляемая на примере численного восстановления средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра (эти параметры взяты применительно к прогнозу распространения облака загрязняющих веществ), проводилась с помощью среднеквадратических погрешностей δ_ξ такого восстановления. При этом значения δ_ξ сравнивались с предельно допустимой ошибкой Δ_ξ определения средних в слое значений метеорологической величины. Согласно [8] подобная ошибка составляет 1,0–1,2 °С для температуры и 1,0–1,2 м/с для ортогональных составляющих скорости ветра. Расчет средних значений температуры и ортогональных составляющих скорости ветра в слое $h - h_0$ (здесь h_0 – уровень земной поверхности, а h – высота верхней границы взятого слоя) был осуществлен с помощью выражения [8]:

$$\langle \xi \rangle_{h_0, h} = \frac{1}{h - h_0} \int_{h_0}^h \xi(z) dz, \quad (9)$$

где ξ – метеорологическая величина; z – высота, а $\langle \bullet \rangle$ обозначает процедуру осреднения данных по вертикали.

На рисунке представлены зависимости среднеквадратических погрешностей δ_ξ пространственной трехмерной экстраполяции (по горизонтали и высоте) параметров $\langle T \rangle_{h_0,h}$, $\langle U \rangle_{h_0,h}$ и $\langle V \rangle_{h_0,h}$ от расстояния, полученные для зимы и лета и типичных атмосферных слоев.



Зависимость среднеквадратической погрешности δ_ξ пространственной экстраполяции средних в слое 0–200 (1), 0–400 (2), 0–800 (3) и 0–1600 м (4) значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра от расстояния ρ , проведенной на основе динамико-стохастического алгоритма, а также предельно допустимые ошибки Δ_ξ (5) (а – зима, б – лето)

Для сравнения приведены в виде прямых горизонтальных линий предельно допустимые ошибки (Δ_ξ) определения средних в слое значений температуры и ортогональных составляющих скорости ветра.

Анализ рисунка показал, что предложенный алгоритм может с успехом применяться на практике, поскольку дает вполне удовлетворительные результаты, особенно для нижнего 600-метрового слоя атмосферы, а наиболее высокое по качеству восстановление, причем на самое значительное расстояние от аэрологической станции, характерно для поля температуры. Действительно, условия, при которых среднеквадратическая погрешность пространственной экстраполяции средних в слое значений температуры, осуществленной с помощью предложенного алгоритма, не превышает предельно допустимой ошибки 1,2 °С, сохраняются вплоть до расстояния $\rho = 100–120$ км. В то же время для ветра, обладающего большей (чем у температуры) пространственной изменчивостью, условия, когда значения среднеквадратической погрешности восстановления $\langle U \rangle_{h_0,h}$ и $\langle V \rangle_{h_0,h}$ меньше предельно допустимой ошибки 1,2 м/с, соблюдаются лишь до расстояния $\rho = 60$ км, да и то лишь в нижнем 600-метровом слое. Выше уровня 600 км качественное восстановление тех же параметров сохраняется до расстояния 30–50 км, причем с высотой оно уменьшается.

Таким образом, экспериментальные исследования качества восстановления средних в слое значений температуры и ортогональных составляющих скорости ветра, проведенные в области мезо- β -масштаба на основе алгоритма калмановской фильтрации с двумерной динамико-стохастической моделью и данных единичной станции высотного зондирования (с привлечением данных имеющихся метеорологических станций), показали, что этот алгоритм является достаточно эффективным и может быть использован для решения различных прикладных задач, где требуется учет физического состояния пограничного слоя атмосферы в заданной мезомасштабной области.

1. Горев Е.В., Комаров В.С., Лавриненко А.В., Будаев В.В. Численное восстановление профилей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы на основе алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели. Часть 1. Методические основы // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 4. С. 323–326.
2. Горев Е.В., Комаров В.С., Лавриненко А.В., Будаев В.В. Численное восстановление профилей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы на основе алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели. Часть 2. Результаты исследований // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 4. С. 327–332.
3. Белов П.Н., Борисенко Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 376 с.

4. *Комаров В.С., Попов Ю.Б., Суворов С.С., Кураков В.А.* Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии / Под общей редакцией Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. 236 с
5. *Komarov V.S., Lavrinenko A.V., Kreminskii A.V., Lomakina N.Ya., Popov Yu.B., Porova A.I.* New Method of Spatial Extrapolation of Meteorological Fields on the Mesoscale Level Using a Kalman Filter Algorithm for a Four-Decisional Dynamic-Stochastic Model // J. Atmos. and Ocean. Technol. 2007. V. 24. N 2. P. 182–193.
6. *Гандин Л.С., Каган Р.Л.* Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеопиздат, 1976. 359 с.
7. *Браммер К., Зиффлинг Г.* Фильтр Калмана–Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.
8. *Комаров В.С.* Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. 255 с.

V.S. Komarov, A.V. Lavrinenko, V.V. Budaev, E.V. Gorev. Numerical retrieval of temperature and wind profiles in the β -mesoscale limited area, based on dynamic-stochastic approach.

A technique and results of numerical retrieval of temperature and wind profiles in the β -mesoscale limited area, based on data of single rawinsonde and few meteorological stations with the Kalman filter algorithm and 2D dynamic-stochastic model are described.