

На правах рукописи

Богословский Николай Николаевич

**Вариационное усвоение приземной
температуры и инициализация почвенных
переменных для полулагранжевой глобальной
модели численного прогноза погоды**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2008

Работа выполнена в Институте вычислительной математики РАН

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,
Толстых М.А.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор Залесный В.Б.
Кандидат физико-математических наук,
доцент Курзенева Е.В.

Ведущая организация: Институт Вычислительных
Технологий СО РАН

Защита состоится «_____» _____ 2008 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.045.01 в *Институте вычислительной математики РАН*, расположенном по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д.8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института вычислительной математики РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Бочаров Г.А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. За последние десятилетия произошло большое продвижение вперед во многих научных дисциплинах, занимающихся изучением Земли. Это произошло благодаря лучшему пониманию протекающих процессов и значительному увеличению количества проводимых наблюдений. Нигде это так хорошо не проявилось, как в метеорологии, где точность прогнозов на три дня сейчас такая же, как точность прогноза на одни сутки двадцать лет назад. Несмотря на эти улучшения, требуется дальнейшее повышение точности прогноза. Например, как и ранее, сейчас очень сложно дать достаточно точный прогноз количества осадков, особенно в летнее время.

Первые попытки проведения численного прогноза были сделаны еще в 1916 году, однако лишь в 1940 году И.А.Кибель на основе разложения уравнений движения бароклиной атмосферы по малому параметру математически корректно ввел квазигеострофическое приближение, построил первую прогностическую модель и рассчитал с помощью арифмометра первый численный прогноз барического поля для Евразии.

Все современные системы численного прогноза погоды состоят не только из прогностической модели, ответственной за воспроизведение динамики глобальной атмосферной циркуляции, но и из системы усвоения реальных данных наблюдений, применяемой для оценки текущего состояния атмосферы. Основная цель усвоения данных в метеорологии — определение начального состояния прогностической модели при помощи комбинирования информации данных наблюдений с модельным решением.

Задача определения начального состояния прогностической модели является очень трудоемкой с вычислительной точки зрения. Например, при разрешении модели численного прогноза погоды по горизонтали $0,72^\circ \times 0,9^\circ$, размерность любого двумерного поля составляет 10^5 . Поэтому разработка и реализация эффективных алгоритмов усвоения данных наблюдений для инициализации начальных полей (задания начальных значений) имеет такую же важность, как и разработка и совершенствование самих прогностических моделей, особенно для их применения в оперативном режиме.

Цель диссертационной работы. Основная цель диссертационной работы состоит в разработке алгоритма усвоения данных наблюдений температуры воздуха на уровне 2 метра (приземная температура) для глобальной полулагражевой модели численного прогноза погоды. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Разработка и программная реализация вариационного алгоритма для усвоения реальных данных наблюдений приземной температуры.

2. Практическая реализация схемы коррекции температуры и влагосодержания поверхностного и глубинного слоя почвы (далее почвенные переменные), согласованной с параметризацией процессов тепло и влагообмена на

поверхности суши с учетом растительности ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere - Взаимодействие почвы, биосферы и атмосферы).

3. Исследование влияния параметров задания ковариационной матрицы ошибок поля первого приближения на точность расчета анализов и прогнозов. Проведение численных экспериментов.

4. Распараллеливание алгоритма вариационного усвоения данных наблюдений для применения его в оперативном режиме в ГУ "Гидрометцентр России".

Научная новизна работы

- Впервые в России разработан алгоритм вариационного усвоения данных наблюдений температуры воздуха на уровне 2 метра.
- Впервые в России реализована схема усвоения почвенных переменных (температура и влагосодержание поверхностного и глубинного слоя почвы) для модели численного прогноза погоды.
- Проведено исследование влияния параметров (разность высот, маска "суша— море") задания ковариационной матрицы ошибок поля первого приближения на точность расчета анализов и прогнозов.
- Разработана параллельная версия алгоритма вариационного усвоения данных наблюдений с использованием технологий MPI, OpenMP и гибридной технологии (MPI+OpenMP).

Практическая значимость работы

- Создан программный комплекс для решения задачи усвоения данных наблюдений приземной температуры и коррекции почвенных переменных. Данный программный комплекс, совместно с глобальной полулагранжевой моделью численного прогноза погоды, с 1 ноября 2007 года проходит оперативные испытания в ГУ "Гидрометцентр России".
- Реализовано распараллеливание алгоритма вариационного усвоения с использованием гибридной технологии. Показано преимущество применения гибридной технологии на современных вычислительных системах.
- В результате применения вариационного алгоритма усвоения оперативных данных наблюдений приземной температуры и схемы инициализации почвенных переменных, удалось уменьшить среднеквадратичную ошибку прогноза температуры на уровне 2 метра в глобальной полулагранжевой модели численного прогноза погоды с заблаговременностями прогноза до 72 часов в среднем на 2,2 градуса по территории Азии, 1,7 градуса по территории России и 0,3 градуса по территории Европы для июня 2007 года.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на научных семинарах Института Вычислительной Математики РАН, ГУ "Гидрометцентр России" и на следующих конференциях:

- Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS -2006, Томск, Россия, 1-8 июля 2006 года,
- Вторая конференция молодых ученых национальных гидрометслужб государств-участников СНГ: „Новые методы и технологии в гидрометеорологии“, Росгидромет, Москва, Россия, 2-3 октября 2006 года,
- 49-ая научная конференции МФТИ, Москва, Россия, 24-25 ноября 2006 г.,
- Международная конференция и школа молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: „CITES-2007“, Томск, Россия, 14-25 июля 2007 года.
- Всероссийская научная конференция „Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач“, Новороссийск, Россия, 22-27 сентября 2008 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 статьи в реферируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 4 работы в сборниках тезисов и 1 работа в периодическом сборнике трудов.

Личный вклад автора. Вклад автора в совместные работы заключается в:

- разработке алгоритма вариационного усвоения данных наблюдений приземной температуры;
- разработке параллельной версии алгоритма вариационного усвоения с использованием технологий MPI, OpenMP и гибридной технологии (MPI + OpenMP);
- разработке программного комплекса, реализующего параллельный алгоритм вариационного усвоения данных наблюдений приземной температуры воздуха и схему коррекции почвенных переменных;
- проведении численных экспериментов и изучение влияния параметров задания ковариационной матрицы ошибок поля первого приближения;

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации — 142 страницы, она содержит кроме основного текста 39 рисунков и список литературы из 110 наименований.

Содержание работы

Во Введении отображена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели. Показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведено краткое описание различных подходов к решению задачи усвоения данных наблюдений. Представлен обзор методов усвоения данных наблюдений, применяемых в метеорологических службах различных стран мира. Сделанный в данной главе обзор показывает, что к настоящему времени создано достаточно много различных математических подходов к задаче усвоения данных наблюдений. Наиболее передовые метеорологические центры используют вариационный алгоритм усвоения данных наблюдений в различных его модификациях. Ведутся активные исследования по применению методов, основанных на фильтре Калмана. Обзор алгоритмов и методов, применяемых в настоящее время в ГУ "Гидрометцентре России", показал, что они уже не отвечают современным требованиям и уровню развития в метеорологических службах других стран.

Вторая глава посвящена разработке вариационного алгоритма усвоения данных наблюдений и схеме коррекции почвенных переменных. В разделе 2.1 приведены уравнения глобальной полулагранжевой модели численного прогноза погоды. В данной модели численного прогноза погоды используется вертикальная σ - координата. Для описания процессов тепло- и влагообмена на поверхности суши применяется параметризация ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere - Взаимодействие почвы биосферы и атмосферы). Данная параметризация описывает взаимодействие между почвой, растительностью и атмосферой. Краткое описание параметризации ISBA сделано в разделе 2.2.

В разделе 2.3 представлено описание схемы коррекции почвенных переменных, согласованной с применяемой в модели параметризацией ISBA. Схема корректирует следующие переменные: поверхностную температуру почвы (T_s), температуру глубинного слоя почвы (T_p), влагосодержание приповерхностного (ω_s) и глубинного слоя почвы (ω_p). Данная схема основывается на коррекции температуры и влагосодержания в зависимости от ошибки прогноза температуры и относительной влажности на уровне 2 метра.

Метод коррекции температуры основан на вычислении инкремента анализа температуры на высоте 2-х метров в каждой точке сетки:

$$\begin{aligned} \Delta T_s &= \Delta T_{2m} \\ \Delta T_p &= \Delta T_{2m}/2\pi \end{aligned} \quad (1)$$

где Δ обозначает инкремент, т.е. разность значений анализа и поля первого приближения (6 часовой прогноз, стартовавший 6 часов назад). Коррекция для T_p производится всегда и не зависит от метеорологических условий.

Метод коррекции влагосодержания поверхностного слоя почвы, ω_s , и основного слоя почвы, ω_p , основывается на оптимальной интерполяции. Анализ температуры и относительной влажности на уровне 2 метра в каждой точке сетки используется в качестве наблюдения для анализа влагосодержания

ПОЧВЫ

$$\begin{aligned}\Delta\omega_s &= \alpha_s^T \Delta T_{2m} + \alpha_s^H \Delta H_{2m} \\ \Delta\omega_p &= \alpha_p^T \Delta T_{2m} + \alpha_p^H \Delta H_{2m}\end{aligned}\quad (2)$$

где $\alpha_s^T, \alpha_s^H, \alpha_p^T, \alpha_p^H$ — это оптимальные коэффициенты, которые минимизируют среднеквадратичную ошибку. Коэффициенты $\alpha_s^T, \alpha_s^H, \alpha_p^T, \alpha_p^H$ зависят от структуры почвы, локального солнечного времени и характеристик подстилающей поверхности.

При коррекции влагосодержания почвы вводятся дополнительные ограничения на коррекцию в синоптических ситуациях, когда атмосфера не чувствительна к ошибкам в влагосодержании почвы (поверхность земли покрыта снегом, наличие сильного приземного ветра, выпадение большого количества осадков, ослабление приходящей солнечной радиации в результате облачности, очень короткая длина светлого времени суток).

В разделе 2.4 осуществляется постановка задачи вариационного усвоения приземной температуры и выбирается стоимостный функционал. Постановка задачи и реализация разработанного алгоритма показана на примере усвоения данных наблюдений для температуры воздуха на уровне 2 метра, так как это позволяет избежать дополнительных усложнений при разработке оператора наблюдений и ковариационной матрицы ошибок поля первого приближения. Рассматривается система уравнений глобальной полулагранжевой модели численного прогноза погоды. Предполагается, что известны все начальные значения в момент времени $t = 0$, кроме температуры воздуха на уровне 2 метра (T_{2m}), которая используется для задания начальных значений почвенных переменных. Значения T_{2m} неизвестны или известны с некоторой погрешностью. Предположим, что недостаток информации о температуре воздуха на уровне 2 метра можно дополнить за счет данных измерений y , имеющихся на интервале времени $0 \leq t < \tau$, называемым окном усвоения. Сформулируем следующую задачу. Найти такое поле $T_{2m}(\xi, 0) = T_{2m}^a(\xi)$ (далее анализ температуры), стартуя с которого прогностическая модель генерирует решение, минимально отклоняющееся от данных наблюдений y и минимизирующее ошибки.

Предположим, что ошибки поля первого приближения (ε_b) и наблюдений (ε_o) не коррелируют между собой, т.е. независимы. Тогда можно ввести в рассмотрение следующий функционал

$$\begin{aligned}J(T_{2m}^a, x) &= \frac{1}{2} \int_D \int_D \left(T_{2m}^a(\xi') - T_{2m}^b(\xi') \right)^T B^{-1}(\xi', \xi) \left(T_{2m}^a(\xi) - T_{2m}^b(\xi) \right) d\xi d\xi' + \\ &+ \frac{1}{2} \int_D \int_0^\tau \int_D \int_0^\tau (y - H(T_{2m}))^T R^{-1} (y - H(T_{2m})) d\xi dt d\xi' dt'\end{aligned}\quad (3)$$

где $D = (\lambda, \theta)$ — область, где ищется решение; B, R — симметричные и положительные ковариационные функции ошибок $\varepsilon_b, \varepsilon_o$; T_{2m} — один из ком-

понентов вектор-функции x ; $y = y(t)$ — данные наблюдений, предполагается, что данная функция является достаточно гладкой; H — линейный оператор наблюдения.

Тогда задача вариационного усвоения данных может быть сформулирована следующим образом: найти решение x , удовлетворяющее прогностической модели, и функцию T_{2m}^a такие, что на них функционал (3) принимает наименьшее значение.

Рассмотрим подробнее данные измерений, которые будут использоваться при усвоении. Измерения температуры воздуха на уровне 2 метра проводятся одновременно на всех метеорологических станциях наблюдений. Они проводятся в 00, 06, 12 и 18 часов по всемирному скоординированное времени (ВСВ). Выберем в качестве окна усвоения 6— часовая интервал времени (например, $0 \leq t < 6$). Следовательно, данные наблюдений доступны только в начальный момент времени, поэтому стоимостный функционал (3) можно записать в следующем виде

$$J(T_{2m}^a, x) = \frac{1}{2} \int_D \int_D \left(T_{2m}^a(\xi') - T_{2m}^b(\xi') \right)^T B^{-1}(\xi', \xi) (T_{2m}^a(\xi) - T_{2m}^b(\xi)) d\xi d\xi' + \frac{1}{2} \int_D \int_D \left(y(\xi') - H(T_{2m}(\xi', 0)) \right)^T R^{-1}(\xi', \xi) (y(\xi) - H(T_{2m}(\xi, 0))) d\xi d\xi' \quad (4)$$

При этом $T_{2m}(\xi, 0) = T_{2m}^a$, а следовательно функционал зависит только от переменной T_{2m}^a . Данный функционал является квадратичным относительно контрольной переменной. Таким образом, для нахождения анализа температуры на уровне 2 метра необходимо найти минимум данного функционала.

Для поиска минимума применяются приемы вариационного анализа. Используя необходимое условие существования экстремума, известного из теории вариационного анализа, получим уравнение для нахождения минимума

$$\int_D \left(B^{-1}(T_{2m}^a - T_{2m}^b) - H^* R^{-1}(y - H(T_{2m}^a)) \right) d\xi = 0 \quad (5)$$

В разделе 2.5 разработан алгоритм решения задачи вариационного усвоения данных наблюдений температуры воздуха на уровне 2 метра в дискретной постановке. Запишем функционал (4), используя дискретную формулировку, в которой он наиболее часто встречается. Замена всех непрерывных функций на их дискретный аналог (вектор-столбец) на некоторой сетке, ковариационных функций на матрицы и линейного оператора на соответствующую ему матрицу, приводит к следующей формулировке стоимостного функционала

$$J(\vec{T}_{2m}^a) = \frac{1}{2} (\vec{T}_{2m}^a - \vec{T}_{2m}^b)^T \mathbf{B}^{-1} (\vec{T}_{2m}^a - \vec{T}_{2m}^b) + \frac{1}{2} (\vec{y} - \mathbf{H} \vec{T}_{2m}^a)^T \mathbf{R}^{-1} (\vec{y} - \mathbf{H} \vec{T}_{2m}^a) \quad (6)$$

При реализации алгоритма удобнее находить инкремент анализа (разность между вектором анализа и первого приближения), поэтому обозначив $\delta\vec{T}_{2m} = \vec{T}_{2m}^a - \vec{T}_{2m}^b$ и учитывая, что в качестве оператора наблюдения используется оператор линейного интерполирования, приходим к следующему выражению для стоимостного функционала

$$J(\delta\vec{T}_{2m}) = \frac{1}{2}(\delta\vec{T}_{2m})^T \mathbf{B}^{-1}(\delta\vec{T}_{2m}) + \frac{1}{2}(\vec{d} - \mathbf{H}\delta\vec{T}_{2m})^T \mathbf{R}^{-1}(\vec{d} - \mathbf{H}\delta\vec{T}_{2m}) \quad (7)$$

где $\vec{d} = \vec{y} - \mathbf{H}\vec{T}_{2m}^b$ — инновационный вектор.

Для улучшения сходимости минимизационных методов, применяется процедура предобуславливания. В задаче двумерного вариационного усвоения данных простым и эффективным предобуславливанием является разложение ковариационной матрицы ошибок поля первого приближения \mathbf{B} на два множителя и переход к новой переменной. Т.к. матрица \mathbf{B} симметричная и положительно определенная, то ее можно представить в следующем виде $\mathbf{B} = \mathbf{L}\mathbf{L}^T$. Обозначим через $\vec{\chi} = \mathbf{L}^{-1}\delta\vec{T}_{2m}$, тогда заменяя $\delta\vec{T}_{2m}$ в функционале (7) приходим к следующему выражению

$$\begin{aligned} J(\vec{\chi}) &= \frac{1}{2}(\vec{\chi})^T(\vec{\chi}) + \frac{1}{2}(d - \mathbf{H}\mathbf{L}\vec{\chi})^T \mathbf{R}^{-1}(d - \mathbf{H}\mathbf{L}\vec{\chi}) \\ \nabla_{\vec{\chi}} J &= \vec{\chi} + \mathbf{L}^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}(d - \mathbf{H}\mathbf{L}\vec{\chi}) \end{aligned} \quad (8)$$

Одним из преимуществ записи функционала в данном виде является следующий факт. Используя в качестве начального условия $\vec{T}_{2m}^0 = \vec{T}_{2m}^b$ для задачи минимизации функционала (6), мы получим начальное условие для задачи минимизации функционала (8) в виде $\chi = \mathbf{L}^{-1}\delta\vec{T}_{2m} = 0$. Соответственно, нет необходимости обращать матрицу \mathbf{L} или \mathbf{B} . После решения задачи минимизации функционала (8), искомый анализ получается из следующего соотношения

$$\vec{T}_{2m}^a = \vec{T}_{2m}^b + \delta\vec{T}_{2m} = \vec{T}_{2m}^b + \mathbf{L}\chi_a \quad (9)$$

Для задачи минимизации используется метод сопряженных векторов с ортогонализацией для задач большой размерности.

Для вычисления значений функционала и его градиента необходимо знать ковариационные матрицы ошибок поля первого приближения и наблюдений. Предполагается, что ошибки наблюдений не коррелируют между собой, поэтому ковариационная матрица ошибок наблюдений имеет диагональный вид.

При задании ковариационной матрицы ошибок поля первого приближения в моделях прогноза погоды очень часто применяется Гауссова функция, задающая корреляционную связь между переменными в разных сеточных точках, но она не обладает положительной определенностью на сфере при ее периодическом продолжении. Для задания ковариационной матрицы ошибок

первого приближения на сфере использовалась функция, предложенная в работе Tilmann'a [1999]. Эта функция является положительно определенной на сфере. Для учета корреляционных связей между точками в зависимости от разности их высот и географических особенностей (принадлежность точки сетки суше или морю), функция была изменена добавлением дополнительных множителей, и имеет следующий вид:

$$\psi_{\mu,\lambda,H,x,y}(\Theta, h) = f(x, y) \left(1 + \mu \frac{\sin(\Theta/2)}{\sin(\lambda/2)}\right) \left(1 - \frac{\sin(\Theta/2)}{\sin(\lambda/2)}\right)_+^\mu \left(1 + \mu \frac{h}{H}\right) \left(1 - \frac{h}{H}\right)_+^\mu \quad (10)$$

где $\lambda \in [0, \pi]$ — сферическое расстояние между двумя точками сетки; Θ — максимальное сферическое расстояние корреляции; $\mu \geq 4$ — настроечный параметр, отвечающий за вид корреляционной функции; $h \in [0, \infty]$ — модуль разности высот между сеточными точками; H — максимальная разность высот. Функция $f(x, y)$ задается следующим образом:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{если } mask(x) = mask(y) \\ 0 & \text{если } mask(x) \neq mask(y) \end{cases} \quad (11)$$

где x, y — точки сетки; $mask$ — функция равна 1, если точка сетки располагается над сушей, и равна 0, если точка сетки располагается над водой.

В третьей главе приводятся результаты численных экспериментов по усвоению данных наблюдений и по расчетам прогнозов приземной температуры с заблаговременностью до 72 часов. В начале главы (раздел 3.1) дается подробное описание данных наблюдений, которые использовались при проведении численных экспериментов. Из всего набора данных наблюдений приходящих в оперативном режиме в Гидрометцентр России, для проведения анализа приземной температуры и последующей коррекции почвенных переменных были выбраны данные наблюдений температуры воздуха на уровне 2 метра (T_{2m}). Эти наблюдения производятся на синоптических наземных станциях и кораблях. Данные наблюдения производятся в 00, 06, 12 и 18 часов всемирного согласованного времени (ВСВ), что позволяет проводить анализ приземной температуры каждые 6 часов.

Далее, в разделе 3.2, приводится описание методики проведения численных экспериментов. В качестве оценок точности анализа и численных прогнозов были выбраны средняя и среднеквадратичная ошибки относительно реальных данных наблюдений. Оценки проводились по пяти регионам: Россия, Азия, Европа, Центрально—Европейская часть России и Сибирь. Во всех численных экспериментах в качестве начальных данных для полей в свободной атмосфере брались анализы системы усвоения данных СУД ИОИ (одна из систем усвоения данных наблюдений, разработанная в ГУ "Гидрометцентр России", М. Цырульников и др. [2003]).

Первые численные эксперименты проводились по сравнению ошибок прогнозов с заблаговременностью до 48 часов, в зависимости от используемой в модели параметризации. Для усвоения данных наблюдений использовалась СУД ИОИ. Как показывают результаты, представленные в разделе 3.3, при использовании модели с новой параметризацией ошибки прогноза T_{2m} уменьшаются в регионах, где раньше были очень большие средняя и среднеквадратичная ошибки. Это регионы Россия, Азия и Сибирь. В других регионах ошибки стали больше или остались на прежнем уровне для некоторых заблаговременностей прогноза. Применение новой параметризации повлияло не только на прогноз приземной температуры, но и на прогноз основных метеополей в свободной атмосфере. При использовании новой параметризации ошибки прогноза температуры на уровне 850 гПа, геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа и давления на уровне моря увеличиваются во всех регионах.

В разделе 3.4 приводятся результаты численных экспериментов по применению новой схемы коррекции почвенных переменных в системе усвоения. В результате применения данной схемы удалось уменьшить среднеквадратичную ошибку для прогнозов T_{2m} . В среднем для всех заблаговременностей ошибка уменьшилась на 0,3 градуса по территории Европы, 1 градус по Азии, 0,2 градуса по Центрально—Европейской части России, 0,7 градуса по Сибири и 0,7 градуса в целом по всей территории России.

После программной реализации алгоритма вариационного усвоения проводилась проверка корректности расчетов с использованием теста "одно наблюдение". В разделе 3.5 приводятся результаты данного теста. Данные расчетов показывают, что алгоритм воспроизводит стандартные тесты.

В разделе 3.6 приведены результаты численных экспериментов по вариационному усвоению данных наблюдений. Представлены оценки прогнозов T_{2m} . На рис. 1 приведено сравнение ошибок анализа, полученного при применении вариационного алгоритма усвоения (сплошная линия) с ошибками анализа температуры на уровне 2 метра СУД ИОИ (пунктирная линия). Как видно из графиков, при применении вариационного усвоения данных наблюдений ошибки анализа уменьшились. Особенно в регионах Азия, Сибирь и Россия, где станции наблюдений расположены не очень густо. Во всех регионах значительно уменьшилось смещение (средняя ошибка).

В разделе 3.7 приводятся результаты исследования по влиянию задания параметров ковариационной матрицы ошибок поля первого приближения. По результатам проведенных численных экспериментов были выбраны оптимальные параметры ковариационной матрицы ошибок поля первого приближения. Было установлено, что при задании ковариационной матрицы \mathbf{B} с помощью аналитической формулы желательно использовать различные радиусы корреляции, для регионов с различной плотностью наблюдений.

В разделе 3.8 приведены результаты численных экспериментов по усвоению и прогнозам для зимнего и летнего месяца. Для расчета анализов T_{2m}

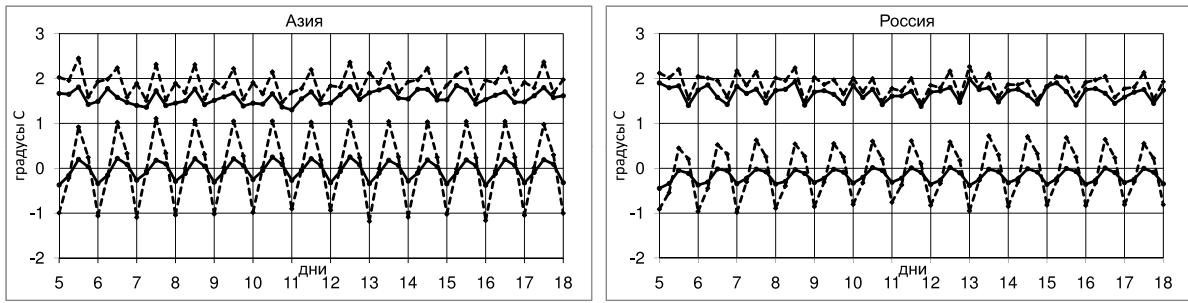


Рис. 1. Ошибки анализа приземной температуры за 5-18 июня 2007 г. Сплошная линия: Вариационное усвоение данных. Пунктирная линия: усвоение СУД ИОИ. Верхние графики на диаграммах соответствуют среднеквадратичной ошибке, нижние средней ошибке.

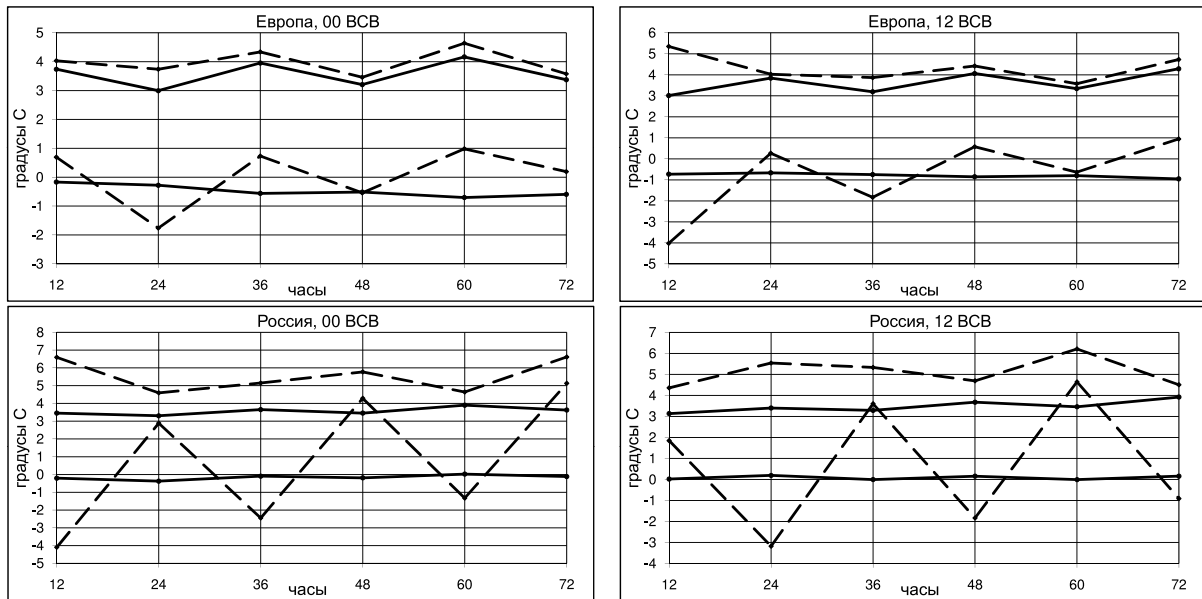


Рис. 2. Оценки прогноза T_{2m} с заблаговременностью до 72 часов, стартовавших в 00 ВСВ (слева) и 12 ВСВ (справа), относительно данных наблюдений, осредненные за 5-27 июня 2007 г. Сплошная линия: применение новых схем задания начальных данных и новой параметризации в модели ПЛАВ. Пунктирная линия: усвоение СУД ИОИ и старая параметризация в модели ПЛАВ.

и почвенных переменных использовались вариационный алгоритм усвоения данных наблюдений и схема коррекции почвенных переменных. Модель ПЛАВ с параметризацией ISBA применялась для расчетов полей первого приближения и прогнозов с заблаговременностью до 72 часов.

На рис. 2 представлены графики ошибок прогнозов температуры на уровне 2 метра. Все ошибки, представленные на графиках, осреднялись за период 5-27 июня 2007 г. Сплошной линией представлены графики ошибок прогноза T_{2m} , рассчитанного по модели ПЛАВ с параметризацией ISBA. В качестве начальных данных использовались: анализы СУД ИОИ для полей в свободной атмосфере, анализы почвенных переменных, полученные при применении схемы коррекции почвенных переменных, анализ приземной температуры с использованием вариационного алгоритма усвоения данных наблюдений,

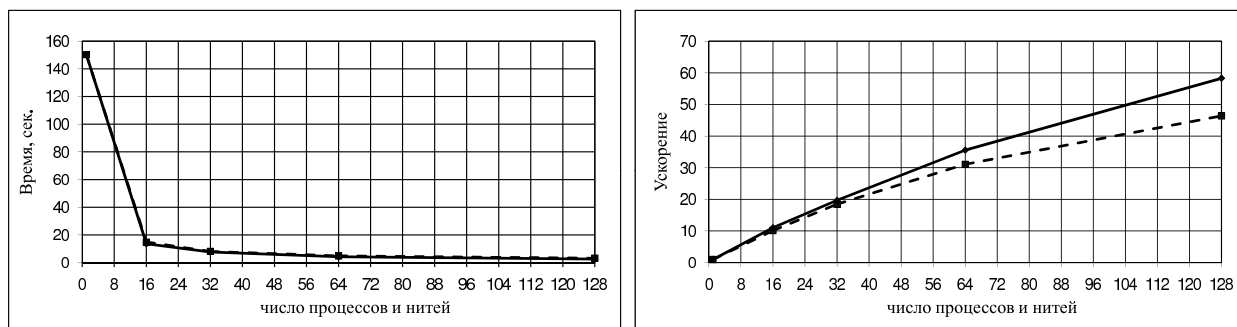


Рис. 3. Время счета и ускорение при использовании гибридной технологии MPI+OpenMP (сплошная линия) и только MPI(пунктирная линия)

анализ приземной относительной влажности с использованием оптимальной интерполяции. Пунктирной линией представлены графики ошибок прогноза T_{2m} , рассчитанного по модели ПЛАВ со старой параметризацией. В качестве начальных данных для всех полей использовались анализы СУД ИОИ.

В результате использования новых подходов удалось значительно снизить ошибки прогноза температуры на уровне 2 метра. Средняя ошибка уменьшилась в некоторых регионах в 3 раза и стала значительно менее чувствительной к суточному ходу. Наиболее сильно среднеквадратичная ошибка уменьшилась для Азии, России и Сибири. По территории Азии среднеквадратичная ошибка уменьшилась в среднем на 2,2 градуса по всем заблаговременностям. По территории России среднеквадратичная ошибка уменьшилась на 1,7 градуса. По территории Европы уменьшение составило 0,3 градуса и по Центрально—Европейской России среднеквадратичная ошибка уменьшилась на 0,4 градуса.

В четвертой главе описан разработанный алгоритм распараллеливания задачи вариационного усвоения данных наблюдений. Во введении к главе (раздел 4.1) приведено описание и блок-схемы алгоритмов. Выполнен анализ наиболее трудоемких мест алгоритма вариационного усвоения.

В разделе 4.2 приводится описание параллельной реализации вариационного алгоритма усвоения данных с использованием технологий MPI, OpenMP и гибридной технологии (MPI+OpenMP). Современные кластерные системы строятся на основе серверных блоков с несколькими многоядерными процессорами на общей памяти. Для максимального использования всех вычислительных ресурсов был разработан алгоритм распараллеливания с использованием гибридной технологии, при которой используется как MPI, так и OpenMP.

В разделе 4.3 приведены результаты тестирования параллельного алгоритма. На рис. 3 показано время расчетов и ускорение в зависимости от числа используемых ядер при использовании гибридной технологии (сплошная линия) и при использовании только технологии MPI (пунктирная линия). Как видно из графиков, гибридное распараллеливание дает большее ускорение при использовании того же самого количества ядер. При использовании всех

доступных 128 ядер на кластере, ускорение при применении гибридного распараллеливания составило 58,2, а при использовании только MPI, ускорение составило 46,3.

В Заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы:

- Разработан алгоритм вариационного усвоения данных наблюдений температуры на уровне 2 метра. Использование данного алгоритма усвоения позволило повысить точность анализа приземной температуры.
- Разработан комплекс программ для решения задачи усвоения реальных данных наблюдений температуры воздуха на уровне 2 метра. В данном программном комплексе реализована схема коррекции почвенных переменных, согласованная с параметризацией тепло- и влагообмена на поверхности суши ISBA. Реализован алгоритм вариационного усвоения. Данный программный комплекс, совместно с глобальной полулагранжевой моделью численного прогноза погоды, с 1 ноября 2007 года проходит оперативные испытания в ГУ "Гидрометцентр России".
- Проведены численные эксперименты по усвоению оперативных данных наблюдений температуры на уровне 2 метра и расчеты прогнозов с заблаговременностью до 72 часов. Использование разработанных и реализованных алгоритмов позволило повысить точность прогноза температуры на уровне 2 метра с заблаговременностью до 72 часов. По территории России среднеквадратичная ошибка (осредненная за июнь 2007 г.) прогноза температуры воздуха на уровне 2 метра с заблаговременностью до 72 часов уменьшилась в среднем по всем срокам заблаговременности на 1,7 градуса, по территории Азии на 2,2 градуса.
- Проведено распараллеливание алгоритма вариационного усвоения приземной температуры с использованием технологии MPI, OpenMP и гибридной технологии (MPI+OpenMP). Разработанный параллельный программный комплекс позволяет проводить расчеты на многопроцессорных вычислительных системах с различной архитектурой. Этот комплекс позволяет применять алгоритм вариационного усвоения данных в системах усвоения данных наблюдений, использующихся в оперативном режиме. При расчетах на 128 ядрах кластера ИВМ РАН удалось ускорить расчеты в 58 раз.

Публикации по теме диссертации

1. Bogoslovskii N., Tolstykh M. Implementation of assimilation scheme for soil variables in the global semi-Lagrangian NWP model // Program and Abstracts ENVIROMIS-2006. Tomsk, 1-8 Jul. 2006. — Pp. 103.
2. Богословский Н.Н., Толстых М.А. Прогноз приземной температуры и относительной влажности в глобальной полулагранжевой модели. // Тезисы докладов второй конференции молодых ученых национальных гидрометслужб государств-участников СНГ. Москва, 2-3 окт. 2006 г. — С. 24-25.
3. **Богословский Н.Н., Толстых М.А. Реализация схемы усвоения для почвенных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии (спец. выпуск). — 2006. — Т. 11 — Ч. 3. — С. 20-25.**
4. Bogoslovskii N., Shlyayeva A., Tolstykh M. Data assimilation of surface and soil variables in the global semi-Lagrangian NWP model // Program and Abstracts CITES-2007. Tomsk, 14-25 Jul. 2006. — Pp. 107.
5. **Богословский Н.Н., Толстых М.А., Шляева А.В. Усвоение почвенных и приземных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии (спец. выпуск 3). — 2008. — Т. 13. — С. 111-116.**
6. Bogoslovskii N., Tolstykh M. Variational assimilation of screen-level temperature for the global semi-Lagrangian NWP model SL-AV // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. — [Electronic resource] — 2008. — Pp. 1.01-1.03. — Mode of access: <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/wgne>.
7. Богословский Н.Н., Толстых М.А. Реализация модели прогноза погоды и усвоения метеоданных с помощью технологий MPI и OpenMP // Труды Всероссийской научной конференции "Научный сервис в сети ИНТЕРНЕТ: решение больших задач". Новороссийск, 22-27 сен. 2008. — М: Изд-во МГУ, 2008. — С. 172-173. — ISBN 978-5-211-05616-9.