

Министерство природных ресурсов и экологии РФ  
Федеральная Служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
(Росгидромет)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СИБИРСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»  
(ГУ «СИБНИГМИ»)

УДК 551.501

№ госрегистрации 01201358976

Инв.№



ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**Создание системы усвоения данных метеорологических наблюдений для  
Сибирского региона**

(заключительный)

Шифр темы 1.1.1.7

Научный руководитель

к.ф.м.н

М.Д. Цырульников

Новосибирск 2014

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Отв. исполнитель

\_\_\_\_\_

М.Д. Цырульников

Исполнители:

\_\_\_\_\_

П.И. Свиренко

\_\_\_\_\_

А.Л. Ордин

\_\_\_\_\_

Д.В. Блинов

\_\_\_\_\_

М.Е. Горбунов

\_\_\_\_\_

Д.Р. Гайфулин

\_\_\_\_\_

И.Б. Мамай

\_\_\_\_\_

А.А. Кирсанов

\_\_\_\_\_

В.К. Маев

\_\_\_\_\_

А.С. Молодцов

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

Т.П. Панькова

## РЕФЕРАТ

Отчет 34 стр., 5 илл., 3 табл., 10 источников.

МЕТЕОРОЛОГИЯ, СИБИРЬ, ДАННЫЕ, НАБЛЮДЕНИЯ, ВАРИАЦИОННОЕ УСВОЕНИЕ, ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОВАРИАЦИИ.

В результате реализации данного проекта создана оригинальная система регионального циклического усвоения метеорологических наблюдений на базе созданной авторами унифицированной технологии трёхмерного вариационного усвоения 3D-Var, не имеющая отечественных аналогов. Новая система усвоения предназначена для оперативного внедрения в Гидрометцентре России, а также в региональных прогностических центрах страны. Полученные в ходе усвоения поля метеоэлементов могут быть также использованы для задач климатического мониторинга, экологического мониторинга и прогноза, долгосрочного прогноза и т.п. Достоинством данной разработки является унификация теоретических подходов и технологий для процедур усвоения как метеорологических, так и океанологических данных, на разных пространственных масштабах от планетарного до мезомасштаба.

Авторские испытания системы продемонстрировали её работоспособность.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ТЕХНОЛОГИЯ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ О СОСТОЯНИИ ГЛОБАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ..	6
1.1 Общая характеристика выполняемых задач.....	6
1.2 Оригинальность методики .....	8
1.3 Унификация.....	8
1.4 Планы на перспективу 2–4 года .....	9
1.5 Сравнение с ведущими метеоцентрами мира .....	9
2.1 Мировой уровень исследований и разработок в области регионального усвоения данных метеорологических наблюдений .....	10
2.2 Состояние дел в области регионального усвоения данных метеорологических наблюдений в России .....	10
2.3 Выбор прогностической модели.....	11
2.4 Выбранный метод решения задачи .....	11
2.4.1 Выбор класса систем усвоения.....	11
2.4.2 Выбор формы уравнений 3D-Var.....	12
2.5 Выбор области решения уравнений регионального 3D-Var.....	15
2.6 Уравнения трёхмерного вариационного усвоения .....	16
2.7 Выводы.....	19
3 МОДЕЛЬ COSMO .....	20
3.1 Общее описание .....	20
3.2 Начальные и граничные условия.....	20
3.2.1 Структура начальных и граничных условий из модели GME .....	20
3.2.2 Климатические характеристики и константы.....	25
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СХЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО УСВОЕНИЯ ДАННЫХ .....	26
4.1 Общая характеристика полей анализа .....	26
4.2 Включение в систему спутниковых наблюдений об уходящей радиации в микроволновом диапазоне длин волн.....	29
4.3 Отклонение первого приближения и анализа от наблюдений .....	30
4.4 Результаты верификации прогнозов .....	31
4.4.1 Верификация 6-часовых прогнозов .....	31
4.5 Выводы.....	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	33
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	34

## ВВЕДЕНИЕ

В Гидрометцентре России разработана и создана система многомасштабного усвоения данных, используемая оперативно как в атмосфере, так и в океане. В атмосфере усвоение данных реализовано по унифицированной методике, позволяющей работать как на глобальном, так и на региональном масштабе. Базовая технология – т.н. трёхмерное вариационное усвоение (3D-Var). Оригинальность методики усвоения состоит в новой схеме пространственных ковариаций на основе *трёхмерных фильтров* типа авторегрессии – скользящего среднего. Важнейшим элементом разработанной технологии является её унификация – нам неизвестны примеры других систем в мире, которые бы, как у нас, работали на глобальном и региональном масштабах в атмосфере, а также и в океане. Такая унификация позволяет более эффективно использовать имеющиеся у нас весьма ограниченные ресурсы. В настоящее время программный код системы состоит более чем из 1000 подпрограмм на Фортране и Си, состоящих из 300 тыс. строк исходного кода.

В данном отчёте обоснован и описан метод решения задачи регионального усвоения данных с использованием унифицированной глобальной схемы. Получены результаты, свидетельствующие о работоспособности разработанной схемы.

# 1 ТЕХНОЛОГИЯ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ О СОСТОЯНИИ ГЛОБАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ

В данной главе мы дадим краткий обзор разработанной технологии циклического усвоения данных, которая будет конкретизирована в последующих главах.

## 1.1 Общая характеристика выполняемых задач

Вкратце, разработанная технология циклического усвоения данных работает следующим образом. На каждом 6-часовом цикле усвоения выполняется последовательность следующих укрупнённых задач:

1) Данные различных усваиваемых наблюдений, в настоящее время, контактных (синоптических, аэрологических и самолётных) и спутниковых – принимаются в Главном Радиометцентре Росгидромета (сейчас он называется «Авиаметтелеком») по метеорологической сети глобальной телесвязи (ГСТ) или интернету и направляются в Гидрометцентр. Дополнительно, данные регионального покрытия с меньшей задержкой мы получаем из НИЦ «Планета». Сейчас суточный объём данных наблюдений – около 5 Гб.

2) В Гидрометцентре полученные данные сортируются по типам, датам, «раскладываются» по директориям временного хранения общего пользования, а также архивируются (А.Ю. Недачина, отдел И.И. Жабиной).

3) Автономно работающие программы первичной обработки регулярно (для глобального усвоения - каждые 0.5-6 часов) раскодируют свежую порцию наблюдений и формируют т.н. «файлы для анализа», которые содержат уже только ту информацию, которая необходима для дальнейшего усвоения.

4) Регулярно, каждые 6 часов в сроки 2.20, 8.20, 14.20 и 20.20 стартует программа формирования полей первого приближения из полей 6-часовых численных прогнозов прогностической модели Космо. Программа экстраполирует прогностические поля примерно на 400 м ниже модельного рельефа (для использования наблюдений ниже модельной

орографии) и формирует несколько наборов полей со сдвигом по времени внутри «окна усвоения» (+- 3 часа).

5) По окончании работы программы формирования полей первого приближения стартуют программы формирования т.н. «инноваций» - отклонений наблюдений (из «файлов для анализа») от первого приближения. Каждая из таких программ работает со своим типом наблюдений. При вычислении «инноваций» происходит пространственно-временная интерполяция полей первого приближения на точки наблюдений, а для спутниковых наблюдений ещё и применение так называемых операторов наблюдений. Оператор наблюдений для измерений, например, уходящей радиации, включает интегрирование модели переноса излучения в атмосфере (для этих целей используется модель RTTOV – единственная программа, заимствованная нами в данной системе).

Заметим, что важным компонентом схем класса 3D-Var является учёт реального времени наблюдения при вычислении инкрементов наблюдений (FGAT – first guess at appropriate time). По литературным данным, FGAT даёт в рамках 3D-Var примерно треть эффекта от перехода к существенно более трудоёмкому 4D-Var. Смысл FGAT состоит в том, что применение оператора наблюдений включает, кроме пространственной интерполяции, также и интерполяцию по времени. Для этого поля первого приближения поставляются в несколько моментов времени. В нашем случае мы используем 5 моментов времени: заблаговременность от 3 до 9 час. через каждые 1.5 часа.

Технологически реализация FGAT потребовала: формирования 5 файлов первого приближения (вместо одного), а также переделки структур, в которых запоминаются поля первого приближения, с тем чтобы запоминать не 3-мерные, а 4-мерные поля. Соответственно, были доработаны процедуры применения операторов наблюдений – как для контактных, так и для спутниковых наблюдений.

б) Далее, стартует собственно анализ – интерполяция и преобразования «инноваций» в точках наблюдений в поля так называемого *инкремента анализа* – отклонения анализа от первого приближения – в т.н. внутренней квази-регулярной сетке точек. Анализ оптимально объединяет информацию из первого приближения и наблюдений. Для обеспечения такой оптимальности (в вероятностном смысле слова) необходима модель пространственных ковариаций полей ошибок первого приближения, которую была предложена и разработана нами.

7) Поле этого производится интерполяция полей инкрементов анализа на модельную сетку и добавление их к первому приближению с формированием собственно уже полей анализа на сетке модели.

8) Сформированные поля анализа на сетке модели служат для старта модели Космо на следующем цикле усвоения.

9) По окончании выполнения основных задач 1—9 стартуют задачи вычисления статистики: поступления наблюдений, а также отклонений наблюдений от первых приближений и анализов.

10) В некоторые указанные в управляющем скрипте сроки (например, 00 и 12), стартует среднесрочный прогноз (для верификации и для возможного использования потребителем).

## **1.2 Оригинальность методики**

Система трёхмерного вариационного усвоения полностью (от идеи до программного кода), кроме радиационной модели RTTOV, разработана и создана её авторами и по нескольким ключевым параметрам не имеет прямых аналогов в мировой практике. Главный отличительный элемент – лежащая в её основе оригинальная схема пространственных ковариаций на основе трёхмерных фильтров, пригодная для работы в режиме гибридного вариационно-ансамблевого усвоения. Также оригинальна методика и технология обработки данных радиозатменных наблюдений.

## **1.3 Унификация**

Важнейшим элементом разработанной технологии является её унификация – нам неизвестны примеры других систем в мире, которые бы, как у нас, работали на глобальном и региональном масштабах в атмосфере, а также и в океане. Такая унификация позволяет более эффективно использовать имеющиеся у нас весьма ограниченные ресурсы, но это достигается ценой некоторого «утяжеления» системы. Так, в настоящее время, программный код системы состоит более чем из 1000 подпрограмм на Фортране и Си, состоящих из 300 тыс. строк исходного кода. Заметим, что Система циклического усвоения в глобальном океане, созданная А.А. Зеленько, Ю.Д. Реснянским, М.Д. Цырульниковым, Б.С. Струковым и П.И. Свиренко и использующая разработанную нами систему трёхмерного вариационного усвоения, также работает оперативно в Гидрометцентре России с 2006 г. Анализируемые

поля: температура и солёность воды на ряде глубин в регулярной широтно-долготной сетке. Создана и схема регионального усвоения данных с моделью COSMO.

#### **1.4 Планы на перспективу 2–4 года**

Создание гибридной вариационно-ансамблевой системы усвоения данных. Такие гибриды считаются в настоящее время наиболее перспективными и предназначены для объединения достоинств как вариационных, так и ансамблевых (ансамблевый фильтр Калмана) схем усвоения данных.

Включение большего числа новых спутниковых наблюдений (в частности, данных наземных приёмников сигналов радионавигационных систем об интегральной влажности атмосферы).

#### **1.5 Сравнение с ведущими метеоцентрами мира**

Аналогичные системы трёхмерного вариационного усвоения используются сейчас оперативно в Метеорологической службе Германии (DWD), и лишь недавно в США (NCEP) был осуществлён переход от трёхмерного вариационного усвоения к гибриднему усвоению.

В Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), в Британском Метеорологическом департаменте (MetOffice) и в Японии применяются более совершенные системы четырёхмерного усвоения данных. В тоже время, в некоторых центрах рассматривается возможность отказа, в дальнейшем, от весьма сложных схем четырёхмерного усвоения данных в пользу более «лёгких» и более приспособленных для массивно параллельных компьютеров будущего гибридных схем.

После создания системы гибридного усвоения Гидрометцентр России рассчитывает «встать в один ряд» со всеми перечисленными ведущими метеорологическими центрами.

## **2 СХЕМА ОБЪЕКТИВНОГО АНАЛИЗА**

В данном разделе мы дадим краткий обзор состояния разработок в области усвоения данных наблюдений в атмосфере на мезо-масштабе, обоснуем выбранный путь решения поставленной задачи и приведём основные уравнения анализа (трёхмерного усвоения).

### **2.1 Мировой уровень исследований и разработок в области регионального усвоения данных метеорологических наблюдений**

В мире существует несколько самостоятельных систем регионального усвоения метеорологических данных.

Европа.

- 1) Meteo-France: 3D-Var + AROME [1] + разрабатывается гибридная схема 4D-EnVar [2].
- 2) UK MetOffice: 3D-Var, 4D-Var + Unified Model [3] + разрабатывается гибридная схема 4D-EnVar.
- 3) COSMO: схема т.н. nudging + разрабатывается схема на основе ансамблевого фильтра Калмана.
- 4) HIRLAM: 4D-Var + HIRLAM, 3D-Var + HARMONIE [4].

США.

- 1) 3D-Var + WRF ARW [5].
- 2) Hybrid 3D-EnVar + WRF NMM.

Канада.

- 1) GEM regional + 3D-Var, 4D-Var [6].

Япония.

- 1) 4D-Var + MSM [7].

### **2.2 Состояние дел в области регионального усвоения данных метеорологических наблюдений в России**

В России в настоящее время нет действующих систем регионального усвоения данных метеорологических наблюдений.

## 2.3 Выбор прогностической модели

Учитывая, что Росгидромет является членом европейского консорциума КОСМО (COSMO – Consortium for Small-Scale Modelling), мы выбрали модель КОСМО как современную модель, являющуюся одной из лучших в мире.

## 2.4 Выбранный метод решения задачи

### 2.4.1 Выбор класса систем усвоения

Из соображений перспективности и эффективности мы выбрали трёхмерное вариационное усвоение (3D-Var) с дальнейшим переходом к гибриднему вариационно-ансамблевому усвоению. Технология 3D-Var (с использованием т.н. инкрементного подхода) даст эффективное прямое усвоение спутниковых наблюдений, а ансамблевое усвоение – ковариации ошибок прогноза, зависящие от структуры атмосферного или океанского потока и наличия и точности данных наблюдений в недавнем прошлом. Заметим, что американцы идут, в целом, этим же путём, несмотря на их несоизмеримо большие ресурсы.

Отметим, что четырёхмерное вариационное усвоение 4D-Var с прогностической моделью как сильным ограничением мы отвергли, на данном этапе, по следующим причинам. Во-первых, технология 4D-Var требует очень больших затрат времени на создание и поддержание указанных линейризованной и сопряжённой моделей – любое обновление в основной нелинейной модели должно сопровождаться *одновременными* соответственными изменениями в линейризованной и сопряжённой моделях. Во-вторых, само по себе усвоение 4D-Var не является "самодостаточным" – в том смысле что, несмотря на временное окно усвоения, требуется организация циклического усвоения традиционного типа "анализ-прогноз". При этом 4D-Var *не* позволяет вычислить изменчивую статистику ошибок первого приближения на следующем шаге усвоения – в отличие от ансамблевого усвоения, которое такую возможность предоставляет.

3D-Var *плюс* ансамблевое усвоение, на наш взгляд, - оптимальное решение, т.к., с одной стороны, 3D-Var даст эффективное усвоение спутниковых наблюдений, а с другой стороны, ансамблевый подход позволит моделировать изменчивые и зависящие от атмосферного потока ковариации ошибок первого приближения. Существенное отличие нашего подхода будет в том, что в ансамблевом усвоении мы не будем пользоваться непосредственно

выборочными ковариациями (по ансамблевой выборке, как это все делают или собираются делать), поскольку эти ковариации сильно зашумлены при неизбежно небольшом ансамбле. Вместо этого, мы предполагаем использовать достаточно развитую созданную нами *параметрическую* модель пространственных ковариаций и оценивать, на каждом шаге усвоения, лишь ограниченное число *параметров* модели ковариаций, что позволит эффективно подавлять выборочный шум.

#### 2.4.2 Выбор формы уравнений 3D-Var

Касаемо собственно схемы трёхмерного анализа, существуют 2 эквивалентные формы его линейного блока (нелинейная компонента схемы всегда реализуется по методу Ньютона). Первая форма – это т.н. анализ в «пространстве наблюдений». Эта форма близка к глобальной разновидности оптимальной интерполяции. Принципиальное отличие от оптимальной интерполяции состоит в том, что при анализе по методу 3D-Var не вычисляются в явном виде веса, с которыми используются данные наблюдений. Это даёт огромную экономию в вычислениях и, собственно, делает метод 3D-Var практически реализуемым. Уравнения линейного анализа в «пространстве наблюдений» также входят в стандартный алгоритм фильтра Калмана и выглядят следующим образом:

$$Y^a = KY^o \quad (2.1)$$

где  $Y^a$  - т.н. инкремент анализа (отклонения от первого приближения), а  $Y^o$  - т.н. инновации (отклонения наблюдений от первого приближения, подробнее см. ниже в данном разделе), а  $K$  - т.н. «коэффициент усиления»:

$$K = BH^T (HBH^T + R)^{-1}. \quad (2.2)$$

Второй эквивалентной формой записи уравнений анализа в форме т.н. «пространства модели» соответствует другая запись матрицы  $K$ :

$$K = (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}. \quad (2.3)$$

Будучи эквивалентными, формы (2.2) и (2.3) приводят, тем не менее, к различным численным алгоритмам. Так, размерность матриц, которые необходимо обратить в этих

уравнениях, составляет, как легко видеть, соответственно,  $N$  и  $n$ , где  $N$  - число наблюдений (размерность «пространства наблюдений»), а  $n$  - размерность «пространства модели» (число степеней свободы полей анализа). Безусловно, эти матрицы ни в каком реальном алгоритме в явном виде не обращаются (что было бы крайне вычислительно неэффективно) – вместо этого решается соответствующая система линейных уравнений – но «стоимость» такого решения также существенно зависит от размерности матрицы.

В прошлом, когда основным источником наблюдательной информации об атмосфере Земли были контактные наблюдения, их количество было, как правило, значительно (на порядки) меньше размерности сетки анализа (или числа гармоник в спектральных схемах). Поэтому форма (2.2) в «пространстве наблюдений» – традиционно была более привлекательна. Однако в настоящее время бурного роста количества спутниковых наблюдений (примерно в 3 раза каждый год) это преимущество перестаёт быть существенным. Тем более, что вычислительные затраты на решение указанной системы уравнений принципиально зависят от обусловленности матрицы, что делает сравнение двух форм уравнений 3D-Var более сложным.

В практических алгоритмах решения систем уравнений очень высокой размерности (у нас – порядка  $10^6$  и в ближайшие годы это число вырастет в десятки раз) используются приближённые методы, типа метода сопряжённых градиентов с относительно малым числом итераций. И скорость сходимости таких алгоритмов существенно зависит от обусловленности матрицы. Для плохо обусловленных матриц (с большим числом обусловленности) применяют специальные «предобусловливатели» – система уравнений (и, соответственно, матрица) преобразуется к эквивалентному виду так, чтобы число обусловленности стало существенно меньше. Этого можно добиться, если мы можем предложить некое приближение,  $\check{A}$ , к исходной матрице  $A$ , входящей в изучаемую систему уравнений

$$Ax = y \tag{2.4}$$

где  $x$  - неизвестный вектор, а  $y$  - вектор правых частей.

Имея  $\check{A} \approx A^{-1}$ , мы умножаем (2.4) на  $\check{A}$ , получая

$$\check{A}Ax = \check{A}y \tag{2.5}$$

В полученной системе мы отмечаем, что, по предположению,  $\tilde{A}A \approx I$ , а значит, новая матрица  $A'$  преобразованной системы уравнений

$$A'x = y', \quad (2.6)$$

где  $y' = \tilde{A}y$ ,  $A' = \tilde{A}A$ , обусловлена гораздо лучше исходной (т.к. единичная матрица  $I$  имеет наименьшее из возможных число обусловленности  $\nu = 1$ ). Поэтому численное решение системы (2.6) достигается существенно меньшей «вычислительной ценой», чем решение исходной системы (2.4).

Применение этой идеи для решения линейной системы уравнений 3D-Var приводит к следующим практически используемым алгоритмам. Для уравнений в «пространстве наблюдений» с целью построения эффективного преобусловливателя можно воспользоваться методом оптимальной интерполяции с локальным выбором «влияющих наблюдений». Многократное решение системы уравнений оптимальной интерполяции для всех узлов сетки анализа даёт искомое приближение к обратному оператору  $C^{-1}$ , где  $C = NBH^T + R$ . Достоинством такого подхода является очень высокая скорость сходимости преобразованной (преобусловленной) системы уравнений – в практических схемах оказываются достаточными всего несколько (менее 10) итераций. Недостатком же такой схемы преобуславливания является необходимость создания и поддержания достаточно сложной приближённой схемы оптимальной интерполяции.

Для уравнений же в «пространстве модели» применяют другой подход. А именно, делают преобразование переменной анализа,  $X$ , к новой переменной,  $\chi$ :

$$X = B^{1/2}\chi, \quad (2.7)$$

где  $B^{1/2}$  - всегда существует, т.к. матрица  $B$  положительно определена. Легко видеть, что ковариационная матрица новой переменной – единичная:

$$E\chi \cdot \chi^T = I.$$

Соответственно, матрица системы уравнений (2.3) становится равной  $I + H^T R^{-1}H$ . Тот факт, что вместо плохо обусловленной матрицы  $B$  мы получили идеально обусловленную

матрицу  $I$ , позволяет предположить, что и обусловленность суммы  $I + H^T R^{-1} H$  также существенно улучшится (с учётом того, что матрица  $H^T R^{-1} H$  положительно определена).

Проанализировав все вышеупомянутые достоинства и недостатки обоих подходов к построению численной схемы 3D-Var (подход в «пространстве наблюдений» и подход в «пространстве модели»), мы выбрали подход в «пространстве модели» как более «технологичный» и требующий меньших затрат на программирование и тестирование системы.

## 2.5 Выбор области решения уравнений регионального 3D-Var

Учитывая, что у нас есть разработанная нами схема глобального анализа 3D-Var, мы приняли решение свести решение региональной задачи к решению глобальной. Именно, мы делаем следующую последовательность преобразований. При *преимущество использования глобальной схемы для решения региональной задачи состоит в том что* наиболее сложная часть схемы (солвер) – единая для всех масштабов (глобального и ререгионального), что радикально снижает затраты на разработку и поддержание схемы.

*Метод решения:* преобразование горизонтальных координат (stretched geometry, Schmidt transform) – аналогичен Канадскому подходу. Мы отображаем точку  $(\theta, \varphi)$ ,  $\varphi$  - долгота, а  $\theta$  - ко-широта, в точку  $(g(\theta), \varphi)$ , где

$$g(\theta) = 2 \operatorname{Arctg}(c \cdot \operatorname{tg}(\theta/2))$$

Такое преобразование, как легко видеть, конформно, т.е. даёт одинаковое растяжение во всех направлениях (постоянство растяжений) и сохраняет углы между направлениями на сфере (консерватизм углов). В схеме для региона Сибири мы использовали коэффициент растяжения  $c=10$ .

Последовательность преобразований следующая.

1) Преобразование наблюдений из географической в повёрнутую космо-систему координат (включая поворот вектора ветра) – в «пространстве модели».

2) Вычисление инкрементов наблюдений в «пространстве модели». Центр области – возле космо-экватора.

3) Преобразование наблюдений в «пространство анализа», где центр области – Северный полюс и широта растянута в силу «преобразования Шмидта».

- 4) Анализ – глобальный (унифицированный) в «пространстве анализа».
- 5) Обратное преобразование координат и компонент вектора ветра полей инкрементов анализа из «пространстве анализа» в «пространство модели» и формирование полей анализа.

## 2.6 Уравнения трёхмерного вариационного усвоения

Усвоение производится, согласно выбранной нами стратегии, по методу трёхмерного вариационного усвоения (3D-Var), в соответствии с которым поле анализа ищется (в глобальной области на сфере – в «пространстве анализа») как минимум функционала

$$J = \frac{1}{2}(X - X^f)^T B^{-1}(X - X^f) + \frac{1}{2}(X^{obs} - HX)^T R^{-1}(X^{obs} - HX), \quad (2.8)$$

где  $X$  - вектор, представляющий искомое поле (состояние атмосферы на момент анализа на сетке анализа),  $X^f$  - поле прогноза по гидродинамической модели атмосферы,  $X^{obs}$  - вектор наблюдений,  $B$  - матрица ковариаций ошибок прогноза,  $R$  - матрица ковариаций ошибок наблюдений,  $H$  - оператор наблюдений, связывающий наблюдения с истинным состоянием атмосферы:

$$X^{obs} = HX + \eta, \quad (2.9)$$

а  $\eta$  - вектор ошибок наблюдений. На данном этапе оператор  $H$  мы считаем линейным.

Уравнение (2.8) может быть выведено различными способами, например, с помощью теоремы Байеса. Именно, запишем функцию плотности вероятности (ФПВ) неизвестного состояния атмосферы как произведение априорной ФПВ (до получения наблюдений),  $p_a(X) = p(X | X^f)$ , и правдоподобия,  $p(X^{obs} | X)$ :

$$p(X | X^f, X^{obs}) \sim p_a(X)p(X^{obs} | X) \quad (2.10)$$

Далее, записывая априорную ФПВ в терминах ошибок прогноза:

$$p_a(X) = p(X | X^f) = p(\delta X^f | X^f) \quad (2.11)$$

(где  $\delta X^f = X^f - X$  - ошибка прогноза) и предполагая статистическую независимость  $\delta X$  и  $X^f$ , получаем

$$p_a(X) = p(\delta X^f) \quad (2.12)$$

Считая прогноз несмещённой оценкой истинного состояния и предполагая, что  $\delta X^f$  имеет многомерное нормальное распределение с ковариационной матрицей  $B$ , мы получаем

$$p_a(X) \sim \exp\left[-\frac{1}{2}(\delta X^f)^T B^{-1} \delta X^f\right] \quad (2.13)$$

Аналогично преобразуем правдоподобие  $p(X^{obs} | X)$  с использованием уравнения (2) и гипотезы о многомерном нормальном распределении ошибок наблюдений  $\eta$ , а также их статистической независимости от истинного состояния  $X$ .

$$p(X^{obs} | X) = p(HX + \eta = X^{obs} | X) = p(\eta = X^{obs} - HX),$$

откуда

$$p(X^{obs} | X) \sim \exp\left[-\frac{1}{2}(X^{obs} - HX)^T R^{-1}(X^{obs} - HX)\right]. \quad (2.14)$$

Объединяя формулы (2.13) и (2.14), окончательно получаем

$$p(X | X^f, X^{obs}) \sim \exp[-J], \quad (2.15)$$

где  $J$  - функционал (функция), определённый формулой (2.8).

Оптимальную оценку состояния атмосферы по информации, доставляемой численным прогнозом и наблюдениями, будем искать как максимум апостериорной ФПВ,  $p(X | X, X^{obs})$ . Но из уравнения (2.15) очевидно, что максимум  $p(X | X, X^{obs})$  соответствует минимуму  $J$  (т.к. функция  $\exp$  монотонная). Таким образом, оптимальная

оценка состояния атмосферы доставляет минимум функционалу  $J$ . Для решения оптимизационной задачи

$$J[X] \rightarrow \min \quad (2.16)$$

используем то обстоятельство, что при линейном операторе наблюдений  $H$  функционал  $J$  - квадратичный. С другой стороны, матрицы  $B$  и  $R$  (а также, следовательно, и  $B^{-1}$  и  $R^{-1}$ ) – положительно определённые (неотрицательная определённость следует из того, что  $B$  и  $R$  - ковариационные матрицы, а невырожденность – из предположения о том, что на прогностические значения в узлах сетки, ни наблюдения не являются линейно зависимыми). Поэтому функционал  $J$  имеет единственный минимум, который мы будем искать, дифференцируя  $J$  по  $X$  и приравнивая соответствующий градиент,  $\partial J / \partial X$ , к нулю. Имеем:

$$\frac{\partial J}{\partial X} = B^{-1}(X - X^f) + H^T R^{-1}(HX - X^{obs}) \quad (2.17)$$

Следовательно, оптимальная оценка,  $X^a$ , удовлетворяет линейному матрично-векторному уравнению

$$B^{-1}(X^a - X^f) + H^T R^{-1}(HX^a - X^{obs}) = 0,$$

откуда

$$(B^{-1} + H^T R^{-1} H)X^a = B^{-1} X^f + H^T R^{-1} X^{obs}. \quad (2.18)$$

Добавляя и вычитая член  $H^T R^{-1} H X^f$  в правой части уравнения (2.18), получаем

$$(B^{-1} + H^T R^{-1} H)X^a = (B^{-1} + H^T R^{-1} H)X^f + H^T R^{-1}(X^{obs} - HX^f) \quad (2.19)$$

Отсюда, окончательно,

$$Y^a = (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} Y^{obs} \quad (2.20)$$

где

$$Y^a = X^a - X^f$$

-т.н. инкремент анализа и

$$Y^{obs} = X^{obs} - HX^f \quad (2.21)$$

-т.н. вектор инноваций.

Запись уравнения анализа в форме (2.20) называется анализом в пространстве модели (см. также предыдущий подраздел), т.к. матрица

$$\tilde{C} = B^{-1} + H^T R^{-1} H, \quad (2.22)$$

которую необходимо обратить в (2.20), имеет размерность, равную размерности вектора численного прогноза.

При численном решении уравнения (2.20) достаточно численно решить систему уравнений

$$\tilde{C}Y^a = H^T R^{-1} Y^{obs} \quad (2.23)$$

Решение этой системы уравнений мы производим, используя метод сопряжённых градиентов.

В случае если оператор наблюдений нелинейный, алгоритм анализа усложняется введением т.н. внешнего цикла, на каждой итерации которого оператор наблюдений линеаризуется относительно полей, полученных на предыдущей итерации. Т.к. используемые на данном этапе наблюдения можно с достаточно высокой точностью считать линейными, внешний цикл в нашей схеме имеет в настоящее время только одну итерацию.

## 2.7 Выводы

Проанализировано состояние разработок в мире и в России в области регионального усвоения данных метеорологических наблюдений, обоснован выбранный путь решения поставленной задачи (3D-Var с последующим его включением в т.н. параметризованный ансамблевый фильтр Калмана), выбран алгоритм решения путём сведения региональной задачи к глобальной в т.н. «растянутой геометрии», выбрана (с обоснованием) конкретная форма уравнений вариационного анализа в т.н. "пространстве модели" с предобуславливанием, приведены основные уравнения анализа (трёхмерного усвоения) с кратким выводом.

## **3 МОДЕЛЬ COSMO**

### **3.1 Общее описание**

Модель COSMO (COSMO-Model) - это негидростатическая модель численного прогноза погоды на ограниченной территории, которая воспроизводит явления бета и гамма мезомасштаба, где негидростатические эффекты начинают играть важную роль в эволюции атмосферного потока.

Модель основана на уравнениях термо- и гидродинамики описывающей сжимающуюся и влажную атмосферу. Уравнения модели записаны во повёрнутой системе координат и совмещенных гибридных вертикальных координатах. Список блоков, из которых состоит модель COSMO можно посмотреть на рисунке 3.1.

Основное ядро модели COSMO (раньше известной как Local Model (LM)) было разработано в Deutscher Wetterdienst (DWD). Модель COSMO и глобальная модель GME [8] вместе с соответствующей схемой ассимиляции данных являются системой численного прогноза погоды в DWD, которая работает в оперативном режиме с 1999 года. Следующим этапом в развитии стало образование Консорциума для Мезомасштабного Моделирования (Consortium for Small-Scale Modelling - COSMO). Консорциум ставит перед собой целью совершенствование, поддержка и применение в оперативной работе негидростатической системы моделирования на ограниченной территории, которая впоследствии стала называться COSMO-Model.

Типы вычислительных сеток и система координат COSMO описаны в [9].

### **3.2 Начальные и граничные условия**

В этом разделе мы даём перечень полей начальных и граничных данных, необходимых для работы модели COSMO. Приводятся соответствующие имена переменных, файлов и т.п.

#### **3.2.1 Структура начальных и граничных условий из модели GME**

Начальные и граничные условия в технологиях COSMO обычно задаются интерполяцией данных, полученных из глобальной модели GME (Германия) или варианта модели COSMO с большим шагом сетки (Рис. 3.1). Возможно использование данных и других систем глобального моделирования, например ЕЦСПП.

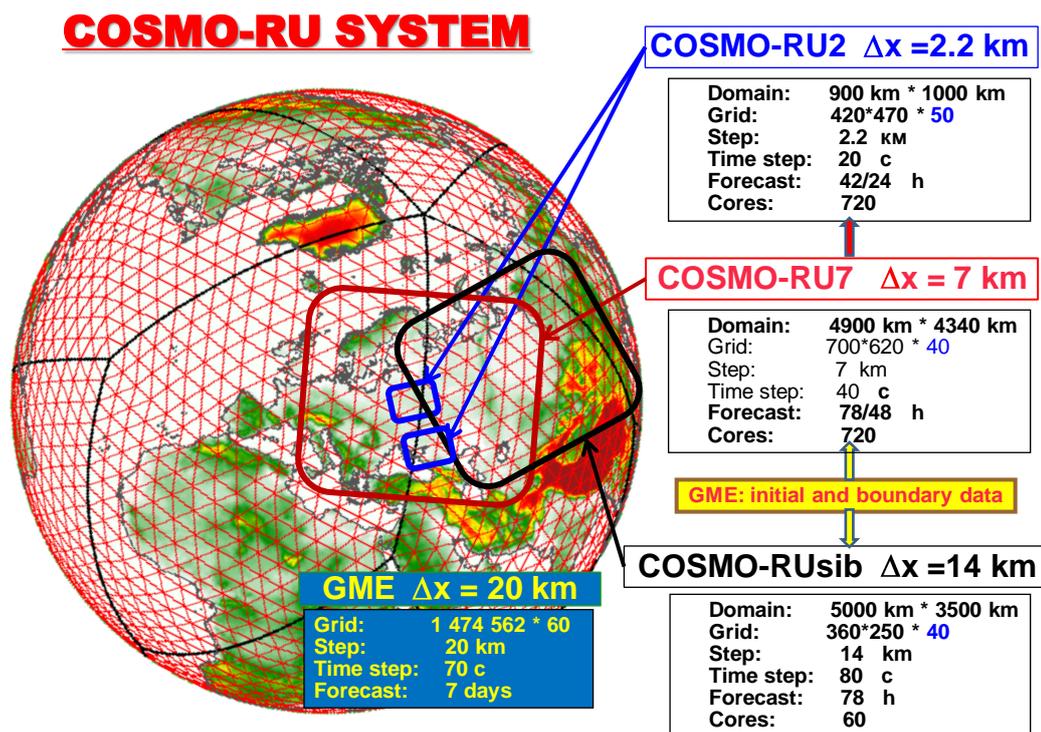


Рисунок 3.1 - Вложенные сетки COSMO-Ru и глобальной модели GME

В численных моделях атмосферы для расчета прогноза необходимо задание боковых граничных и начальных условий для расчетной области. Боковые граничные условия для региональных моделей обычно получают путем интерполяции из прогноза модели с более грубой сеткой. Начальные условия для региональных моделей могут быть подготовлены двумя способами:

- также как и боковые граничные условия - путем интерполяции из анализа или прогноза более грубой модели.
- через систему усвоения данных, которая подготавливает начальное поле на той же сетке.

В качестве исходных полей для модели COSMO-Ru7 с шагом горизонтальной сетки 7 км используется анализ и прогнозы глобальной модели GME из немецкой службы погоды (разрешение около 20 км) [8]. Для 2 км версии модели COSMO обычно используются данные из COSMO-Eu7. Интерполяцию осуществляет программа препроцессинга INT2LM, которая может принимать в качестве входных данных следующие модели: GME, IFS, GFS, UM, HIRLAM, JMA, COSMO. К примеру, итальянская и швейцарская службы погоды используют модель IFS Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды в качестве материнской модели для COSMO-Eu7.

В результате работы программы INT2LM подготавливаются файлы с начальными и граничными условиями. К примеру, для нулевого срока первого сентября 2013 года файл с начальными данными будет называться `laf2013090100`, а файл с граничными условиями для заблаговременности 6 часов – `lbff00060000`.

Поля в файле с начальными данными для модели COSMO можно разделить на три группы (см. таблицу 3.1):

- Характеристики подстилающей поверхности: температура и влажность почвы для многоуровневой модели TERRA-MULTILAYER, температура поверхности земли, снега, моря, влажность на поверхности, высота и влагозапас снега.
- Характеристики состояния атмосферы на 40 модельных уровнях: 3 компоненты ветра, температура, влажность, давление. При использовании непрерывного усвоения данных все эти поля обновляются с заданным в системе усвоения шагом.
- Постоянные и климатические характеристики. Для расчета прогноза необходимы данные о характеристиках подстилающей поверхности: рельеф, маска суша-море, типы почв, типы растительности, доля покрытия растительностью, маска суша/озеро, глубина озёр, а также информация о среднеклиматических значениях озона. Эти поля генерируются один раз в немецкой службе погоды или из общедоступных архивов, а далее используются в каждом прогнозе.

Граничные условия также можно разделить на три группы:

1. Характеристики почвы и поверхности: `T_SNOW`, `W_SNOW`, `QV_S`. Эти параметры являются обязательными.
2. Характеристики атмосферы: обязательными являются следующие параметры: `U`, `V`, `T`, `PP`, `QV`, `QC`. Граничные условия для вертикальной компоненты скорости ветра `W` необходимы, если отключено условие свободной верхней границы (параметр `lw_freeslip=FALSE`). Граничные условия для дополнительных характеристик влажности `QI`, `QR`, `QS` и `QG` не обязательны и зависят от наличия этих полей в исходной модели.

Начальное поле для модели COSMO содержится в файле `laf2013062700`. Этот файл содержит закодированные в код `grib` метеорологические поля. Их список можно посмотреть в таблице 3.1. Курсивом обозначены необязательные поля, а жирным шрифтом обязательные.

Таблица 3.1 - Список начальных полей для модели COSMO

№	Переменная	Описание	Источник
<b>Атмосферные поля</b>			
1	<b>U</b>	Зональная компонента скорости ветра, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
2	<b>V</b>	Меридиональная компонента скорости ветра, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
3	<b>W</b>	Вертикальная компонента скорости ветра (задается на полу-уровнях), 41 или 51 уровень	GME, COSMO
4	<b>T</b>	Температура, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
5	<b>PP</b>	Отклонение давления от среднего (эталонного), 40 или 50 уровней, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
	или <b>P</b>	Давление на модельных уровнях, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
6	<b>QV</b>	Удельное влагосодержание, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
7	<b>QC</b>	Удельное содержание облачной воды Дополнительные характеристики влажности (доступны не во всех исходных моделях), 40 или 50 уровней	GME, COSMO
8	<b>QI</b>	Удельное содержание льда, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
9	<b>QR</b>	Удельное содержание дождевых капель, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
10	<b>QS</b>	Удельное содержание снега, 40 или 50 уровней	GME, COSMO
11	<b>QG</b>	Удельное содержание твёрдой фракции осадков graupel, 40 или 50 уровней	COSMO
<b>Почвенные характеристики</b>			
1	<b>T_SO</b>	Температура почвенных уровней, 8 уровней	GME, COSMO
2	<b>W_SO</b>	Влагосодержание почвенных уровней, 8 уровней	GME, COSMO
3	<b>T_S</b>	Температура поверхности почвы	GME, COSMO
4	<b>QV_S</b>	Удельное содержание водяного пара на поверхности почвы	GME, COSMO
<b>Характеристики снежного покрова</b>			
1	<b>T_SNOW</b>	Температура поверхности снега	GME, COSMO
2	<b>RHO_SNOW</b>	Плотность снежного покрова	GME, COSMO
3	<b>FRESNOW</b>	Индекс «свежести» снега	GME, COSMO
4	<b>W_SNOW</b>	Содержание воды в снеге	GME, COSMO
5	<b>W_I</b>	Количество просачивающейся воды в снеге	GME, COSMO

<b>Характеристики морского льда</b>			
1	<i>H_ICE</i>	Высота слоя морского льда	GME, COSMO
2	<i>T_ICE</i>	Температура поверхности морского льда	GME, COSMO
3	<i>FR_ICE</i>	Доля морского льда в узле	GME, COSMO
<b>Константы</b>			
1	<b>HSURF</b>	Высота подстилающей поверхности	Внешние параметры
2	<b>FIS</b>	Геопотенциал подстилающей поверхности	Внешние параметры
3	<b>FR_LAND</b>	Доля суши в ячейке	Внешние параметры
4	<b>SOILTYP</b>	Тип почвы в ячейке	Внешние параметры
5	<b>Z0</b>	Параметр шероховатости	Внешние параметры
6	<b>PLCOV</b>	Покрывание ячейки растительностью. Для этих параметров программа INT2LM генерирует поля, соответствующие дню и времени года.	Интерполяция внешних параметров по времени года
7	<b>LAI</b>	Индекс площади листьев	Интерполяция внешних параметров по времени года
8	<b>ROOTDP</b>	Глубина корней	Внешние параметры
9	<b>FOR_E</b>	Доля ячейки, покрытая вечнозеленым лесом	Внешние параметры
10	<b>FOR_D</b>	Доля ячейки, покрытая лиственным лесом	Внешние параметры
11	<b>VIO3</b>	Содержание озона в вертикальном столбе атмосферы	Интерполяция внешних параметров по времени года
12	<b>HMO3</b>	Высота максимума содержания озона	Интерполяция внешних параметров по времени года
13	<i>FR_LAKE</i>	Доля ячейки, занятая водной поверхностью	Внешние параметры
14	<i>DEPTH_LK</i>	Средняя глубина озера в ячейке	Внешние параметры
15	<i>SSO_STD</i>	Стандартное отклонение подсеточной орографии	Внешние параметры
16	<i>SSO_GAMMA</i>	Анизотропия подсеточной орографии	Внешние параметры
17	<i>SSO_THETA</i>	Угол между главной осью подсеточной орографии и востоком	Внешние параметры
18	<i>SSO_SIGMA</i>	Угол уклона подсеточной орографии	Внешние параметры

Часть внешних параметров являются специальными характеристиками для климатического режима модели: PL\_COV, LAI, ROOTDP, VIO3, HMO3, T\_S.

Технологически в файле *laf* можно совмещать данные из разных источников - часть данных использовать из результатов интерполяции модели с грубым разрешением, а другую часть из самостоятельно подготовленных, скорректированных полей или собственного объективного анализа. Однако возможная несогласованность данных, возникающая при таком варианте, ложится на плечи экспериментатора.

### **3.2.2 Климатические характеристики и константы**

Климатические параметры и константы для определенной сетки подготавливаются один раз программой `extrag` [10] на основе имеющихся архивов с массивами данных об орографии, маски суша- моря, растительности, озёрных характеристиках и пр. В настоящее время в Гидрометцентре нет таких архивов, поэтому внешние параметры в случае необходимости генерируются в немецкой службе погоды.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СХЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО УСВОЕНИЯ ДАННЫХ

Приведены результаты верификации анализов и прогнозов, свидетельствующие о работоспособности разработанной схемы.

### 4.1 Общая характеристика полей анализа

Схема реализована на регионе Сибири. Разрешение 14 км, сетка 250 широт на 360 долгот. Северный полюс повернутой сферической системы координат Космо находится в точке с географической широтой 30 град. и географической долготой -95 град. Соответственно, точка С00 с космо-широтой и космо-долготой равными нулю находится на географической широте 60 град. и географической долготе 85 град. Центр области (точнее, центр «температурной» горизонтальной сетки Космо) смещён относительно точки С00 на -1.44 град. по широте и -0.56 град. по долготе.

Усваиваемые наблюдения:

синоптические Ps, T2m, U10m, V10m, Hum2m

аэрологические H, U, V, T, Hum

самолётные (T, U, V)

спутниковые микроволновые (яркостная температура Tb)

*Потенциально:*

- 1) *Спутниковые наблюдения за ветром: в атмосфере(AMV), а также за приводным ветром (скаттерометрия),*
- 2) *Профили коэффициента преломления по радиозатменным наблюдениям).*
- 3) *Радарные наблюдения радиального ветра (с создаваемой российской сети метеолокаторов нового поколения).*
- 4) *Радарные наблюдения содержания гидрометеоров по радиоэху (отражаемости) – по данным тех же метеолокаторов нового поколения.*

На рисунке 4.1 приведено поле анализа температуры на 15-м модельном уровне за 17.10.2012 срок 0.

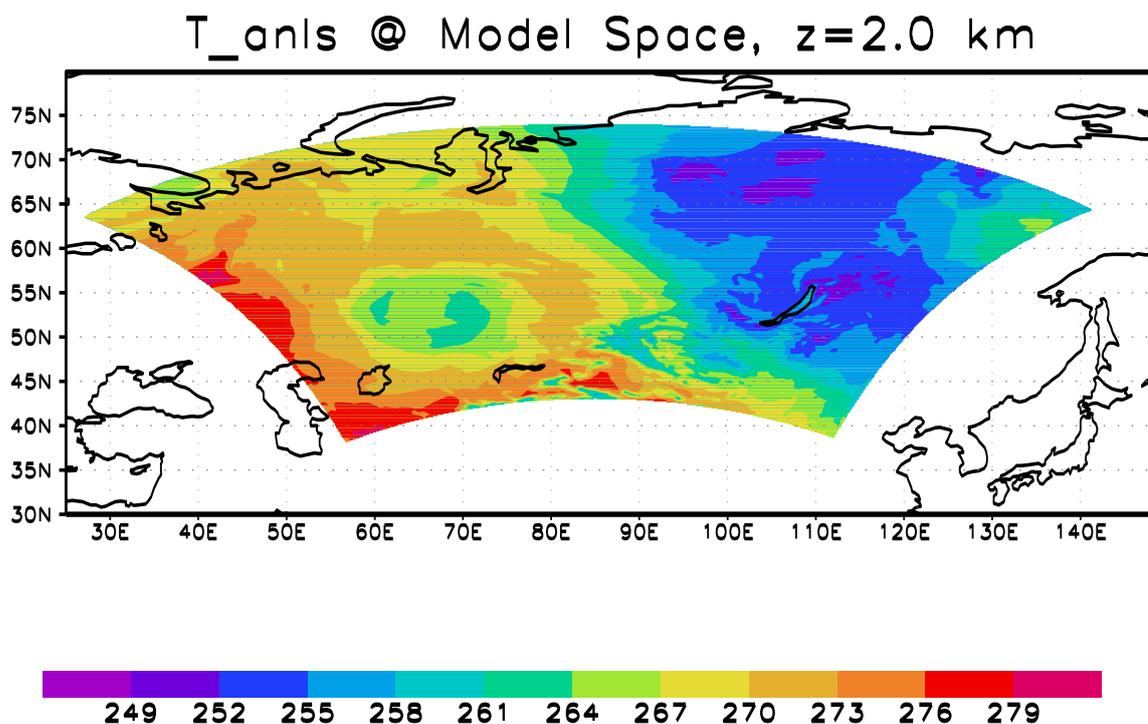


Рисунок 4.1 – Поле анализа температуры на 15-м модельном уровне за 17.10.2012 срок 0

На рисунке 4.2 приведено поле инкрементов анализа (т.е. отклонений от первого приближения) температуры – также на 15-м модельном уровне за 17.10.2012 срок 0.

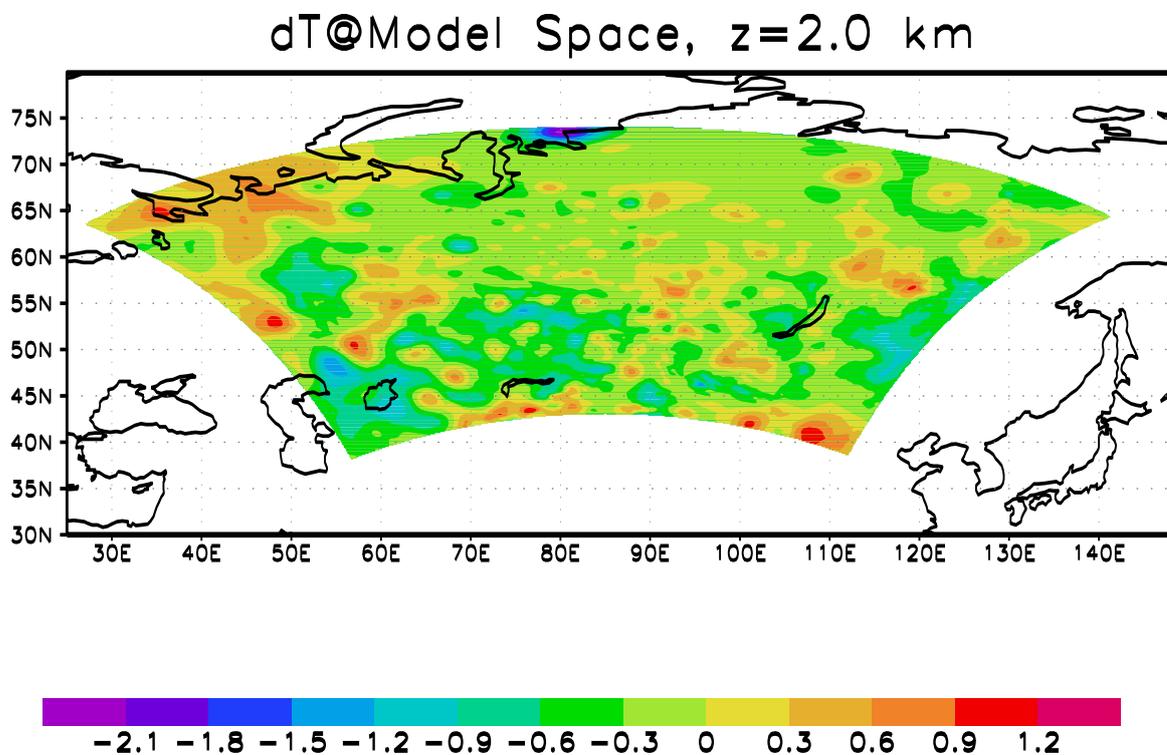


Рисунок 4.2 - Поле *инкрементов* анализа температуры на 15-м модельном уровне за 17.10.2012 срок 0

Видна большая детальность поля инкрементов в регионе Сибири – из-за большего количества усваиваемых наблюдений над этой достаточно большой территорией.

На рисунке 4.3 приведено поле инкрементов анализа (т.е. отклонений от первого приближения) температуры, также на 15-м модельном уровне за 17.10.2012 срок 0, но в «пространстве модели» (см. гл.1).

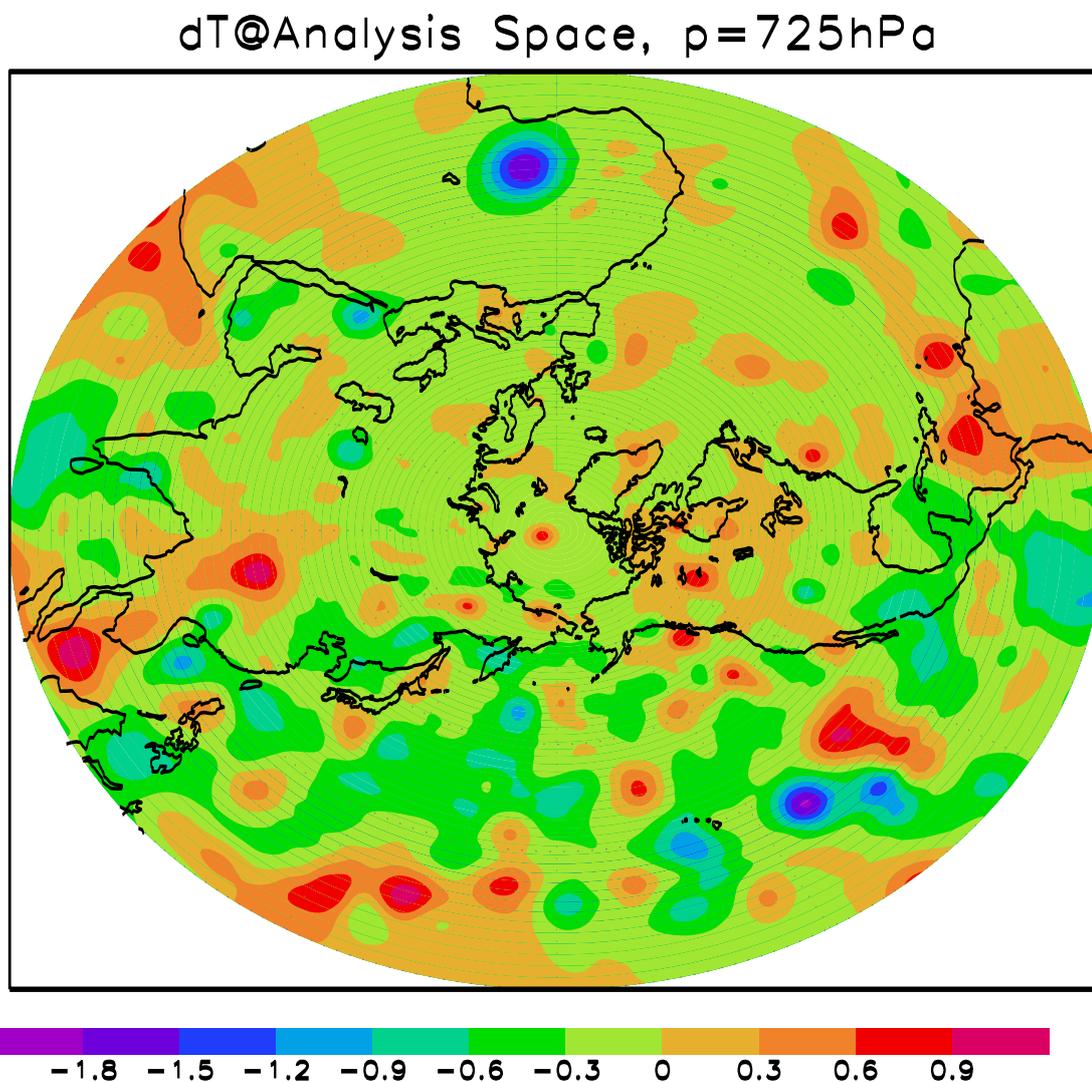


Рисунок 4.3 - Поле инкрементов анализа температуры на 15-м модельном уровне за 17.10.2012 срок 0 – в «пространстве анализа»

На рисунке 4.4 приведено поле анализа относительной влажности на 15-м модельном уровне за 17.10.2012 срок 0.

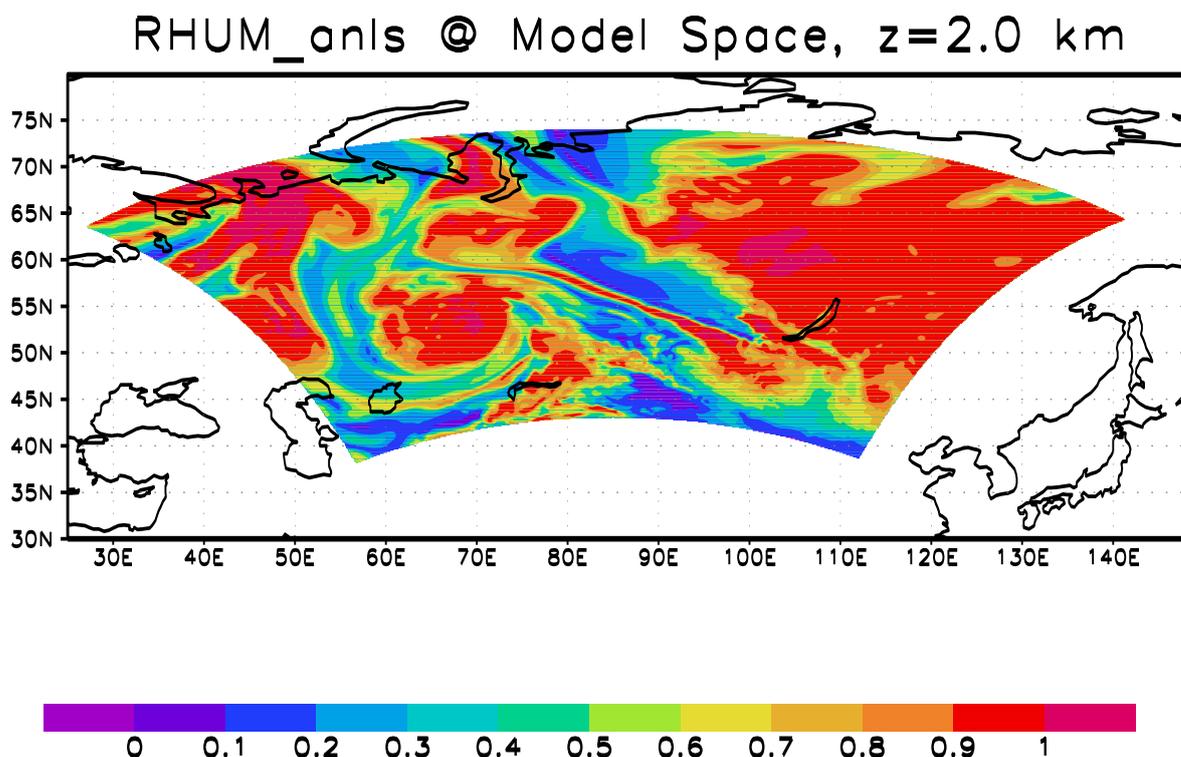


Рисунок 4.4 - Поле анализа относительной влажности на 15-м модельном уровне за 17.10.2012 срок 0

Видна реалистичная и сложная структура поля влажности.

#### 4.2 Включение в систему спутниковых наблюдений об уходящей радиации в микроволновом диапазоне длин волн

Реализована технология усвоения спутниковых наблюдений AMSU-A и MHS в системе регионального анализа. Данные AMSU-A чувствительны к профилям *температуры* в верхней тропосфере и стратосфере и общепризнанно являются весьма информативными. Однако их вклад контексте региональной модели, где акцент делается на прогнозе полей в тропосфере, особенно в нижней тропосфере (в частности, сетка исполтуемой нами версии Космо имеет верхний уровень на высоте всего лишь 21 км), неизбежно оказывается ниже. Данные MHS чувствительны к профилям *влажности* в тропосфере и имеют большее разрешение по горизонтали, однако меньшее число каналов. Данные AMSU-A имеют очень высокую точность (примерно 0.2 градуса по каналу 6), данные MHS имеют существенно более низкую точность.

В глобальных схемах мы усваиваем каналы 5-10 AMSU-A и каналы 3-5 MHS. Для Космо нам пришлось оставить только один 6-й канал AMSU-A и один 3-й канал MHS. Была

реализована процедура преобразования координат спутниковых наблюдений из географической системы координат в (повёрнутую) систему координат Космо и затем в систему координат анализа (повёрнутую растянутую по ко-широте систему координат). Были также реализованы процедуры контроля качества и прореживания спутниковых наблюдений. Применение радиационной модели RTTOV, реализующей «вертикальную компоненту» оператора наблюдений, адаптировано для вертикальной координаты Космо  $\mu$ : гибридной координаты, следующей за рельефом (т.е. равной нулю на самом рельефе) в нижней тропосфере и постепенно переходящей в геометрическую высоту  $z$  над уровнем моря ( $\mu = z$  выше 11 км 430 м).

В дальнейшем мы планируем расширить область анализа вверх, добавляя уровни из «родительской» глобальной модели – с тем чтобы иметь возможность усваивать большее число каналов спутниковых радиометров.

#### 4.3 Отклонение первого приближения и анализа от наблюдений

Сравниваем отклонения наблюдений от первого приближения,  $OmF$ , с отклонениями наблюдений от анализа,  $OmA$ . В таблице 4.1 мы приводим данные за наугад выбранный срок: 12.03.2013 срок 0 (за другие сроки картина аналогична).

Таблица 4.1

Элемент	$OmF$	$OmA$
Phi, m	17.7	14.5
T, K	2.26	0.97
U, m/s	2.53	1.58
V, m/s	2.43	1.59
RHUM, %	22	13

Из таблицы 4.1 видно, что для всех видов наблюдений  $OmF$  больше, чем  $OmA$ . Это свидетельствует о том, что схема анализа работает правильно, т.к. после усвоения данных наблюдений поле анализа становится ближе к наблюдениям, чем поле первого приближения. Следует отметить, что отличие  $OmA$  от  $OmF$  для геопотенциала меньше, чем для других полей. Это объясняется тем, что из радиозондовых профилей мы усваиваем температуру и

влажность, но не геопотенциал. В качестве наблюдений геопотенциала, мы усваиваем только наблюдения приземного давления (рассматривая геопотенциальную высоту станции в качестве наблюдения, а измеренное давление в качестве вертикальной координаты).

#### 4.4 Результаты верификации прогнозов

В данном пункте мы приводим основной полученный результат – точность прогнозов (в данном случае – 6-часовых), стартующих с наших полей анализа.

Испытания проходили в период октябре 2012 г. и феврале-марте 2013 г. Схема продемонстрировала устойчивую работу.

##### 4.4.1 Верификация 6-часовых прогнозов

Сравнению подвергались:

1) 6-часовой прогноз КОСМО, стартовавший с начальных данных Немецкой службы погоды DWD (статический прогноз) (в таблице 4.2 обозначенный DWD).

2) 6-часовой прогноз КОСМО, стартовавший с анализов, полученных в нашей схеме циклического усвоения 3D-Var без использования спутниковых радиаций (в таблице 4.2 обозначенный 3DV-NoSAT).

3) 6-часовой прогноз КОСМО, стартовавший с анализов, полученных в нашей схеме циклического усвоения 3D-Var с использованием спутниковых радиаций (в таблице 4.2 обозначенный 3DV-SAT).

4) 6-часовой прогноз КОСМО, работающий в режиме «даунскейлинга», т.е. используются только боковые, верхнее и нижнее граничные условия, но не используются наблюдения (в таблице 4.2 обозначенный NoOBS).

Вычислялись среднеквадратичные ошибки по отношению ко всем усваиваемым наблюдениям (осреднение по всем уровням). Область верификации: вся область прогноза. Период осреднения: 1 декабря 2013 срок 06 -- 12 декабря 2013 срок 00.

Таблица 4.2 - Верификация прогнозов по наблюдениям

Конфигурация	H, m	T, K	U, m/s	Rel.Hum., %
NoOBS	20.5	2.52	2.76	22.1
DWD	16.9	2.40	2.42	21.4
3DV-NoSAT	18.0	2.44	2.56	20.3
3DV-SAT	17.8	2.42	2.55	20.3

Из таблицы 4.2 видно, что данные наблюдений существенно улучшают прогноз (ср. строки 3DV с NoOBS) - по сравнению с чистым «даунскейлингом». Видно также, что прогнозы по нашим анализам имеют точность, соизмеримую с точностью прогнозов, использующих начальные данные DWD (хотя и несколько уступают ей - ср. строки 3DV с DWD). Мы надеемся в дальнейшем «догнать» DWD в результате реализации 2-х улучшений: (1) большее число каналов спутниковых радиометров и (2) задание более адекватной статистики ошибок первого приближения (эксперименты показывают, что здесь есть заметный потенциал роста). Заметим, что на данном этапе новая разрабатываемая в рамках проекта KENDA консорциума Космо схема ансамблевого фильтра Калмана также пока не достигла уровня интерполированного глобального прогноза.

#### **4.5 Выводы**

- 1) Создана схема регионального 3D-Var на базе унифицированного солвера.
- 2) Схема настроена на область КОСМО-Сиб.
- 3) Проведены численные эксперименты по усвоению контактных и спутниковых наблюдений в Сибирском регионе.
- 4) Эксперименты показали работоспособность схемы.
- 5) Насчитанные анализы успешно использованы в качестве начальных данных для прогнозов КОСМО.
- 6) Авторские испытания показали, что уровень качества 6-часовых прогнозов с использованием разработанной системы циклического усвоения данных соизмерим с уровнем качества прогнозов, стартующих с полей интерполированного глобального анализа DWD.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате реализации данного проекта создана оригинальная система регионального циклического усвоения метеорологических наблюдений на базе созданной нами унифицированной технологии трёхмерного вариационного усвоения 3D-Var, не имеющая отечественных аналогов. Новая система усвоения предназначена для оперативного внедрения в Гидрометцентре России, а также в региональных прогностических центрах нашей страны. Полученные в ходе усвоения поля метеозаписей могут быть также использованы для задач климатического мониторинга, экологического мониторинга и прогноза, долгосрочного прогноза и т.п. Достоинством данной разработки является унификация теоретических подходов и технологий для процедур усвоения как метеорологических, так и океанологических данных, на разных пространственных масштабах от планетарного до мезо масштаба.

Авторские испытания системы продемонстрировали её работоспособность.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Y. Seity, P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, V. Masson. The AROME-France Convective-Scale Operational Model. // *Monthly Weather Review*, 2011, V. 139, 976-991.

2 Jean-François Caron, Luc Fillion. An Examination of the Incremental Balance in a Global Ensemble-Based 3D-Var Data Assimilation System. // *Monthly Weather Review*, 2010, V. 138,, 3946-3966.

3 Mark Dixon, Zhihong Li, Humphrey Lean, Nigel Roberts, Sue Ballard. Impact of Data Assimilation on Forecasting Convection over the United Kingdom Using a High-Resolution Version of the Met Office Unified Model. // *Monthly Weather Review*, 2009, V. 137, 1562-1584.

4 M. Lindskog, K. Salonen, H. Järvinen, D. B. Michelson. Doppler Radar Wind Data Assimilation with HIRLAM 3DVAR. // *Monthly Weather Review*, 2004, V.132, pp. 1081-1092

5 Xiang-Yu Huang, Qingnong Xiao, Dale M. Barker, Xin Zhang, John Michalakes, Wei Huang, Tom Henderson, John Bray, Yongsheng Chen, Zaizhong Ma, Jimy Dudhia, Yongrun Guo, Xiaoyan Zhang, Duk-Jin Won, Hui-Chuan Lin, Ying-Hwa Kuo. Four-Dimensional Variational Data Assimilation for WRF: Formulation and Preliminary Results. // *Monthly Weather Review*, 2009, V. 137, 299-314

6 Tanguay, Fillion L., Lapalme E., Lajoie M. : Four-Dimensional Variational Data Assimilation for the Canadian Regional Deterministic Prediction System. // *Mon. Wea. Rev.*, 2012, V.140, 1517–1538.

7 Masahiro Kazumori. Satellite Radiance Assimilation in the JMA Operational Mesoscale 4D-Var System. // *Monthly Weather Review*, 2013 (в печати).

8 The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution tests. Majewski, D., D. Liermann, P. Prohl, B. Ritter, M. Buchhold, T. Hanisch, G. Paul, W. Wergen. 130, 319–338, s.l. : *Mon. Wea. Rev.*, 2002.

9 U., Shattler. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model Part VII: Dynamics and Numerics. Offenbach : [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org), 2011.

10 Raw data sources for the generation of external parameters for COSMO and GME. *Сайт COSMO-Model*. [В Интернете] <http://cosmo-model.org/content/model/modules/externalParams/default.htm>.