

На правах рукописи

Лавриненко Андрей Викторович

**МНОГОМЕРНЫЕ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ИХ
ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗА
ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЕТРА**

специальность 25.00.30 – метеорология, климатология,
агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2008

Работа выполнена в Институте Оптики Атмосферы СО РАН

Научный руководитель: доктор географических наук,
профессор, Комаров Валерий Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Смышляев Сергей Павлович
кандидат физико-математических наук,
доцент Ременсон Виталий Александрович

Ведущая организация: Казанский Государственный Университет.

Защита состоится «26» июня 2008 г. в 15 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.197.01 при Российском Государственном
гидрометеорологическом Университете по адресу:
196195, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, дом 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского
Государственного гидрометеорологического Университета

Автореферат разослан « ____ » мая 2008 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.197.01
доктор физико-математических наук,
профессор

А.Д. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одной из основных проблем современной мезометеорологии можно назвать проблему, связанную с оценкой и прогнозом состояния атмосферы над неосвещенной данными наблюдений территорией по результатам измерений в прилегающих районах. По существу она представляет собой процедуру пространственной интерполяции метеорологических полей в области, ограниченной горизонтальными размерами 50-300 км и высотой 2-10 км. Результаты такого прогноза могут быть использованы в отдельных областях метеорологии, геофизики, экологического мониторинга, в частности для оценки пространственного распространения техногенных и природных загрязняющих веществ на малые (100–200 км) расстояния, обеспечения безопасности взлета и посадки различных летательных аппаратов, метеорологической поддержки войск во время ведения локальных боевых операций и т.п.

Возросшие требования к точности получаемых оценок диктуют необходимость разработки новых, более надежных методов и алгоритмов пространственной интерполяции метеорологических полей. Ранее данная задача обычно решалась в рамках объективного анализа метеорологических полей, проводимого на основе метода оптимальной интерполяции. В последние годы в связи с увеличением потока метеорологической информации традиционная процедура объективного анализа стала вытесняться процедурой четырехмерного усвоения данных.

Эта процедура объединяет в себе две различные задачи – объективный анализ и прогнозирование метеорологических полей. Объективный анализ, под которым обычно понимают построение метеорологического поля в узлах регулярной сетки по данным измерений, осуществляется на основе использования той или иной модификации метода оптимальной интерполяции.

Однако метод оптимальной интерполяции, как и более современный вариационный подход, используется главным образом для восстановления макромасштабных метеорологических полей, проводимого по данным доста-

точно большого числа оперативных измерений мировой сети аэрологических станций. Для территории Российской Федерации данная сеть характеризуется крайней неоднородностью и малой плотностью, где расстояния между соседними станциями радиозондирования, за редким исключением, составляют более 300 км, поэтому она не соответствует требованиям объективного анализа мезометеорологических полей, проводимого с разрешением от десятков до сотен километров.

Что касается проблемы, связанной со сверхкраткосрочным прогнозом полей температуры и ветра с заблаговременностью до нескольких часов, то она практически еще не решалась, особенно для пограничного слоя атмосферы (ПСА), где наблюдается основной перенос техногенных загрязняющих веществ. Это связано с отсутствием данных о вертикальном распределении указанных метеорологических величин, полученных для ПСА с высоким пространственно-временным разрешением, а также отсутствием надежной методики сверхкраткосрочного прогноза для малых интервалов заблаговременности ($\tau=0,5-3$ часа), реализуемой в условиях ограниченного объема метеорологической информации, получаемой от одной станции наблюдения.

Решение проблем численного восстановления и сверхкраткосрочного прогноза метеорологических полей на мезомасштабном уровне идет в двух направлениях. Во-первых, за счёт развития аппаратных средств, реализующих возможности получения аэрологической информации с высоким временным разрешением и высокой точностью, например лидарных и акустических. Во-вторых, разрабатываются новые математические методы и алгоритмы обработки данных.

В последнее время в практику численного моделирования и прогнозирования метеоусловий, в том числе и в пограничном слое атмосферы, стал широко внедряться динамико-стохастический подход, основанный на использовании алгоритма фильтра Калмана и различных математических моделей, которые описывают поведение метеорологических полей в пространстве и во времени.

Из сказанного выше очевидно, что решение задач восстановления и сверхкраткосрочного прогноза полей метеорологических величин в области мезомасштаба невозможно без построения новых прогностических и интерполяционных моделей этих полей, которые адекватно отражали бы особенности эволюции атмосферных процессов в пространстве и во времени. На базе таких моделей, с привлечением аппарата калмановской фильтрации, могут быть разработаны более совершенные методы и алгоритмы оценивания текущей и ожидаемой метеорологической обстановки в заданных районах. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы в качестве информационной основы, например, для диагноза и прогноза уровня загрязненности в атмосфере этих районов или для повышения эффективности применения военно-технических систем и вооружений в условиях ведения локальных боевых операций.

Актуальность темы диссертационной работы определяется:

- повышением роли метеорологической информации при решении различных прикладных задач, и в частности, задач диагностики и прогноза техногенного загрязнения атмосферы в пределах крупного города или промышленного центра, а также обеспечения расчётного режима полёта ракет из точки пуска вдоль всей траектории полёта, вплоть до района цели;
- необходимостью разработки новых, более точных интерполяционных и прогностических моделей изменения мезомасштабных атмосферных процессов в пространстве и во времени, а также методов использования этих моделей в задачах восстановления и сверхкраткосрочного прогноза полей температуры и ветра, реализуемых в рамках динамико-стохастического подхода;
- отсутствием приемлемых по точности и вычислительным затратам алгоритмов достоверного численного восстановления и сверхкраткосрочного прогноза мезомасштабных полей метеорологических величин.

Диссертационная работа имеет своей **целью** построение интерполяционных и прогностических моделей изменения мезомасштабных атмосферных процессов в пространстве и во времени, а также разработку методов их ис-

пользования, в рамках динамико-стохастического подхода, для решения задач численного восстановления и сверхкраткосрочного прогноза полей температуры и ветра в области мезомасштаба.

Для достижения поставленной цели в диссертации были решены следующие **задачи**:

1) проанализировано современное состояние работ в области существующих методических подходов к решению задач диагностики и прогноза полей метеорологических величин в области мезомасштаба;

2) разработана интерполяционная четырехмерная динамико-стохастическая модель процессов изменения полей метеорологических величин в пространстве и во времени для синтеза алгоритма численного восстановления этих полей в области мезомасштаба;

3) на основе построенной четырехмерной динамико-стохастической модели разработаны новый метод и алгоритм восстановления мезометеорологических полей в условиях минимума исходной информации;

4) разработана прогностическая двумерная модель динамико-стохастического типа для ее использования в методике и алгоритме сверхкраткосрочного прогноза с малой заблаговременностью, порядка 0,5-3 часа;

5) на основе двумерной динамико-стохастической модели разработана новая методика и алгоритм сверхкраткосрочного прогноза полей метеорологических величин с малой заблаговременностью, проводимого по данным наблюдений только одной станции высотного зондирования;

6) на примере полей температуры и ветра, проведены численные эксперименты по оценке качества и эффективности предложенных алгоритмов восстановления и сверхкраткосрочного прогноза.

В качестве **методов исследований** при решении поставленных задач были использованы методы теории оптимального оценивания, математической статистики, численного анализа и практические численные эксперименты, проводимые с применением реальных радиозондовых, содарных и радиометрических измерений.

Основные научные результаты и их новизна состоят в следующем:

1) впервые предложена интерполяционная четырехмерная динамико-стохастическая модель изменения мезомасштабных полей метеорологических величин в пространстве, реализуемая с учётом временных изменений. При этом отличительной особенностью является то, что в вектор состояния модели включены не собственно метеорологические величины, а неизвестные и подлежащие оцениванию параметры многомерной авторегрессии;

2) на основе предложенной четырехмерной модели впервые разработаны новые методика и алгоритмы численного восстановления полей метеорологических величин в области мезомасштаба, проводимого в условиях минимума исходной информации. Реализован подход, согласно которому для каждой точки интерполяции строится свой собственный фильтр Калмана, что позволяет значительно сократить вычислительные затраты;

3) разработана двумерная динамико-стохастическая модель эволюции полей метеорологических величин, одновременно учитывающая их изменение по высоте и во времени;

4) впервые предложен метод, и алгоритмы сверхкраткосрочного прогноза полей метеорологических величин с малой заблаговременностью, от 0,5 до 3 часов, разработанные на основе двумерной динамико-статистической модели, и работающие с использованием данных наблюдений только одной станции высотного зондирования;

5) впервые, на примере полей температуры и ветра, получены результаты численных экспериментов по оценке качества и эффективности разработанных алгоритмов восстановления и сверхкраткосрочного прогноза. Осуществлена оптимизация алгоритма сверхкраткосрочного прогноза относительно параметров прогностической модели и характера исходных данных.

На защиту выносятся следующие положения:

1) Предложенная четырехмерная динамико-стохастическая модель, основанная на учете пространственно-временного распределения полей метеорологических величин в области мезомасштаба, реализуемая с учётом временных изменений, отличающаяся тем, что в вектор состояния модели включены не собственно метеорологические величины, а неизвестные и подлежащие оцениванию параметры многомерной авторегрессии;

рологических величин, позволяет адекватным образом описать состояние атмосферы в области мезомасштаба.

2) Применение четырехмерной динамико-стохастической модели в алгоритме численного восстановления метеорологических полей позволяет получать их достоверную оценку на неосвещенной данными наблюдений территории на глубину 250-300 км, даже в условиях ограниченной информации.

3) Разработанная прогностическая двумерная динамико-стохастическая модель и алгоритм ее применения в задаче сверхкраткосрочного прогноза полей температуры и ветра, осуществляемого на основе высотного радиометрического и содарного зондирования в отдельных измерительных пунктах, позволяют проводить прогнозирование полей этих метеорологических величин с заблаговременностью $\tau=0,5-3$ часа и точностью, достаточной для практического применения.

4) Оптимизация алгоритма сверхкраткосрочного прогноза полей температуры и ветра в ПСА, за счёт адекватного выбора параметров двумерной модели и методики её использования, позволяет уменьшить результирующую ошибку прогнозирования минимум на 30-40% для максимальной заблаговременности $\tau=3$ часа.

Положения, выносимые на защиту, являются решением актуальной научной задачи – разработка многомерных динамико-стохастических моделей процессов эволюции метеорологических полей в пространстве и во времени, а также создание методов и алгоритмов их применения для восстановления и сверхкраткосрочного прогноза указанных полей в области мезомасштаба.

Научная и практическая значимость работы определяется тем, что полученные в диссертации многомерные динамико-стохастические модели могут быть использованы, с одной стороны, для описания состояния и эволюции атмосферных полей температуры и ветра в области мезомасштаба, а с другой стороны, для разработки новых методов и алгоритмов достоверной оценки и сверхкраткосрочного прогноза этих полей в интересах информационной поддержки решения задач диагностики и прогнозирования уровня за-

грязненности атмосферы в крупных городах, промышленных центрах и местах проведения утилизации экологически опасных объектов, а также повышения эффективности применения военной техники и вооружений в условиях ведения локальных боевых операций.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов обусловлена применением уже апробированных другими авторами динамико-стохастических подходов к решению задач прогноза и восстановления метеорологических полей, а также аргументированностью исходных положений, логической непротиворечивостью рассуждений, корректным использованием современного математического аппарата.

Методологическую основу диссертационной работы составили научные труды отечественных и зарубежных авторов в области математики и метеорологии. Кроме того, достоверность работы подтверждается результатами численных экспериментов, сравнением с данными других авторов и всем имеющимся эмпирическим материалом.

Апробация и публикации результатов работы:

Результаты диссертации докладывались и получили одобрение на X – XII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2003 – 2005 гг.); на Пятом Сибирском Совещании по климатологическому мониторингу (Томск, 2003 г.); на II Международной конференции «Окружающая среда и экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики» (Томск, 2003 г.); на X и XI Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2003 – 2004 гг.); на Всероссийской научной конференции «Современные глобальные и региональные изменения геосистем» (Казань, 2004 г.) и на International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing (Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2006).

Основные результаты диссертации изложены в 6 статьях и 11 тезисах докладов, а также вошли в отчет по НИР, выполняемой по специальной теме.

Структура и объем работы.

Представляемая диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 168 страниц текста, содержащего 24 рисунка и 10 таблиц. Список литературы содержит 119 наименований из них 47 на английском языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении анализируется современное состояние рассматриваемой проблемы, обосновывается актуальность темы диссертации, приводятся положения, выносимые на защиту, указывается их научная новизна и практическая значимость, аргументируется обоснованность и достоверность полученных результатов, а также дается краткая характеристика диссертации.

В первой главе диссертационной работы был проведен анализ современных подходов к решению задачи пространственной и временной экстраполяции метеорологических полей. В частности были рассмотрены методы теории оптимального оценивания, метод оптимальной интерполяции, предложенный Л.С. Гандиным, вариационный подход, развитый П. Картье и О. Талаграном, алгоритм фильтра Калмана и ансамблевого фильтра Калмана, впервые предложенный П.Л. Хаутакамером и Х.Л. Митчеллом. Кроме того, были рассмотрены динамико-стохастические методы на примере исследований Е.Г. Климовой, В.С. Комарова, Ю.Б. Попова, а также модифицированный метод группового учета аргументов (ММГУА), разработанный В.С. Комаровым. Обозначены основные достоинства и недостатки предлагаемых подходов.

Проведенный анализ современных подходов к решению задач усвоения метеорологической информации показал, что использование в них системы структурных функций на основе уравнений гидродинамики, требует больших вычислительных ресурсов и значительных объемов исходных данных. Даже применение упрощенных гидродинамических моделей (базирующихся, например, на уравнении тепла, записанном в адиабатическом приближении, и

геострофических соотношениях), а также уменьшение размеров рассматриваемой области до уровня мезомасштаба, не дают при использовании классического фильтра Калмана приемлемых по точности результатов.

В то же время динамико-стохастический подход, основанный на использовании малопараметрических моделей, и аппарата калмановской фильтрации, позволяет решать задачи восстановления и сверхкраткосрочного прогноза состояния атмосферы для ограниченных территорий по данным минимума исходной информации. Эти обстоятельства учитывались при разработке новых интерполяционных и прогностических моделей (четырёхмерной динамико-стохастической модели для восстановления мезометеорологических полей и двумерной динамико-стохастической модели - для сверхкраткосрочного прогноза), а также методов и алгоритмов численного оценивания текущего и ожидаемого состояния атмосферы в области мезомасштаба.

Вторая глава посвящена разработке интерполяционной четырёхмерной динамико-стохастической модели и оригинальной методики ее применения в задаче численного восстановления мезометеорологических полей температуры и ветра. Данная модель позволяет описать изменение метеорологического поля одновременно по высоте, горизонтали и во времени. Особенности предложенной методики является то, что:

- в отличие от современных схем усвоения метеорологической информации, использующих совершенные гидродинамические модели с постоянными во времени параметрами, в предлагаемой методике осуществляется параллельное пошаговое уточнение, как оценок метеорологических полей, так и параметров заданной динамико-стохастической модели;

- в отличие от тех же схем усвоения метеорологической информации, в которых использование фильтра Калмана затруднено из-за высокого порядка матриц ковариаций ошибок прогноза, в предлагаемой методике для каждой точки экстраполяции строится свой собственный фильтр. Вектор состояния для этой точки включает лишь значения коэффициентов модели, характеризующих каждую точку измерения, находящуюся в пределах заданной мезо-

масштабной области. Это позволяет сократить размерность вектора состояния и матриц ковариаций ошибок оценивания и повысить устойчивость алгоритма фильтрации;

- фильтрации подвергается вектор состояния динамической системы, составленный из неизвестных параметров разработанной четырехмерной динамико-стохастической модели. Эти модельные параметры в дальнейшем используются для оценки поля в точке интерполяции.

Процедура оценки значений случайного поля ξ по данным радиозондовых наблюдений выполняется по двухканальной схеме, согласно которой, результирующая оценка значения поля ξ_0 в точке восстановления складывается из суммы оценок регулярной составляющей поля $\bar{\xi}_0$, и оценки флуктуационной составляющей ξ'_0 :

$$\xi_0 = \xi'_0 + \bar{\xi}_0 \quad (1)$$

Для оценки регулярной составляющей поля $\bar{\xi}_0$ используется сглаженное значение, рассчитываемое для фиксированной высоты h по данным измерений ближайших к точке прогноза станций, на основе выражения:

$$\bar{\xi}_0 = \langle \xi_0 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \xi_i}{\sum_{i=1}^n q_i}, \quad (2)$$

где: ξ_i – измеренное значение поля на i -ой станции; n – количество станций.

$$q_i = 1 - \left(\rho_{i0} / \sum_{i=1}^n \rho_{i0} \right) \quad (3)$$

q_i - весовой коэффициент пропорциональный расстоянию между точкой восстановления и точкой измерения, (здесь $\rho_{i0} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$ – расстояние между i -ой станцией и точкой восстановления (x_0, y_0) , а x и y – прямоугольные координаты). В дальнейшем число станций n задавалось равным трем.

Среднее полигонное значение, определяется из выражения:

$$\bar{\xi}_s = \langle \xi_s \rangle = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \xi_i, \quad (4)$$

где S – число станций в пределах полигона.

Для получения значений флуктуационного поля ξ'_i в точках измерения на каждом шаге оценки, можно воспользоваться выражением:

$$\xi'_i = \xi_i - \bar{\xi}_s. \quad (5)$$

Выражение для четырехмерной динамико-стохастической модели имеет вид:

$$\xi'_{i,h}(k) = \sum_{j=1}^K a_j \xi'_{i,h}(k-j) + \sum_{m=1}^{M-1} b_m \xi'_{i,m}(k) + \sum_{s=1}^S \frac{c_s \xi'_{s,h}(k)}{\rho_{is}} + \varepsilon_{i,h}(k), \quad (6)$$

где k – дискретное текущее время; K – максимальный порядок запаздывания по времени, который определяет глубину авторегрессии; M – количество высотных уровней, используемых для формирования оценки поля ξ'_i ; a_j , b_m , c_s – неизвестные и подлежащие оцениванию параметры модели; ρ_{is} – нормирующий коэффициент, определяющий взаимное расположение точек наблюдения и точки восстановления, который можно вычислить согласно:

$$\rho_{is} = \frac{\rho_0}{\rho_0 - R_{is}}, \quad (7)$$

здесь ρ_0 – радиус пространственной корреляции; $R_{is} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}$ – расстояние между точками i и s (в км); $\varepsilon_{i,h}(k)$ – невязка модели, которая определяет стохастичность атмосферных процессов и несовершенство модели описываемой выражением (6).

Наличие параметрической зависимости не позволяет напрямую воспользоваться выражением (6) для получения оптимальной линейной оценки, т.к. в этом выражении модельные параметры a_j , b_m , c_s – неизвестны. Поэтому задача оценки поля ξ' в некоторой точке распадается на два этапа. На первом этапе, по данным аэрологических наблюдений в i – тых точках, осуществляется оценка коэффициентов a_j , b_m , c_s . На втором этапе по оцененным коэффициентам восстанавливаются значения флуктуационного поля ξ' в точке интерполяции.

Для оценивания модельных параметров a_j , b_m , c_s , можно задать систему разностных уравнений в матричном виде:

$$\mathbf{x}_{k+1}^t = \mathbf{\Psi}_k \mathbf{x}_k^t + \boldsymbol{\omega}_k^t, \quad (8)$$

где: \mathbf{x}_k^t – «истинный» вектор состояния системы; $\mathbf{\Psi}_k$ – матрица перехода для дискретной системы; $\boldsymbol{\omega}_k^t$ – вектор случайных возмущений системы (вектор шумов состояния).

Математическая модель измерений в общем случае описывается аддитивной смесью полезного сообщения и ошибки измерения:

$$\mathbf{y}_k^0 = \boldsymbol{\xi}_k^0 = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k^t + \boldsymbol{\varepsilon}_k^0, \quad (9)$$

где \mathbf{y}_k^0 – вектор измерений; \mathbf{H}_k – матрица наблюдений; $\boldsymbol{\varepsilon}_k^0$ – вектор ошибок измерений.

Матрицу \mathbf{H}_k , состоящую из трех блоков можно записать в виде:

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{H}(k) = \sum_{i=1}^S \sum_{h=1}^M \left(\sum_{j=1}^K \xi'_{i,h}(k-j) + \sum_{m=1}^{M-1} \xi'_{i,m}(k) + \sum_{s=1}^S \frac{\xi'_{s,h}(k)}{\rho_{is}} \right) \quad (10)$$

После определения всех элементов входящих в выражения (8) и (9) задача оценивания параметров a_j , b_m , c_s решается с помощью линейного фильтра Калмана, обеспечивающего оценку элементов вектора состояния с минимальными среднеквадратическими ошибками.

На втором этапе осуществляется непосредственное восстановление значений флуктуационного поля ξ_k^{a} . Алгоритм восстановления может быть представлен в следующем виде:

$$\xi_k^{a} = \mathbf{y}_k^{a} = \mathbf{H}_k^* \mathbf{x}_k^a, \quad (11)$$

где \mathbf{H}_k^* – матрица перехода, используемая для восстановления поля (матрица восстановления); \mathbf{x}_k^a – оценка вектора состояния.

Следует сразу же подчеркнуть, что восстановление поля ξ' с помощью выражения (11) может быть выполнено только рекуррентно, т.е. последовательным вычислением элементов матрицы восстановления \mathbf{H}_k^* .

В завершение, во второй главе даётся описание алгоритма численного восстановления метеорологических полей в области мезомасштаба, построенного на основе четырехмерной динамико-стохастической модели.

В третьей главе приводятся результаты численных экспериментов по оценке качества алгоритма восстановления мезомасштабных полей температуры и ортогональных, зональной и меридиональной, составляющих скорости ветра на основе четырёхмерной динамико-стохастической модели.

Для проведения исследований, были использованы массивы многолетних радиозондовых наблюдений за температурой и ветром, полученные по данным высотного зондирования ряда аэрологических станций, представляющих собой три мезометеорологических полигона. Первый полигон включал в себя пять аэрологических станций: Москва ($55^{\circ}45'$ с.ш., $37^{\circ}57'$ в.д.), Смоленск ($54^{\circ}45'$ с.ш., $32^{\circ}04'$ в.д.), Рязань ($54^{\circ}38'$ с.ш., $39^{\circ}42'$ в.д.), Сухиничи ($54^{\circ}06'$ с.ш., $35^{\circ}21'$ в.д.), и Курск ($51^{\circ}46'$ с.ш., $36^{\circ}10'$ в.д.). Второй полигон включал в себя также пять аэрологических станций: Варшава ($52^{\circ}11'$ с.ш., $20^{\circ}58'$ в.д.), Каунас ($54^{\circ}53'$ с.ш., $23^{\circ}53'$ в.д.), Брест ($52^{\circ}07'$ с.ш., $23^{\circ}41'$ в.д.), Минск ($53^{\circ}11'$ с.ш., $27^{\circ}32'$ в.д.), Львов ($49^{\circ}49'$ с.ш., $23^{\circ}57'$ в.д.). Третий полигон состоял из семи аэрологических станций расположенных в Западной Германии: Счесвик ($54^{\circ}32'$ с.ш., $09^{\circ}33'$ в.д.), Грефсвальд ($54^{\circ}06'$ с.ш., $13^{\circ}24'$ в.д.), Ольденбург ($53^{\circ}23'$ с.ш., $07^{\circ}14'$ в.д.), Берген ($52^{\circ}49'$ с.ш., $09^{\circ}56'$ в.д.), Линденбург ($52^{\circ}13'$ с.ш., $14^{\circ}07'$ в.д.), Эссен ($51^{\circ}24'$ с.ш., $06^{\circ}58'$ в.д.), Майнинген ($50^{\circ}35'$ с.ш., $10^{\circ}23'$ в.д.). Массивы наблюдений, полученные для первого и третьего полигонов, охватывали период с 2000 по 2006 год, а для второго полигона с 1969 по 1975 год.

Данные для каждой аэрологической станции любого из трех полигонов были получены для двух сроков, а именно 0 и 12 ч. по Гринвичу. При этом все данные радиозондовых наблюдений за температурой и ветром, представленные для зимы и лета на стандартных изобарических поверхностях и уровнях особых точек, были приведены с помощью линейной интерполяции к

единой системе геометрических высот: 0 (уровень земной поверхности); 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.

Затем была применена процедура послойного усреднения данных наблюдений, используемая для практических расчетов пространственного распространения облака загрязняющих веществ и метеорологического обеспечения ракетных войск и артиллерии в условиях ведения боевых операций.

В качестве примера, в табл.1 приводятся среднеквадратические погрешности δ_{ξ} и вероятности P ошибок восстановления среднепослойных значений метеорологического поля менее или более заданного значения. Параметры δ_{ξ} и P рассчитаны для контрольной станций Смоленск, расположенной на западной окраине полигона №1 на расстоянии 206 км от ближайшей станции Сухиничи, где имеются данные аэрологических наблюдений (случай пространственной экстраполяции).

Таблица 1

Стандартные погрешности δ_{ξ} и вероятности P ошибок пространственной экстраполяции средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра менее и более заданной величины, проведенной на основе четырехмерной динамико-стохастической модели и алгоритма фильтра Калмана для контрольной станции Смоленск. Зима (1), лето (2).

Слой, Км	Вероятность, $P \times 10^2$						δ_{ξ}	
	$\Delta i \leq \pm 1$		$\Delta i \leq \pm 3$		$\Delta i > \pm 4$			
	1	2	1	2	1	2	1	2
	Температура, °С							
0-0,2	69	62	97	90	01	06	1,3	1,5
0-2,0	80	65	100	92	00	03	0,9	1,5
0-8,0	83	75	100	97	00	00	0,7	1,0
	Зональная составляющая скорости ветра, м/с							
0-0,2	79	77	97	97	01	00	1,0	1,1
0-2,0	58	58	93	88	03	05	1,5	1,8
0-8,0	60	56	90	80	05	08	1,8	2,1
	Меридиональная составляющая скорости ветра, м/с							
0-0,2	80	68	97	98	01	00	1,0	1,1
0-2,0	70	50	97	84	03	08	1,2	2,0
0-8,0	55	52	90	85	06	07	1,8	2,0

На основе анализа табл. 1 можно сказать, что предложенный алгоритм обеспечивает высокую точность пространственной экстраполяции средних в слое значений температуры и ортогональных составляющих скорости ветра. Независимо от сезона и слоя атмосферы среднеквадратические погрешности экстраполяции, варьируют в пределах 0,7-1,5 °С (для средней температуры) и 1,0-2,1 м/с (для ортогональных составляющих скорости среднего ветра).

В работе было проведено сравнение качества пространственной интерполяции, осуществленной с помощью разработанного алгоритма и на основе алгоритма калмановской фильтрации с упрощенной линейной динамико-стохастической моделью, предложенной ранее В.С. Комаровым и Ю.Б. Поповым, а также традиционного метода оптимальной интерполяции. Результаты сравнения представлены на рис. 1.

Анализ рис. 1 показывает, что выигрыш по точности предложенного алгоритма в сравнении с алгоритмом, использующим упрощенную динамико-стохастическую модель, и методом оптимальной экстраполяции составляет от 1,3 до 2,8 раза (для температуры) и от 1,1 до 1,8 раза (для ортогональных составляющих скорости ветра).

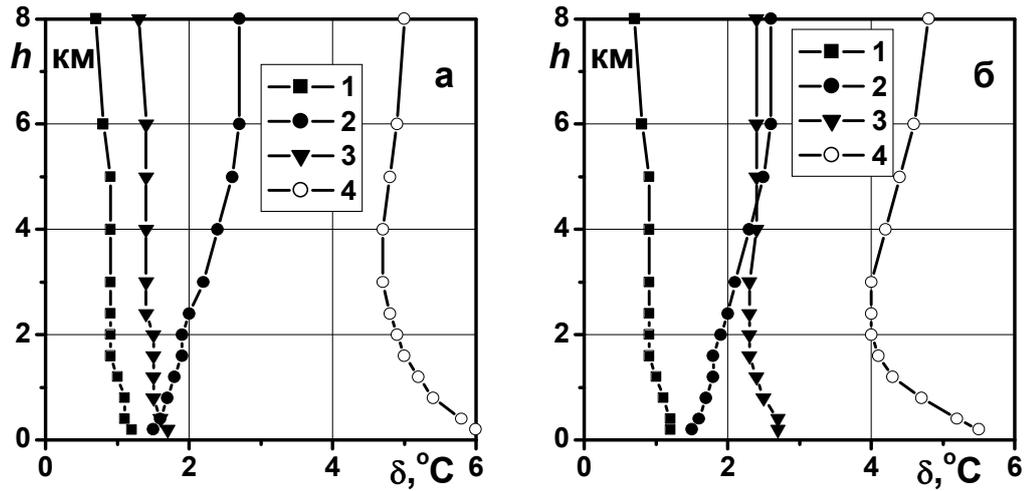
Четвёртая глава диссертационной работы посвящена разработке двумерной динамико-стохастической модели и методики ее использования в задаче сверхкраткосрочного прогноза полей метеорологических величин. Наряду с описанием математической модели и методики, в главе 4 рассматривается также и соответствующий алгоритм временного прогнозирования.

Прогностическая двумерная динамико-стохастическая модель может быть представлена следующим выражением:

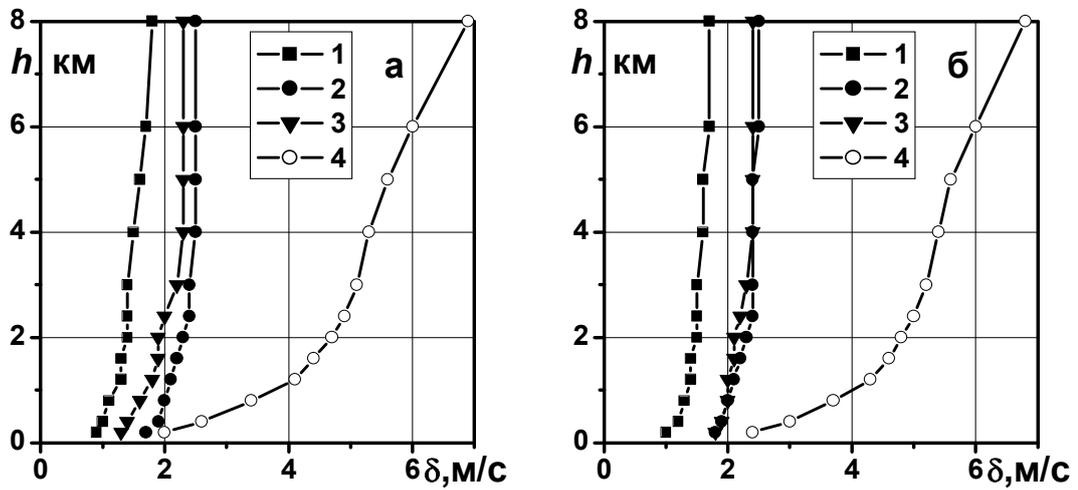
$$\xi_h(k) = \sum_{m=h-i}^{h+i} \sum_{j=1}^K d_{m,j} \cdot \xi_m(k-j) + \varepsilon_h(k), \quad (12)$$

где k – дискретное текущее время; h – высота прогноза; $\xi_h(k)$ и $\xi_m(k-j)$ – измерения метеорологического поля; m – номер текущего высотного уровня в пределах заданного слоя атмосферы от $h-i$ до $h+i$, т.е. высота слоя составляет $2i+1$ уровней; j – текущее значение дискретного времени в пределах

Температура (°C)



Зональная составляющая скорости ветра (м/с)



Меридиональная составляющая скорости ветра (м/с)

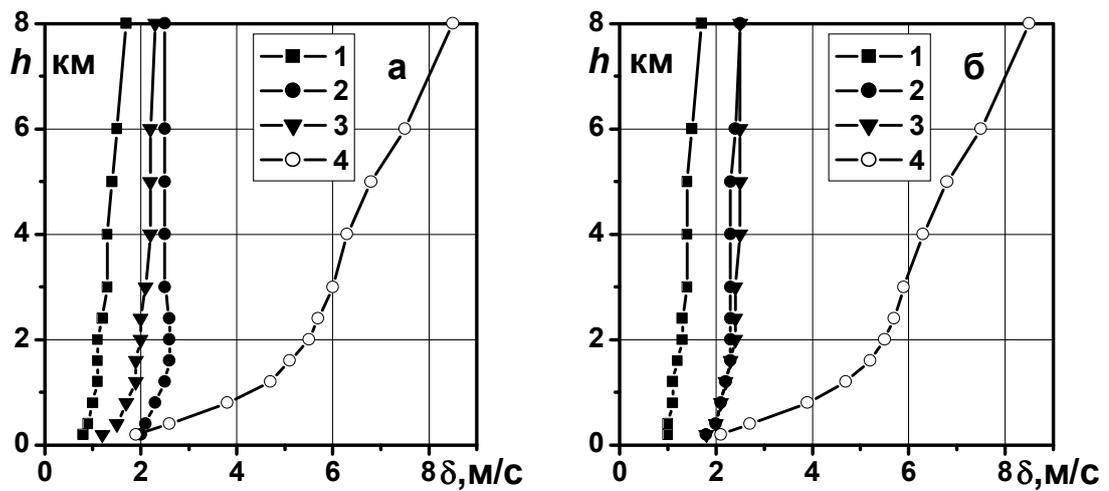


Рис.1 Зависимость от высоты среднеквадратичной погрешности δ пространственной экстраполяции средних в слое значений метеорологических параметров для Москвы (а) и Смоленска (б), проведенной на основе четырехмерной динамико-стохастической модели (1), упрощенной линейной модели (2), метода оптимальной интерполяции (3), а также соответствующие среднеквадратичские отклонения σ (4) (Зима).

интервала исходной последовательности, используемого в качестве предиктора для алгоритма фильтра Калмана (j изменяется от 1 до K и определяет размерность фильтра Калмана); $d_{m,j}$ – неизвестные параметры модели, подлежащие оцениванию; $\varepsilon_h(k)$ – невязка модели, которая определяет стохастичность рассматриваемых атмосферных процессов. Тем самым предусматривается несовершенство модели, описываемой выражением (12).

Наличие параметрической зависимости между значением поля ξ в момент времени k и предыдущие моменты времени наблюдения не позволяет напрямую воспользоваться выражением (12) для получения оптимальной линейной оценки, т.к. в этом выражении модельные параметры $d_{m,j}$ – неизвестны. Поэтому задача сверхкраткосрочного прогноза поля ξ распадается на два этапа. Такой подход аналогичен применению четырехмерной динамико-стохастической модели в задаче численного восстановления полей температуры и ветра, рассмотренной в главе 2.

Уравнение сверхкраткосрочного прогноза можно записать как:

$$\hat{\xi}_h(k+1) = \sum_{m=h-i}^{h+i} \sum_{j=0}^{K-1} \hat{d}_{m,j+1} \xi_m(k-j). \quad (13)$$

Здесь $\hat{\xi}_h(k+1)$ – прогностическая оценка поля; $\hat{d}_{m,j+1}$ – оцененные на предыдущем этапе параметры модели.

Необходимо отметить, что в выражениях (12) и (13) в качестве исходных данных могут браться как измеренные значения поля ξ , так и флуктуационные отклонения этого поля от некоторого среднего значения.

Для оценивания неизвестных параметров модели (12), т.е. $d_{m,j}$, можно задать систему разностных уравнений в матричном виде аналогично (8). Математическая модель измерений, по данным которых в алгоритме фильтра Калмана проводится оценка состояния системы, в общем случае описывается выражением (9), используемым в главе 2.

Каждый элемент матрицы наблюдений \mathbf{H}_k включает весовые коэффициенты. Введение таких коэффициентов позволяет учесть временную и вер-

тикальную корреляцию между отдельными значениями метеорологического поля, полученными в предшествующие моменты времени и на разных высотных уровнях, расположенных ниже и выше уровня прогноза в пределах рассматриваемого высотного слоя. Считая временные и вертикальные корреляционные связи для поля зависимыми, можно ввести соотношение вида:

$$\mu_{\xi}(\tau_j, \Delta h_m) = \exp\left(-\sqrt{\left(\frac{\tau_j}{\tau_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_m}{h_0}\right)^2}\right), \quad (14)$$

где $\mu_{\xi}(\tau_j, \Delta h_m)$ – весовой множитель; τ_j – интервал времени между двумя измерениями; Δh_m – толщина атмосферного слоя для m уровней; τ_0 и h_0 – радиусы временной и вертикальной корреляции соответственно.

Таким образом, каждый элемент матрицы \mathbf{N}_k нормируется на весовой множитель $\mu_{\xi}(\tau_j, \Delta h_m)$, обеспечивая выполнение условия, чтобы близкие к точке прогноза данные обладали большим вкладом, чем данные более удаленные от нее по высоте и во времени.

После определения всех элементов, входящих в выражение (8) и (9), задача оценивания параметров $d_{m,j}$ модели (12) решается с помощью линейного фильтра Калмана, обеспечивающего оценку элементов вектора состояния с минимальными среднеквадратическими ошибками.

В пятой главе приводятся результаты численных экспериментов по оценке качества алгоритма сверхкраткосрочного прогноза полей температуры и ортогональных компонент ветра в пограничном слое атмосферы, на основе двумерной динамико-стохастической модели.

Проверка точности предложенной в главе 4 методики, проводилась по отдельным сериям радиометрических (для температуры) и содарных (для ветра) измерений, полученных в 2004 г. в районе г. Томска (56,5°с.ш., 85°в.д.). При этом данные температуры, измеренные с помощью радиометра МТП-5, получены для высот 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 и 600 метров, а данные ветра, измеренные содаром «Волна-3», для высот 100, 150, 200 и 250 метров. Кроме того, данные о ветре были дополнены соответ-

ствующими измерениями, проведенными на метеорологической мачте, находящейся на территории Базового экспериментального комплекса Института оптики атмосферы СО РАН.

В данной главе также была проведена оценка интервала осреднения и периода дискретизации исходных последовательностей, которые представляли собой ряды временных отсчетов с периодами дискретизации 2 минуты для температуры и 17 секунд для ортогональных компонентов скорости ветра. В результате исследования было установлено, что при эмпирическом определении статистических характеристик атмосферной турбулентности используется осреднение по интервалу времени $\Delta t_{\text{ср}}$ порядка 10–30 мин. В дальнейшем, для оценки качества сверхкраткосрочного прогноза, исходная последовательность представляла собой массив данных, осредненных на временном интервале 30 минут.

Один из разделов главы 5 посвящен оптимизации исходного алгоритма сверхкраткосрочного прогноза. В качестве оптимизируемых параметров алгоритма прогноза рассматривались:

- длительность интервала непрерывной работы алгоритма фильтра Калмана до очередной инициализации;
- длительность интервала исходной последовательности, используемой в качестве предиктора в алгоритме сверхкраткосрочного прогноза;
- длительность интервала исходной последовательности, на котором производится оценка регулярной составляющей метеорологического поля в случае использования двухканальной схемы прогноза, т.е. в случае, когда результирующая оценка этого поля складывается из оценок его регулярной и флуктуационной составляющих.

И, наконец, рассматривалась также возможность построения алгоритма прогноза при использовании в фильтре Калмана как непосредственно самих измеренных значений поля, так и их отклонений от некоторой регулярной составляющей, которая оценивалась отдельно.

В табл.2 даются среднеквадратические ошибки сверхкраткосрочного прогноза температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, рассчитанные для ряда высотных уровней и заблаговременности $\tau=1 - 3$ ч. при использовании исходного и оптимизированного алгоритмов.

Анализ табл.2 показывает, что разработанный алгоритм может быть использован для решения задачи прогнозирования с малой заблаговременностью температуры и ортогональных составляющих скорости ветра. Кроме того, оптимизированный динамико-стохастический алгоритм, учитывающий все влияющие факторы, уменьшает среднеквадратическую ошибку прогноза в 1,4-2,2 раза в случае максимально взятой заблаговременности $\tau=3$ часа.

Таблица 2

Среднеквадратические погрешности δ_{ξ} сверхкраткосрочного прогноза температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра для различных значений заблаговременности τ , полученные при использовании оптимизированного (1) и исходного (2) алгоритмов по данным радиометрического и содарного зондирования в районе г. Томска.

Высота, м	Заблаговременность τ , ч					
	1,0		2,0		3,0	
	1	2	1	2	1	2
Температура, °С						
200	0,3	0,3	0,4	0,6	0,5	0,9
600	0,4	0,5	0,4	0,7	0,5	1,0
Зональный ветер, м/с						
100	0,8	1,2	1,0	1,6	1,1	1,9
250	1,0	1,8	1,1	2,6	1,3	2,9
Меридиональный ветер, м.с						
100	0,6	1,1	0,8	1,8	1,0	2,1
250	1,1	1,6	1,4	2,0	1,7	2,2

В заключении формулируются основные результаты проведенного исследования, которые состоят в следующем:

1) проанализировано современное состояние работ в области диагностики и прогноза полей метеорологических величин и выделено два основных перспективных методических подхода: вариационный и динамико-стохастический на основе фильтра Калмана;

2) разработана интерполяционная четырехмерная динамико-стохастическая модель процессов изменения мезомасштабных полей метеорологических величин в пространстве и во времени;

3) на основе предложенной интерполяционной модели и аппарата калмановской фильтрации разработаны новые методика и алгоритмы численного восстановления полей метеорологических величин в области мезомасштаба, в том числе и на территории, неосвещенной данными наблюдений, проводимого в условиях минимума исходной информации;

4) разработана двумерная динамико-стохастическая модель процессов эволюции полей метеорологических величин по высоте и во времени применительно к решению задачи сверхкраткосрочного прогноза с малой (до 3 ч.) заблаговременностью;

5) на основе прогностической двумерной динамико-стохастической модели и аппарата фильтра Калмана разработаны оригинальный метод и алгоритмы сверхкраткосрочного прогноза полей метеорологических величин с малой заблаговременностью (от 0,5 до 3 часов), проводимого по данным наблюдений только одной станции высотного зондирования;

б) проведены (на примере мезомасштабных полей температуры и ветра) численные эксперименты по оценке качества и эффективности разработанных алгоритмов восстановления и сверхкраткосрочного прогноза. Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать общие выводы:

-во-первых, предложенный алгоритм восстановления, разработанный на основе четырехмерной модели и аппарата калмановской фильтрации, обеспечивает повышение точности интерполяции в 1,3-2,8 раза и в 1,5-2,6 раза, по сравнению с использованием упрощенной динамико-стохастической модели или алгоритма оптимальной интерполяции соответственно.

-во-вторых, оптимизированный алгоритм сверхкраткосрочного прогноза, полученный на основе двумерной динамико-стохастической модели и аппарата калмановской фильтрации дает результаты прогнозирования при малой заблаговременности ($\tau \leq 3$ ч.), с точностью приемлемой для практического

использования, поскольку среднеквадратическая погрешность такого прогноза даже при $\tau=3$ ч. варьируется в пределах 0,5-0,7°C (для температуры) и 1,0-1,7 м/с (для ортогональных составляющих скорости ветра);

-в-третьих, высокая точность и эффективность разработанных алгоритмов восстановления и сверхкраткосрочного прогноза позволяет использовать их для решения различных прикладных задач и, в частности, таких, как оперативная диагностика и прогноз уровня загрязненности атмосферы в пределах ограниченных территорий (например, крупных городов или промышленных зон) и метеорологического обеспечения ракетных войск и артиллерии в условиях ведения локальных боевых операций.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Komarov V.S., Kurakov V.A., Lavrinenko A.V., Ilyin S.N., Popov Y.B., Popova A.I., Lomakina N.Y.* Improved method of spatial prediction of the atmospheric state parameters using the Kalman filter algorithm. // «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». X Joint International Symposium. Tomsk, 24-28 June 2003. Tomsk, 2003. P.124.
2. *Kurakov V.A., Komarov V.S., Lavrinenko A.V., Popov Yu.B., Popova A.I.* Alternative algorithms of temporal prediction of temperature and wind in the problem of atmospheric and ecological monitoring of limited areas. // «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». X Joint International Symposium. Tomsk, 24-28 June 2003. Tomsk, 2003. P.115.
3. *Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б., Попова А.И., Ильин С.Н., Кураков В.А., Роцин А.В.* Использование алгоритма фильтра Калмана в задачах пространственно-временного прогноза параметров состояния атмосферы. // Материалы докладов «Пятое Сибирское Совещание по климато-экологическому мониторингу», Томск, 25-27 июня 2003 г. ИОМ СО РАН., с. 81-84.

4. *Лавриненко А.В., Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б., Попова А.И.* Пространственная экстраполяция мезометеорологических полей температуры и ветра на основе четырехмерной смешанной динамико-стохастической модели в задачах атмосферно-экологического мониторинга ограниченных территорий. // «Окружающая среда и экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики», EESFEA-2003, Томск, 27-31 октября 2003 г. Материалы II Международной конференции. Том 1. Томск, 2003, с. 100-101.
5. *Лавриненко А.В., Комаров В.С.,* Пространственная экстраполяция параметров состояния атмосферы в области мезомасштаба с использованием четырехмерной динамико-стохастической модели и аппарата калмановской фильтрации. // Материалы докладов Юбилейной X рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск, 25-27 ноября 2003 г., Томск, 2003, с. 45–46.
6. *Лавриненко А.В., Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б., Попова А.И., Ильин С.Н.* Пространственная экстраполяция метеорологических полей в области мезомасштаба на основе четырехмерной смешанной динамико-стохастической модели и аппарата калмановской фильтрации. // Оптика атмосферы и океана, 2004, т. 17, № 8, с. 651–656.
7. *Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б.* Динамико-стохастический алгоритм пространственного прогнозирования метеорологических полей в области мезомасштаба на основе фильтра Калмана и малопараметрической смешанной модели. // Всероссийская научная конференция «Современные глобальные и региональные изменения геосистем». 18-21 октября 2004 г., Казань. Материалы докладов, 2004 г, с. 335-337.
8. *Лавриненко А.В., Комаров В.С., Одинцов С.Л., Креминский А.В., Кадыгров Е.Н., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б., Ильин С.Н., Попова А.И., Фролов Н.А.* Новый динамико-стохастический метод сверхкраткосрочного прогноза и опыт его применения в задаче предсказания значений темпе-

- ратуры и ветра в пограничном слое атмосферы. // XI Рабочая группа «Аэрозоли Сибири», 30 ноября – 3 декабря 2004 г., Томск. Тезисы, 2004, с. 67.
9. *Лавриненко А.В., Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б., Фролов Н.А.* Динамико-стохастический подход к диагностике состояния пограничного слоя атмосферы над недоступными наблюдениям районами Западной Сибири. // XI Рабочая группа «Аэрозоли Сибири», 30 ноября – 3 декабря 2004 г., Томск. Тезисы, 2004, с. 27.
 10. *Lavrinenko A.V., Komarov V.S., Kreminskii A.V., Lomakina N.Ya., Popov Yu.B.* Methodology of spatial extrapolation of the atmospheric state parameters on the mesoscale level using a Kalman filter algorithm and four-dimensional dynamic-stochastic model. // XI Joint International Symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». 23-26 June 2004, Tomsk. Proceedings, 2004, pp. 48-49.
 11. *Лавриненко А.В., Комаров В.С., Попов Ю.Б.* Методика сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы на основе алгоритма калмановской фильтрации и двумерной динамико-стохастической модели. // Оптика атмосферы и океана, 2005, т. 18, № 4, с. 344-348.
 12. *Комаров В.С., Ильин С.Н., Креминский А.В., Кадыгров Е.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я., Одинцов С.Л., Попов Ю.Б., Попова А.И., Федоров В.А.* Об опыте применения динамико-стохастического метода прогноза в задаче предсказания параметров состояния пограничного слоя атмосферы по данным радиометрических и содарных измерений. // Оптика атмосферы и океана, 2005, т. 18, № 5-6, с. 482-484.
 13. *Lavrinenko A.V., Komarov V.S., Kreminskii A.V., Lomakina N.Ya., Ilyin S.N., Odintsov S.L.* Investigation of the temporal correlation of wind velocity components in the atmospheric boundary layer. // XII Joint International Symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». 27-30 June 2005, Tomsk. Proceedings, 2005, pp. 68-69.
 14. *Лавриненко А.В., Ильин С.Н., Гладких В.А., Комаров В.С., Креминский А.В., Невзорова И.В., Попов Ю.Б., Попова А.И., Федоров В.А., Иссле-*

дование временной корреляции ортогональных составляющих скорости ветра в пограничном слое атмосферы по данным акустического зондирования. // Оптика атмосферы и океана, 2006, т. 19, № 1, с. 49–58.

15. *Лавриненко А.В.* Исследование динамико-стохастического алгоритма сверхкраткосрочного прогноза метеорологических полей. // Оптика атмосферы и океана, 2006, т. 19, № 10, с. 919–921
16. *Komarov V.S., Lavrinenko A.V.* Experience in application of acoustic sounding and radiometric data for supershort-term temperature and wind velocity forecast in the atmospheric boundary layer. ISARS, July 18-20, 2006, Garmisch-Partenkirchen, 2006. pp. 17-18.
17. *Komarov V.S., Lavrinenko A.V., Kreminskii A.V., Lomakina N.Ya., Popov Yu.B., Popova A.I.* New method of spatial extrapolation of meteorological fields on the mesoscale level using a Kalman filter algorithm for a four-dimensional dynamic-stochastic model. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007, Vol. 24, No. 2, p. 182-193.