

Киланова Наталья Владимировна

**Численное моделирование распространения
пассивной примеси в атмосфере с использованием
данных натуральных наблюдений**

05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2006

Работа выполнена в Институте вычислительных технологий СО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент Климова Екатерина Георгиевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Мальбахов Виталий Магометович,
доктор физико-математических наук
Шлычков Вячеслав Александрович

Ведущая организация: Институт мониторинга климатических и
экологических систем СО РАН, г. Томск.

Защита состоится 28 декабря 2006 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д 003.046.01 при Институте вычислительных технологий СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика М.А.Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ.

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН (проспект академика М.А.Лаврентьева, 6).

Автореферат разослан 25 ноября 2006г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук, профессор

Л.Б.Чубаров

Общая характеристика работы.

Актуальность.

В последней четверти XX века наблюдается резкое потепление климата Земли. Данное явление имеет частично естественный природный характер, отчасти обусловлено все увеличивающимся антропогенным влиянием. Одной из причин изменения климата планеты является увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере. Поэтому *актуальной* на сегодняшний день является задача оценки концентрации этих газов. Ведущая роль в решении этой задачи отведена математическому моделированию. В настоящее время проблему восстановления пространственно-временного распределения полей газовых примесей в атмосфере принято решать на основе алгоритмов совместного учета прогностических моделей и данных наблюдений о концентрации примесей, называемых алгоритмами усвоения данных.

Для увеличения точности вычисления концентрации примесей возникает необходимость оценки систематической ошибки модели и эмиссии примесей. Поэтому исследование вопросов оценки и разработка алгоритмов для решения подобных задач также являются *актуальными* в настоящее время.

Цель работы состоит в разработке методики усвоения данных наблюдений, основанной на динамико-стохастическом подходе, для решения проблемы моделирования распространения пассивной примеси в атмосфере с использованием данных натуральных наблюдений.

Научная новизна работы.

- Предложен новый алгоритм усвоения данных наблюдений в задаче переноса и диффузии пассивной примеси, основанный на предположении об эргодичности случайных полей ошибок прогноза. Проведены численные эксперименты, показывающие, что использование этого алгоритма позволяет улучшить точность оценки полей концентрации. Важным свойством предложенного алгоритма является его экономичность.
- Предложена новая методика оценки эмиссии пассивной примеси в процедуре усвоения данных для задачи переноса и диффузии примеси. Проведены численные эксперименты с модельными данными и трехмерной полулагранжевой моделью, которые показали, что предложенная методика позволяет оценивать значения эмиссии по данным наблюдения о концентрации пассивной примеси.

- Предложена новая методика оценки систематической ошибки в процедуре усвоения данных, основанной на алгоритме фильтра Калмана. Свойства методики проверены с помощью численных экспериментов с модельными данными.

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается применением математического аппарата теории оценивания, сравнением полученных результатов тестовых и модельных исследований с результатами других авторов.

Практическая ценность работы

Разработанные численные алгоритмы и реализующие их комплексы программ имеют практическую значимость и могут быть использованы для решения задач усвоения данных наблюдения о концентрации пассивной примеси. Рассмотренные алгоритмы позволяют улучшить точность полей концентрации пассивной примеси и обладают важным свойством экономичности. Предложенные в работе алгоритмы усвоения и оценки систематической ошибки модели могут быть также использованы при моделировании процессов в атмосфере и океане.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант ведущих научных школ России № 00-015-98543, грант № 04-05-64481).

На защиту выносятся:

1. Методика усвоения данных наблюдений для модели переноса и диффузии пассивной примеси с использованием динамико-стохастического подхода.
2. Алгоритмы усвоения данных наблюдений о концентрации, основанные на теории фильтра Калмана. Алгоритм совместной оценки концентрации и эмиссии пассивной примеси, а также алгоритм совместной оценки концентрации примеси и систематической ошибки модели, обобщающие алгоритм усвоения данных о концентрации.
3. Система усвоения данных о концентрации пассивной примеси в атмосфере, реализованная в виде комплекса прикладных программ, предназначенного для проведения численных экспериментов по оценке концентрации, а также ряда искомых параметров - эмиссии и систематической ошибки модели.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на X, XI, XII Рабочих группах “Аэрозоли Сибири” (г. Томск, 2003, 2004, 2005), Международных конференциях по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2004, 2006 (г. Томск),

Международной конференции “Сопряженные задачи механики, информатики и экологии” (г. Горно-Алтайск, 2004), V Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Новосибирск, 2004), Международной конференции и школе молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: “СITES-2005” (г. Новосибирск, 2005), V Международном симпозиуме “Контроль и реабилитация окружающей среды” (г. Томск, 2006).

Публикации.

Общий объем работ по теме диссертации составляет 15 работ (полный перечень публикаций содержится в диссертации). Из них 6 работ опубликованы в центральной печати, 9 изданы в сборниках тезисов. Работы, в которых содержатся основные результаты диссертации, приведены в конце автореферата (6 работ). Объем этих работ составляет 2.3 печатных листа. Вклад диссертанта 1.15 печатных листов. В том числе, 2 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для представления основных результатов диссертационной работы (общий объем 0.8, вклад диссертанта 0.4). При выполнении работ, опубликованных совместно с научным руководителем, диссертант принимала участие в обсуждении постановок задач, разработке численных алгоритмов, анализе полученных результатов, подготовке и представлении статей и докладов на конференциях. Ею самостоятельно выполнена программная реализация разработанных численных алгоритмов, проведены расчеты тестовых задач и серия численных экспериментов по оценке концентрации пассивной примеси, эмиссии пассивной примеси и систематической ошибки модели на основе алгоритмов усвоения данных наблюдений.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 62 наименований. Полный объем диссертации составляет 106 страниц, включая 50 рисунков и 3 таблицы. Каждая глава разбита на параграфы.

Содержание работы

Во **Введении** дано определение задачи усвоения данных наблюдений и выделено два подхода к решению этой задачи - динамико-стохастический и вариационный. Сформулированы постановка исследуемой проблемы, цель работы, а также актуальность задачи усвоения данных наблюдений о

пассивной примеси в атмосфере. Кроме того, во введении сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Приведено краткое описание содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена описанию модели переноса и диффузии пассивной примеси для Северного полушария. Глава состоит из пяти параграфов.

Параграф 1.1 представляет собой краткое введение главы 1. В нем приводится обзор работ, посвященных проблемам численного моделирования переноса аэрозолей в атмосфере и полулагранжеву методу решения таких задач.

В **параграфе 1.2** приведена подробная постановка задачи переноса и диффузии пассивной примеси в атмосфере Северного полушария.

Рассматривается трехмерная модель переноса и диффузии пассивной примеси в сферической системе координат. Уравнение переноса и диффузии примеси в атмосфере имеет вид:

$$\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial x}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial x}{\partial \varphi} + (w - w_g) \frac{\partial x}{\partial z} = \frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(k_1 \frac{\partial x}{\partial \lambda} \right) + \frac{1}{a^2 \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k_2 \cos \varphi \frac{\partial x}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_3 \frac{\partial x}{\partial z} \right) + f, \quad (1)$$

$$x(\lambda, \varphi, z, 0) = x^0(\lambda, \varphi, z), \quad (2)$$

$$x(\lambda, \varphi, z, t) = x(\lambda + 2\pi, \varphi, z, t), \quad (3)$$

$$x = x_G \quad \text{при} \quad \varphi = 0, \quad (4)$$

$$v \frac{\partial x}{\partial z} = \alpha (x - x_0) \quad \text{при} \quad z = b + h, \quad (5)$$

$$v \frac{\partial x}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z = H, \quad (6)$$

где λ -долгота, φ -широта, z -высота над уровнем моря, $x(\lambda, \varphi, z, t)$ -концентрация примеси, $\mathbf{V}=(u, v, w-w_g)$ - вектор скорости ветра с компонентами в направлениях λ , φ , z , соответственно, w_g - скорость гравитационного оседания, a -средний радиус Земли, k_1 , k_2 -коэффициенты турбулентного обмена в горизонтальном и k_3 - вертикальном направлениях, $f(\lambda, \varphi, t)$ - функция, описывающая размещение и мощность источников, $b(\lambda, \varphi)$ - функция, описывающая рельеф подстилающей поверхности, h - высота приземного слоя и H - верхняя граница расчетной области, параметр α характеризует взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью, x_0 -

концентрация примеси на подстилающей поверхности, которая вычисляется исходя из уравнения баланса примеси на подстилающей поверхности.

Задача рассматривается в области $D_t = G \times [0, T]$, где $G = S \times [b+h, H]$; $S = \{0 \leq \lambda \leq 2\pi; 0 \leq \varphi \leq \pi/2\}$.

Далее сформулирован метод решения представленной задачи, основанный на расщеплении по физическим процессам. При этом на каждом временном интервале $\Delta t = (t^j, t^{j+1})$ в области G решается задача переноса примеси по траекториям и задача турбулентной диффузии.

Параграф 1.3 главы 1 разделен на пункты 1.3.1 и 1.3.2. В пункте 1.3.1 подробно описана квазимонотонная полулагранжева схема решения уравнения переноса. Поскольку полулагранжева схема решения уравнения переноса не является монотонной, то при интерполяции используется процедура, позволяющая получать квазимонотонное решение [Bermejo R., Staniforth A. The conversion of semi-Lagrangian advection scheme to quasi-monotone scheme // Mon. Wea. Rev. 1992. Vol.120. P.2622-2632]. Пункт 1.3.2 посвящен изложению схемы решения уравнения, описывающего процесс турбулентной диффузии. Уравнение турбулентной диффузии аппроксимируется по схеме Кранка-Николсона. Приводится аппроксимация граничных условий (2)-(6). Для решения уравнения турбулентной диффузии используется метод расщепления по пространственным переменным. Полученные уравнения решаются методом факторизации, а именно циклической прогонкой по долготе λ , и прямыми прогонками по широте φ и высоте z .

В параграфе 1.4 описаны численные эксперименты с моделью. Приведены результаты тестовых расчетов и численных экспериментов по моделированию распространения пассивной примеси в атмосфере на основе разработанной модели (1)-(6). Для численного решения поставленной задачи задавалась широтно-долготная сетка с шагами $\Delta\lambda = \Delta\varphi = 2.5^\circ$ по горизонтали, по вертикали рассматривалось 15 неравномерно распределенных счетных уровней, отсчитываемых в метрах от уровня моря. Расчеты проводились на примере атмосферного газа метана. Начальные данные о климатическом распределении метана были предоставлены нам коллегами из ИВМиМГ СО РАН Крупчатниковым В.Н. и Крыловой А.И. [Крупчатников В.Н., Крылова А.И. Численное моделирование распределения метана по данным наблюдений на поверхности Земли // Оптика атмосферы и океана, 2000. Т.13, №6-7, с.622-626]. В численных экспериментах с трехмерной моделью были использованы данные объективного анализа Гидрометцентра России о полях

скоростей ветра, давления и влажности за 1-3 августа 2002 года. В результате проведения этой серии экспериментов были получены поля концентрации метана.

В параграфе 1.5 содержатся основные выводы главы 1.

Вторая глава посвящена алгоритмам усвоения данных о пассивной примеси, основанным на теории фильтра Калмана, и комплексу программ, реализующему эти алгоритмы.

Параграф 2.1 является вводным. В **параграфе 2.2** описан дискретный алгоритм фильтра Калмана. Этот алгоритм позволяет получить оптимальную оценку концентрации в узлах расчетной сетки по всем имеющимся данным наблюдений за определенный промежуток времени и значениям концентрации, полученным по модели (1)-(6). Такая оценка называется анализом. Далее условимся, что момент времени, когда осуществляется шаг анализа, будем называть моментом усвоения данных.

При реализации алгоритма фильтра Калмана возникает проблема расчета матриц ковариаций ошибок прогноза, связанная с большой размерностью этих матриц. Эта проблема может быть решена либо использованием упрощенных операторов для расчета матриц ковариаций ошибок прогноза, либо применением для этого ансамблевого подхода. Алгоритмы усвоения данных наблюдений, в которых есть какие-либо неточности в задании или вычислении ковариационных матриц (по сравнению с классическим алгоритмом фильтра Калмана), называются субоптимальными алгоритмами усвоения данных.

В параграфе 2.3 предлагаются два подхода для расчета ковариационной матрицы ошибок прогноза. Первый подход состоит в использовании для расчета матрицы ковариаций ошибок прогноза упрощенного оператора модели. При этом делается предположение о том, что ошибки прогноза на разных вертикальных уровнях не коррелируют друг с другом, тогда матрица ковариаций ошибок прогноза становится блочно-диагональной. В этом случае на каждом уровне по высоте каждый блок можно рассчитывать по двумерной модели переноса (шаг диффузии в расчете опускается). Вторым подходом базируется на предположении об эргодичности случайных полей ошибок прогноза, то есть при вычислении характеристик этих полей теоретико-вероятностное осреднение можно заменить осреднением по времени. В этом случае рассматривается дополнительное уравнение для вычисления ошибки прогноза по модели. При этом, в отличие от классического алгоритма фильтра Калмана, матрица ковариаций ошибок прогноза вычисляется по формуле

$$P_k^f = \overline{\Delta x_k (\Delta x_k)^T} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta x_i (\Delta x_i)^T, \quad (7)$$

где $\Delta x_k = x_k^t - x_k^f$ - ошибка прогноза в момент времени t_k , x_k^t - "истинная" концентрация, x_k^f - прогноз концентрации по модели в этот момент времени.

Черта сверху означает осреднение по времени.

Параграф 2.4 посвящен комплексу программ, реализующему предложенные в параграфе 2.3 алгоритмы. В **пункте 2.4.1** подробно представлена система усвоения данных наблюдений, основанная на модели переноса и диффузии пассивной примеси. Приводится блок-схема этой системы. С помощью разработанного комплекса программ проведены численные эксперименты с использованием субоптимальных алгоритмов усвоения данных, базирующихся на первом и втором подходе параграфа 2.3. В **пункте 2.4.2** представлена таблица, в которой указаны особенности этапов реализации каждого из предложенных алгоритмов. В **пункте 2.4.3** приводится описание основных программных модулей на примере реализации субоптимального алгоритма 2, то есть алгоритма усвоения данных наблюдений о концентрации, основанного на втором подходе (параграф 2.3).

Параграф 2.5 посвящен описанию численных экспериментов по усвоению данных о концентрации пассивной примеси.

Первый эксперимент заключался в применении субоптимального алгоритма фильтра Калмана с вычислением матрицы ковариаций согласно подходу 1 из параграфа 2.3. Расчеты проводились на двое суток с усвоением каждые 12 часов. Начальное поле прогноза концентрации получалось из исходного поля концентрации путем наложения на последнее случайной ошибки, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией, равной уровню ошибок концентрации (10% от среднего значения концентрации по всей расчетной области). В последующие моменты времени прогноз поля концентрации давался по модели (1)-(6).

В моменты усвоения использовались моделируемые данные. Прогноз на 48 часов по исходному полю концентрации считался "истинным" полем концентрации. Данные наблюдений моделировались в предполагаемых точках наблюдений путем наложения на "истинное" поле случайной ошибки, распределенной по нормальному закону с математическим

ожиданием, равным нулю, и дисперсией, равной уровню ошибок концентрации.

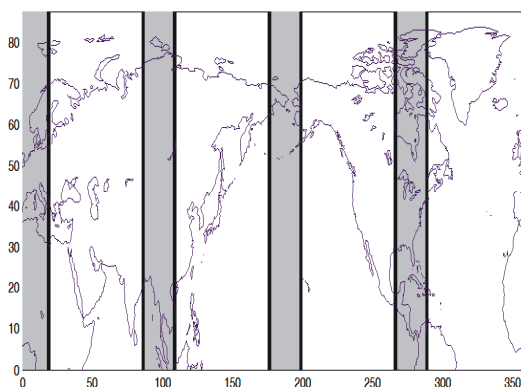


Рис.1. Моделируемое распределение данных наблюдений по пространству.

На рис.1 приведено распределение моделируемых данных наблюдений по пространству. В каждый из четырех моментов усвоения данных задавалась информация в одной из четырех полос (в соответствующих узлах широтно-долготной сетки). Таким образом, каждая вертикальная полоса соответствует области, в которой задаются данные в 12, 24, 36 и 48 часов, соответственно.

В начальный момент времени задавалась матрица ковариаций ошибок прогноза. Матрица ковариаций ошибок модели считалась нулевой.

В результате проведения представленного выше численного эксперимента были получены поля концентрации метана, а также теоретическая оценка точности алгоритма фильтра Калмана - след матрицы ковариаций ошибок прогноза. Показано его убывание с каждым шагом анализа.

Второй эксперимент заключался в реализации алгоритма, основанного на фильтре Калмана, с вычислением матрицы ковариаций согласно подходу 2 из параграфа 2.3.

Так же, как и в предыдущем эксперименте, производился прогноз полей концентрации по модели. Аналогично моделировались данные наблюдений. Ввиду того, что, согласно подходу 2 из параграфа 2.3, матрица ковариаций вычислялась по формуле (7), в алгоритм усвоения данных было добавлено уравнение для ошибки прогноза. Задавалась начальная ошибка оценки концентрации порядка 10% от среднего значения концентрации. В последующие моменты времени прогноз поля ошибки концентрации вычислялся так же, как и прогноз поля самой концентрации (A -дискретный аналог оператора модели):

$$\Delta x_k^f = A \Delta x_{k-1}^f \quad (8)$$

В моменты усвоения вычислялась матрица ковариаций ошибок прогноза по формуле (7), в которой использовались все 48 полей ошибки концентрации, полученные за 12 часов (количество времени между

моментами усвоения). Далее находились значения анализа концентрации x_k^a (шаг анализа). Поле ошибки на шаге анализа рассчитывалось по формуле

$$\Delta x_k^a = \Delta x_k^f - P_k^f M_k^T (M_k P_k^f M_k^T + R_k)^{-1} (y_k^o - M_k x_k^f). \quad (9)$$

Здесь M_k - матрица интерполяции из узлов сетки в точки наблюдения, R_k - матрица ковариаций ошибок наблюдения, y_k^o - вектор наблюдений в момент времени t_k , индекс T обозначает транспонирование. Матрица ковариаций ошибок модели задавалась такой же, как и в предыдущем эксперименте. В результате проведения численных экспериментов было показано, что точность оценки концентрации близкая у обоих алгоритмов. Однако, подход 2 основан на более реалистичных предположениях. Кроме того, субоптимальный алгоритм усвоения данных, основанный на втором подходе параграфа 2.3, является более экономичным. Процессорное время, затраченное на проведение численного эксперимента по усвоению данных о концентрации с использованием субоптимального алгоритма 2 в 3.25 раза меньше процессорного времени, необходимого для численного эксперимента с алгоритмом 1. Поэтому последующие численные эксперименты проводились на основе второго субоптимального алгоритма.

Последний численный эксперимент, описанный в параграфе 2.5, проводился с целью оценки поля концентрации метана по реальным данным спутниковых наблюдений UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) за 27-29 августа 2002 года. Данные размещены на сайте [<http://haloedata.larc.nasa.gov>]. Приводятся описание проведенного численного эксперимента и результаты - поля концентрации метана в моменты времени 24 часа и 48 часов, полученные с помощью алгоритма усвоения с расчетом матрицы ковариаций ошибок прогноза по формуле (7).

В параграфе 2.6 сформулированы основные результаты главы 2.

В **Третьей главе** предлагаются методики оценки эмиссии пассивной примеси и оценки систематической ошибки модели. Глава состоит из шести параграфов.

В параграфе 3.1 приведено введение к главе 3. **Параграф 3.2** посвящен описанию алгоритма совместной оценки концентрации и эмиссии пассивной примеси, основанного на фильтре Калмана. Этот алгоритм позволяет по данным наблюдений о концентрации пассивной примеси и прогнозу по модели получить оценку полей концентрации и эмиссии.

Пусть "истинное" поле концентрации задается в виде:

$$x_k^t = Ax_{k-1}^t + \eta_{k-1}^t + \varepsilon_{k-1}, \quad (10)$$

$$\eta_k^t = \eta_{k-1}^t, \quad (11)$$

где x_k^t - "истинная" концентрация метана в момент времени t_k , η_{k-1}^t - "истинная" эмиссия метана в момент времени t_{k-1} , ε_{k-1} - случайный вектор "шумов" модели.

Прогноз концентрации по модели x_k^f (предварительная оценка поля концентрации) зададим следующим образом

$$x_k^f = Ax_{k-1}^f + \eta_{k-1}^f, \quad (12)$$

$$\eta_k^f = \eta_{k-1}^f, \quad (13)$$

где η_{k-1}^f - эмиссия метана в момент времени t_{k-1} .

Наряду с исходным уравнением (12) зададим уравнение для ошибок прогноза концентрации $\Delta x_k^f = x_k^t - x_k^f$ и ошибок эмиссии $\Delta \eta_k^f = \eta_k^t - \eta_k^f$:

$$\Delta x_k^f = A\Delta x_{k-1}^f + \Delta \eta_{k-1}^f + \varepsilon_{k-1}, \quad (14)$$

$$\Delta \eta_k^f = \Delta \eta_{k-1}^f. \quad (15)$$

Матрица ковариаций ошибок прогноза вычисляется по формуле (7). Матрица кросс-ковариаций ошибок концентрации и эмиссии оценивается следующим образом:

$$\tilde{P}_k^f = \overline{\Delta x(\Delta \eta)^T} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta x_i^f (\Delta \eta_i^f)^T. \quad (16)$$

В формулах (7) и (16) величина N -количество шагов по времени между двумя моментами усвоения данных.

Оценка полей концентрации и эмиссии в момент усвоения рассчитывается по формулам

$$x_k^a = x_k^f + P_k^f M_k^T (M_k P_k^f M_k^T + R_k)^{-1} (y_k^o - M_k x_k^f), \quad (17)$$

$$\eta_k^a = \eta_k^f + \tilde{P}_k^f M_k^T (M_k P_k^f M_k^T + R_k)^{-1} (y_k^o - M_k x_k^f), \quad (18)$$

$$\Delta x_k^a = \Delta x_k^f - P_k^f M_k^T (M_k P_k^f M_k^T + R_k)^{-1} (y_k^o - M_k x_k^f), \quad (19)$$

$$\Delta \eta_k^a = \Delta \eta_k^f - \tilde{P}_k^f M_k^T (M_k P_k^f M_k^T + R_k)^{-1} (y_k^o - M_k x_k^f). \quad (20)$$

В параграфе 3.3 приводятся постановки численных экспериментов по оценке эмиссии, а также результаты проведенных экспериментов.

Первая серия экспериментов проводилась с алгоритмом усвоения из параграфа 3.2, основанном на модели переноса и диффузии пассивной примеси без учета орографии земной поверхности. Аналогично экспериментам, описанным в параграфе 2.5, были использованы данные объективного анализа Гидрометцентра России о полях скорости и направлении ветра за 1-3 августа 2002 года, а также начальное распределение концентрации метана.

В первом эксперименте в начальный момент времени задавалось значение “истинной” эмиссии метана в каждой точке сетки по горизонтали на двух нижних расчетных уровнях по вертикали равное $\tilde{\eta} = 9.57 \times 10^{-3}$ ppm [Болин Б., Деес Б.Р., Ягер Дж., Уоррик Р. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 557с]. Согласно формуле (11) “истинная” эмиссия не менялась по времени между моментами усвоения.

Предварительная оценка эмиссии $\tilde{\eta}^f$ в начальный момент времени бралась равной нулю, в этом случае начальная ошибка оценки эмиссии

$$\Delta \eta_0^f = \tilde{\eta} - \tilde{\eta}^f.$$

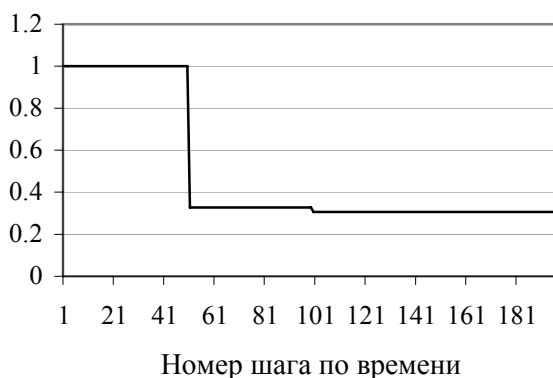


Рис.2. Относительная ошибка оценки эмиссии.

Оценка поля эмиссии производилась в процессе усвоения данных по формуле (18).

На рис.2 приведена относительная ошибка оценки эмиссии метана. По оси абсцисс отложены номера шагов по времени. Из этого рисунка видно, что ошибка оценки эмиссии в момент времени 48 часов составила около 30%.

Второй численный эксперимент заключался в оценке эмиссии метана, но, в отличие от первого эксперимента “истинное” значение поля эмиссии задавалось не в каждой точке по горизонтали, а в отдельном регионе Северного полушария, а именно на территории 27.5° с.ш.- 35° с.ш, 95° в.д.- 115° в.д. (также на двух нижних расчетных уровнях по вертикали). При

проведении этого эксперимента также вычислялась относительная ошибка оценки эмиссии на территории, где задавалась “истинная” эмиссия. Как и в предыдущем эксперименте, относительная ошибка оценки эмиссии составила около 30%.

Для проведения третьего численного эксперимента были взяты данные об “истинной” эмиссии [Boden T.A., Kaiser D.P., Sepanski R.J., Stoss F.W. Trends’93: A Compendium of Data on Global Change. Tennessee, 1994. 1012p]. На рис.3 представлено “истинное” поле эмиссии. Ввиду того, что данные об “истинной” эмиссии распределены неравномерно по пространству, данные наблюдений моделируются тоже неравномерно. Распределение моделируемых данных наблюдений представлено на рис.4.

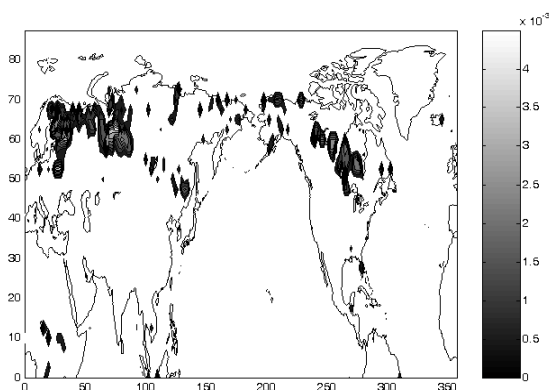


Рис.3. Данные об эмиссии метана (ppm).

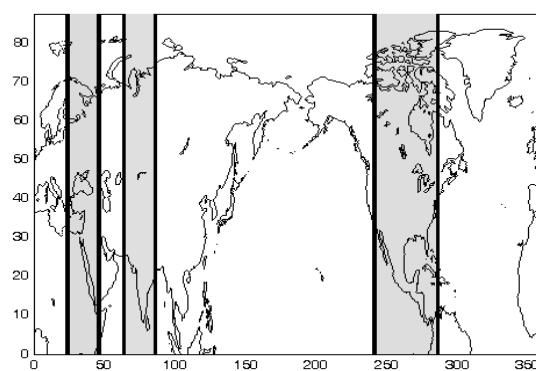


Рис.4. Распределение по пространству моделируемых данных наблюдений в эксперименте 3.

В этом эксперименте начальное оцениваемое поле эмиссии было взято равным нулю, и задавалась ненулевая ошибка эмиссии. Аналогично второму эксперименту проводилась оценка концентрации и оценка эмиссии по формулам (17) и (18), соответственно.

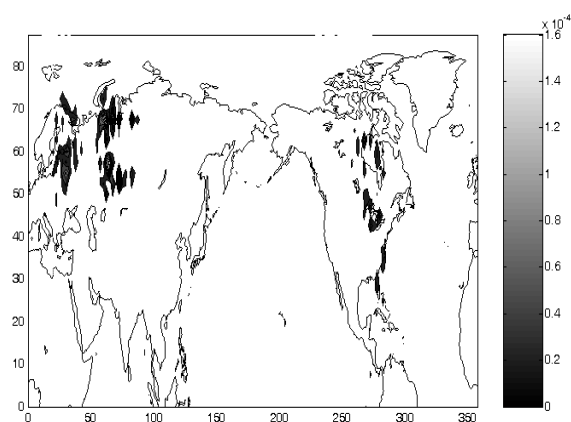


Рис.5. Восстановленное поле эмиссии в 48 часов (ppm).

В результате проведения данного численного эксперимента получен ряд оценок, а также поля концентрации и эмиссии. На рис.5 приведено восстановленное по данным наблюдений поле эмиссии. Из этого рисунка видно, что отличные от нуля значения эмиссии появляются в областях, где моделируются данные наблюдений. Их возникновение обусловлено наличием информации об источниках в данных наблюдений.

Следует заметить, что величина восстановленной эмиссии существенно отличается от реальной. Это связано с тем, что начальное приближение $\eta_0^f = 0$. Для улучшения точности требуется задание априорной информации об эмиссии. С целью получения более точных оценок эмиссии был проведен четвертый численный эксперимент.

В четвертом эксперименте было сделано предположение, что эмиссия изменяется по следующему закону

$$\eta_k = \tilde{\eta}(1 + \delta\eta_k), \quad (21)$$

где $\tilde{\eta}$ - некоторое фоновое значение эмиссии, $\delta\eta_k$ - значение поправочного множителя в момент времени k [Heemink A.W., Segers A.J. Modeling and prediction of environmental data in space time using Kalman filtering // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2002. P.225-240]. При этом

$$\delta\eta_{k+1} = \alpha\delta\eta_k + \chi_k \sqrt{1 - \alpha^2}, \quad (22)$$

где $\alpha = 0.95$, χ_k - нормально распределенная случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией 0.01.

В начальный момент времени было задано действительное поле эмиссии и начальная оценка поля эмиссии. В моменты усвоения концентрация и значение поправочного множителя оцениваются по формулам, аналогичным (17), (18). Вычисление матрицы кросс-ковариаций ошибок прогноза концентрации и поправочного множителя производилось по формуле (16).

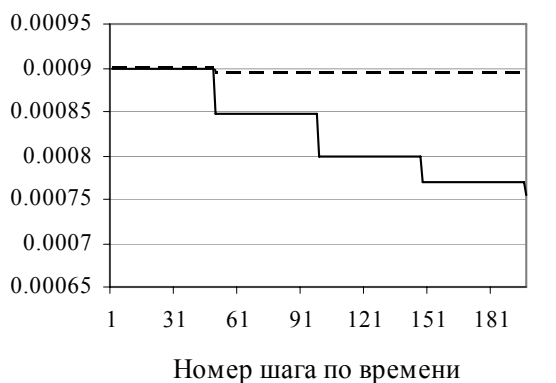
В результате проведения данного численного эксперимента были получены оценки среднеквадратической ошибки концентрации и среднеквадратической ошибки поправочного множителя эмиссии. Показано, что в последних двух численных экспериментах порядок убывания среднеквадратической ошибки эмиссии один (в эксперименте 3 он составил 4%, в эксперименте 4 - 5% от начального значения среднеквадратической ошибки эмиссии). Общий уровень ошибки поля концентрации ниже в эксперименте 4, чем в эксперименте 3.

В параграфе 3.4 описан алгоритм совместной оценки концентрации и систематической ошибки модели, основанный на фильтре Калмана. Этот алгоритм имеет достаточно много общего алгоритмом, представленным в параграфе 3.2. Основные различия этих алгоритмов заключаются в областях задания и оценки искомых параметров и размерности оцениваемого вектора.

В параграфе 3.5 описаны численные эксперименты с моделируемыми данными по оценке систематической ошибки модели q_k .

В первом эксперименте задавалось начальное “истинное” значение систематической ошибки, а также начальная ошибка оценки параметра. Предварительная оценка систематической ошибки равна нулю. Данные наблюдений моделировались в моменты наблюдений в 12 часов, 24 часа, 36 часов, 48 часов с распределением по пространству, представленным на рис.1. Аналогично численным экспериментам, описанным в параграфе 2.3, были использованы данные объективного анализа Гидрометцентра России о полях скорости и направлении ветра, давления и влажности за 1-3 августа 2002 года, а также начальное распределение концентрации метана.

Для получения оценки концентрации метана в процессе усвоения данных задавалась начальная ошибка оценки концентрации. В процессе усвоения были получены оценки концентрации и систематической ошибки модели. Показано, что среднеквадратическая ошибка оценки параметра q_k убывает в процессе усвоения данных наблюдений. Аналогично ведет себя среднеквадратическая ошибка оценки концентрации.



— График 1 - - - - График 2

Рис.6. Среднеквадратическая ошибка оценки параметра.

График 1- эксперимент с равномерным моделированием данных.

График 2-данные о концентрации моделируются в точках.

Был проведен численный эксперимент по оценке систематической ошибки, когда данные наблюдений о концентрации моделировались в точках реальных спутниковых наблюдений [<http://haloedata.larc.nasa.gov>]

(эксперимент 2). По вертикали данные моделировались на четырех верхних уровнях. При проведении численного эксперимента были получены оценки среднеквадратической ошибки концентрации и среднеквадратической ошибки параметра q_k . Из результатов численных экспериментов 1 и 2 видно, что существует зависимость между количеством данных наблюдений и

скоростью убывания среднеквадратических ошибок оцениваемых величин. В первом численном эксперименте в каждый момент усвоения данные моделировались в 2880 узлах сетки, во втором эксперименте - в 32 точках реальных спутниковых наблюдений. На рис.6 приведены среднеквадратическая ошибка оценки искомого параметра, полученная в результате проведения численного эксперимента 1 и эта же величина, полученная при проведении эксперимента 2. Как видно из этого рисунка,

более точную оценку среднеквадратической ошибки параметра q_k удалось получить в результате проведения первого численного эксперимента.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Разработана методика усвоения данных наблюдений для модели переноса и диффузии пассивной примеси с использованием динамико-стохастического подхода.
2. Предложен субоптимальный алгоритм оценки концентрации пассивной примеси, основанный на теории фильтра Калмана, в котором матрица ковариаций ошибок прогноза вычисляется, исходя из предположения об эргодичности случайных полей ошибок прогноза. Предложен субоптимальный алгоритм оценки эмиссии пассивной примеси, а также алгоритм оценки систематической ошибки модели в процедуре усвоения данных наблюдений о концентрации примеси, основанные на теории фильтра Калмана.
3. Разработана система усвоения данных наблюдений, представляющая собой комплекс прикладных программ, предназначенных для решения задачи оценки концентрации пассивной примеси. Комплекс программ основан на модели переноса и диффузии пассивной примеси для Северного полушария. Он реализует предложенные в работе субоптимальные алгоритмы усвоения данных наблюдений о концентрации, и позволяет выполнять математическое моделирование процесса распространения пассивной примеси в атмосфере.
4. Проведены численные эксперименты по оценке концентрации метана, эмиссии, а также систематической ошибки модели, которые показали эффективность предложенных в работе алгоритмов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Климова Е.Г., Киланова Н.В. Численные эксперименты по оценке эмиссии метана на основе системы усвоения данных о пассивной примеси в атмосфере Северного полушария // Оптика атмосферы и океана, 2006. №11. С.961-964.
2. Киланова Н.В., Климова Е.Г. Численные эксперименты по оценке систематической ошибки модели в задаче усвоения данных о концентрации пассивной примеси // Вычислительные технологии, 2006. Т.11, №5. С.32-40.
3. Климова Е.Г., Киланова Н.В. Методика усвоения данных наблюдений в задаче моделирования состояния окружающей среды // Материалы V

Международного симпозиума “Контроль и реабилитация окружающей среды”, 2006, г. Томск. С.113-115.

4. Климова Е.Г., Киранова Н.В. Восстановление пространственно-временного распределения полей концентрации пассивной примеси по данным измерений и математической модели распространения примеси в атмосфере // Материалы Шестого Сибирского совещания по климатоэкологическому мониторингу, 2005, г. Томск. С.556-564.

5. Киранова Н.В., Климова Е.Г. Оценка полей концентрации метана над Северным полушарием по данным измерений и модели переноса и диффузии пассивной примеси // Вычислительные технологии. 2005. Спец. выпуск Тр. Междунар. конф. CITES-2005. С.132-137.

6. Климова Е.Г., Киранова Н.В. Усвоение данных наблюдений в задаче переноса и диффузии пассивной примеси // География и природные ресурсы. 2004. Спец. выпуск Тр. Междунар. конф. ENVIRROMIS-2004. Новосибирск, 2004. С.175-180.

Подписано в печать

23.11.2006

Формат бумаги 60×86×1/16

Объем 1.2 п.л.

Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано в ЗАО РИЦ “Прайс-Курьер”,
630090, г.Новосибирск, пр.Академика Лаврентьева, 6