

АНСАМБЛЕВЫЙ СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ: РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ НА СОВРЕМЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ БАЗЕ

Е.Д. Астахова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский
центр Российской Федерации
helen@metcom.ru*

Введение

Прогноз погоды – это описание будущей эволюции состояния атмосферы на основе результатов численного интегрирования во времени уравнений гидротермодинамики атмосферы. Для решения этой задачи необходимо знание начального состояния атмосферы, которое характеризуется пространственным распределением скорости ветра, температуры, влажности, приземного давления, альбедо поверхности и т.д. и определяется с использованием данных наблюдений и специальных процедур их усвоения. Число данных наблюдений мало по сравнению с числом степеней свободы атмосферы, наблюдения неоднородно распределены в пространстве и во времени, к тому же они содержат инструментальную ошибку. Поэтому начальное состояние атмосферы всегда определяется (и будет определяться) неточно. Фактически начальное состояние атмосферы, от которого начинается интегрирование уравнений прогноза, можно рассматривать только как наилучшее приближение к истине. Это имеет принципиальное значение, так как за счет хаотической и нелинейной динамики атмосферы даже очень малые ошибки в начальном состоянии могут привести к существенным ошибкам в описании эволюции атмосферы. Добавим также, что модели атмосферы, используемые для численного прогноза

погоды, несовершенны – они имеют (и всегда будут иметь) конечное разрешение, некоторые процессы в атмосфере не учитываются или описываются параметрически.

Таким образом, независимо от прогресса наблюдательных систем, методов усвоения данных и численного моделирования, результаты численных прогнозов всегда будут содержать ошибки, то есть можно сказать, что прогнозам погоды присуща принципиальная неопределенность. При этом существенно, что качество отдельного прогноза зависит не только от его заблаговременности, но и от прогностической ситуации. Есть более и менее предсказуемые ситуации, в которых качество прогноза по одной и той же прогностической системе будет существенно различным. Пользователю необходим не только как можно более точный прогноз, но и априорная оценка степени его неопределенности. Для решения последней задачи разрабатываются методы ансамблевого прогнозирования.

В основе методов ансамблевого прогнозирования лежит идея о необходимости рассмотрения эволюции не единичного состояния атмосферы, а плотности их распределения. С помощью специальных процедур формируется ансамбль начальных данных, являющийся репрезентативной выборкой из распределения возможных состояний атмосферы, и производится многократное интегрирование модели атмосферы, начиная с этих данных. Считается, что получаемый ансамбль прогнозов описывает распределение состояний атмосферы в будущем. Дополнительно разработаны методы учета неопределенностей прогноза, возникающих за счет несовершенства моделей.

Среднее по ансамблю дает лучшую (по сравнению с единичным, детерминированным прогнозом) оценку первого момента распределения состояний атмосферы в будущем (в частности за счет того, что осреднение позволяет отфильтровать непредсказуемые эффекты в прогнозе), а разброс прогностических характеристик в ансамбле может рассматриваться как индикатор возможной точности прогноза. Кроме того, ансамбли прогнозов дают разнообразную информацию о вероятности различных событий (вероятности выпадения осадков, порывов ветра и т.п.).

Методы ансамблевого прогнозирования развиваются чрезвычайно интенсивно. Практически все ведущие метеорологические

центры имеют системы ансамблевого прогноза – глобальные и/или региональные [12, 15, 18]. В Гидрометцентре России также была разработана и реализована система ансамблевого кратко- и среднесрочного прогноза [1, 2, 9]. Система была основана на использовании модели низкого разрешения (около 150 км по горизонтали), имела небольшой объем выходной продукции и не отвечала требованиям, предъявляемым к оперативным системам прогноза. К сожалению, долгое время развитие системы сдерживалось недостаточностью компьютерных ресурсов.

В настоящее время в рамках программы «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета» в ММЦ «Москва» установлены два суперкомпьютера: Altix ICE 8200, который находится на 22 месте в последней 14-й редакции (от 29 марта 2011 года) списка наиболее мощных компьютеров СНГ Top50 с производительностью на тесте Linpack 13,7 TFlop/s (354 четырехядерных процессоров Xeon E5440 2.83 GHz, Infiniband 4x DDR), и Altix 4700, находящийся на 29 месте с производительностью 10,3 TFlop/s (832 двухядерных процессоров Itanium 2 1.66 GHz, NUMALink). Это дает возможность разрабатывать и реализовывать в оперативной практике ансамблевые системы прогнозов на средние сроки.

В настоящей статье приводится описание новой системы ансамблевого прогноза Гидрометцентра России, основанной на модели более высокого, чем прежде, разрешения, ежедневно предоставляющей большой объем выходной продукции и функционирующей в режиме, близком к оперативному.

Общая характеристика системы ансамблевого прогнозирования Гидрометцентра России

Ансамблевая система кратко- и среднесрочного прогнозирования Гидрометцентра России реализована на ЭВМ Altix 4700. В качестве основной модели в ней использована спектральная модель атмосферы Гидрометцентра России с разрешением 169 гармоник и 31 уровень по вертикали [3–5, 8]. Пре- и постпроцессинг модели оперативной технологии среднесрочного прогноза [5, 6] были модифицированы для применения в системе ансамблевых прогнозов.

Ансамбль представляет собой совокупность прогнозов, стартующих со слегка различающихся начальных данных. Используются невозмущенные начальные данные (результаты объективного анализа) и возмущенные начальные данные, отличия которых от результатов объективного анализа сопоставимы с его ошибками. Такой ансамбль начальных данных генерируется с помощью бридинг-метода [17, 18]. Этот метод, называемый еще методом выращивания наиболее быстро растущих мод, является наиболее простым из всех разработанных на настоящее время [11, 15, 18] и требует наименьших компьютерных ресурсов.

В настоящее время ансамбль состоит из прогноза по модели T169L31 [5] по невозмущенным начальным данным (контрольный или невозмущенный прогноз), 12 прогнозов по модели T169L31 по возмущенным начальным данным (возмущенные прогнозы) и прогноза по невозмущенным начальным данным по полулагранжевой модели ПЛАВ-2008 Гидрометцентра России и ИВМ РАН [7]. Разрешение обоих использованных моделей сопоставимо – около 70 км по горизонтали, 31 и 28 уровней по вертикали соответственно. В настоящее время в ансамблевой системе среднесрочного прогноза Гидрометцентра России все реализации используются с одинаковыми весами. Прогнозы рассчитываются в режиме реального времени для заблаговременностей до 10 суток по сроку 12 ч ВСВ.

Генерация возмущений начальных данных

Возмущения начальных данных генерируются с помощью бридинг-метода. Бридинг-метод был разработан в NCEP [16, 17] и до недавнего времени применялся в оперативной системе глобального ансамблевого прогноза этого центра.

В использованной в ансамблевой системе Гидрометцентра России версии метода возмущения начальных данных генерируются отдельно для каждой пары прогнозов.

Бридинг-метод, реализованный для пары прогнозов, включает в себя несколько шагов:

а) добавление малых положительных и отрицательных произвольных стартовых возмущений (положительные и отрицательные

возмущения равны по модулю) к данным о состоянии атмосферы на момент времени t_0 ; таким образом, создается два возмущенных набора начальных данных для модели атмосферы для момента времени t_0 ;

б) вычисление и сохранение нормы этих возмущений;

в) интегрирование пары моделей (в нашем случае — одинаковых) на период с t_0 до t_1 (не более 1–2 суток, длину интервала $t_1 - t_0$ назовем шагом бридинга), начиная с возмущенных исходных данных для момента t_0 (см. п. а));

г) вычисление разности между результатами пары прогнозов по возмущенным данным на момент t_1 ;

д) масштабирование полученного поля разностей на норму стартового возмущения; в результате получается новое возмущение;

е) добавление полученного возмущения в данные о состоянии атмосферы для срока t_1 и вычитание возмущения из этих данных;

ж) построение цикла, аналогичного описанному выше (так называемого бридинг-цикла), начиная с шага в) для момента t_1 , и т.д.

С помощью этого метода получают начальные данные для двух возмущенных прогнозов ансамбля. Тот факт, что при этом к невозмущенным начальным данным прибавляются одинаковые возмущения, взятые с противоположным знаком, позволяет обеспечить несмещенность среднего по ансамблю.

Для того, чтобы возмущения, вычисленные с помощью описанной выше схемы, стали бы суперпозицией наиболее быстро растущих мод, соответствующих текущему состоянию атмосферы и характеризующих ее изменчивость, надо выполнить 5–6 бридинг-циклов («вырастить» возмущения). Получаемые после этого наборы возмущенных начальных данных можно использовать для формирования ансамбля прогнозов. Назовем этот этап «разгонкой» ансамблевой системы, а возмущения, с которых начинается разгонка системы, — стартовыми. На этапе разгонки нет необходимости выполнять интегрирование модели на длительный срок, достаточно получать прогноз с заблаговременностью, равной шагу бридинга. В системе Гидрометцентра используется шаг бридинга, равный 12 ч ($t_1 - t_0 = 12$ ч).

После окончания периода разгонки схема вычислений остается неизменной, только максимальная заблаговременность прогноза

меняется в зависимости от начального срока прогноза. Система дает прогноз на 240 ч по сроку 12 ч ВСВ (результаты прогноза архивируются, а 12-часовой прогноз используется для следующего бридинг-цикла) и на 12 часов по сроку 00 ч ВСВ (результаты используются только для формирования новых возмущений).

Реализацию бридинг-цикла для пары прогнозов в Гидрометцентре России демонстрирует рис. 1. Для наглядности на рисунке заблаговременности прогнозов зависят от срока, хотя, как было отмечено выше, на этапе разгонки можно и по сроку 12 ч ВСВ выпускать только 12-часовой прогноз.

Дадим некоторые пояснения по каждому из основных блоков, представленных на рис. 1.

1) Стартовое возмущение (т.е. те произвольные возмущения, которые задаются в начале разгонки системы) — 0,6 от разности полей температуры, горизонтальных компонент скорости и приземного давления, содержащихся в двух стартовых наборах для модели, полученных с помощью препроцессинга на основе результатов объективного анализа данных наблюдений и на основе результатов 12-часовых прогнозов по спектральной модели на срок анализа. Норма стартового возмущения рассчитывается по приведенной ниже формуле и сохраняется. В дальнейшем предполагается, что все последующие возмущения имеют ту же самую норму, что достигается их масштабированием. В качестве нормы в системе используется полная энергия возмущения E , рассчитываемая по формуле [13]:

$$E = \iiint \left\{ u'^2 + v'^2 + \frac{C_p T'^2}{T_{ref}} \right\} dp ds + \iint \frac{RT_{ref}}{p_{ref}^2} p_s'^2 ds,$$

где T' , p'_s , u' , v' — возмущения температуры, приземного давления и горизонтальных компонент скорости соответственно; C_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении; p — давление; s — площадь; R — газовая постоянная для воздуха; $T_{ref} = 270$ К; $p_{ref} = 1013$ гПа. Норма рассчитывается для трех регионов — тропическая зона (20N–20S) и внутритропические области Южного и Северного полушарий. Соответственно, интегрирование в формуле выполняется по этим регионам.

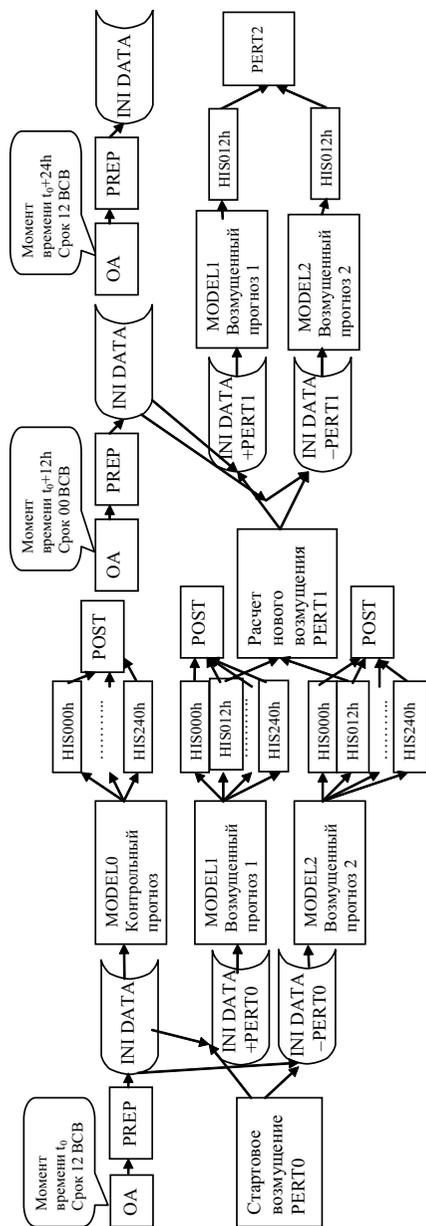


Рис. 1. Схема реализации бридгинг-метода в Гидрометцентре России:

OA – объективный анализ, PREP – препроцессинг, POST – постпроцессинг,
 INI DATA – стартовый набор для модели, HIS000h–HIS240h – архивные файлы для прогноза на 0–240 ч,
 MODEL – счет по модели, INI DATA + PERT и INI DATA – PERT возмущенные стартовые наборы для модели.

2) **Объективный анализ (OA)** – текущая информация о состоянии атмосферы на сетке $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ берется из общедоступной базы данных S125, содержащей результаты объективного анализа Гидрометцентра России.

3) **Препроцессинг** – модифицированная версия оперативного препроцессинга спектральной модели среднесрочного прогноза, позволяющая подготавливать для нее стартовый набор на основе как данных объективного анализа, так и результатов предыдущих прогнозов различных заблаговременностей на срок анализа. Для подготовки стартового набора данных для спектральной модели используются текущие данные (объективный анализ Гидрометцентра России) о состоянии атмосферы, температуре подстилающей поверхности, высоте снежного покрова, а также климатические среднемесячные данные о влагосодержании подстилающей поверхности и среднегодовые данные об альбедо подстилающей поверхности и ее шероховатости.

4) **Модель** – спектральная глобальная модель T169L31, шаг по времени 450 с, полные радиационные расчеты выполняются раз в час, в промежутках суточный ход учитывается по приближенной методике, используется нелинейная адиабатическая инициализация по нормальным модам.

5) **Расчет нового возмущения** – новое возмущение определяется как полуразность результатов двух возмущенных прогнозов на данный момент времени, полученных на модельной сетке с заблаговременностью 12 ч по системе ансамблевых прогнозов и записанных в соответствующие архивные файлы. Рассматриваются поля температуры, горизонтальных компонент скорости и приземного давления. Для трех регионов вычисляется норма полученного возмущения, и оно масштабируется на соответствующую норму стартового возмущения. Нормированное возмущение добавляется непосредственно в стартовый набор, приготовленный на сетке модели с помощью препроцессинга на основе результатов объективного анализа, и вычитается из него.

6) **Постпроцессинг** – модифицированный постпроцессинг спектральной модели, выполняющий переинтерполяцию и архивацию прогностических результатов. Запись результатов ансамблевого прогноза ведется в циркулярный файл базы данных NEPS БНД «Прогноз»;

результаты для всех прогностических реализаций ансамбля представлены в виде двойных рядов данных. База данных NEPS расположена на дисковом массиве, доступном как локальный для ЭВМ Altix 4700. Указанный дисковый массив также доступен с персональных компьютеров Гидрометцентра России, находящихся в локальной сети, что позволяет разрисовывать прогностические поля с помощью программы «Изограф». Цикличность базы — 40 суток, в нее записываются результаты ансамблевого прогноза для срока 12 ч ВСВ. Состав базы был определен в соответствии с требованиями к ансамблевой продукции, подлежащей международному обмену в рамках проекта THORPEX/TIGGE [10] (список параметров можно найти на сайте http://tigge.ecmwf.int/tigge/d/show_archive/table=parameters/).

Выше было дано подробное описание способа формирования ансамбля из контрольного прогноза (по невозмущенным данным) и двух возмущенных прогнозов (по возмущенным данным). Однако система ансамблевых прогнозов должна включать не менее 10 прогностических реализаций.

Для того, чтобы создать большой ансамбль, мы для разных пар начинаем разгонку с разных моментов времени, например, для пары 1 — с момента времени t_0 , для пары 2 — с t_0-12 ч, для пары 3 — t_0-24 ч и т.п., и используем разный период «выращивания» возмущений до того момента, когда их можно использовать в прогнозе. Например, стартуя с момента времени t_0 , мы выращиваем возмущение в течение 48 часов, а при старте с момента времени t_0-12 ч считается, что подходящее возмущение вырастает за 60 часов и т.д. При этом естественным образом получается, что стартовые возмущения для всех пар ансамбля различны (в соответствии с описанным выше методом их задания).

Особенности реализации системы ансамблевого прогноза на ЭВМ Altix 4700

Система ансамблевого прогнозирования — большой комплекс, включающий в себя программы на языке Фортран, управляющие сценарии на Korn Shell, базы данных. Задача ансамблевого прогноза состоит их множества подзадач, выполняемых последовательно или параллельно как на 16-процессорном внешнем (front-end) сервере, так

и на суперкомпьютере Altix 4700. Все вычислительные задачи с помощью системы очередей PBS отправляются на суперкомпьютер.

Расчеты всех прогнозов ансамбля выполняются одновременно и с использованием параллельных вычислений для каждого из прогнозов. Программное обеспечение спектральной модели атмосферы распараллелено с помощью технологии MPI, что позволяет быстро выполнять прогноз на многопроцессорной системе. Кроме того, при функционировании системы в реальном режиме времени одновременно с задачей интегрирования модели атмосферы запускается задача постпроцессинга, обрабатывающая результаты прогноза по мере их готовности, что позволяет раньше предоставлять продукцию пользователям.

В настоящее время для каждого прогноза ансамбля используется 17 процессоров — 16 для интегрирования модели и 1 для выполнения постпроцессинга. Для ансамбля из 13 прогностических реализаций по модели T169L31 (1 контрольный прогноз и 12 возмущенных прогнозов) нужен 221 процессор. При этом необходимое время CPU для функционирования системы на ЭВМ Altix 4700 составляет около 50 минут в сутки.

Для функционирования ансамблевой системы в реальном режиме времени ежедневно с помощью демона cron осуществляется запуск двух задач: одна из них — ансамблевый прогноз по сроку 12 ч ВСВ на 10 суток; вторая — ансамблевый прогноз по сроку 00 ч ВСВ на 12 часов. Вторая задача необходима для формирования начальных возмущений, т.к. используемый шаг бридинга — 12 часов.

Как было отмечено выше, в качестве одной из прогностических реализаций в ансамбле используется прогноз по модели ПЛАВ-2008 по невозмущенным данным. Эти данные берутся из общедоступной базы LAG1, содержащей результаты детерминированного прогноза по этой модели, переписываются в базу данных NEPS и используются в дальнейшем при обработке результатов ансамблевого прогноза.

Анализ качества системы ансамблевого прогноза

Важной характеристикой ансамблевой системы является величина разброса прогнозируемых системой величин, обычно определяемая как среднеквадратическое отклонение прогностических значений во

всех реализациях ансамбля от среднего по ансамблю прогноза. В правильно сгенерированном ансамбле разброс должен быть таким, чтобы истинное (наблюдаемое) значение метеорологического элемента всегда оказывалось внутри прогнозируемого диапазона его значений. Однако за счет ограниченности размера ансамбля (в основном связанном с ограниченностью компьютерных ресурсов) нередко результаты объективного анализа оказываются вне диапазона, охватываемого различными прогнозами ансамбля. Теоретически для ансамбля из 13 реализаций это должно происходить приблизительно в 15 % случаев (2/13).

Мы проанализировали так называемые карты-«спагетти», являющиеся стандартной выходной продукцией системы ансамблевого прогноза, для температуры на уровне 850 гПа и высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа (не показаны). На таких картах изображается всего несколько характерных изолиний для рассматриваемого поля, но для всех прогнозов ансамбля. На эту же карту были нанесены изолинии, показывающие результаты объективного анализа. Оказалось, что для нашей системы частота попадания фактического значения вне облака прогнозов не превышает 15–20 %.

Более детально разброс ансамбля можно проанализировать с помощью так называемых диаграмм Талаграна (или ранговых гистограмм) [14]. Для их построения применяется следующая процедура. Для выбранного метеорологического элемента f рассматривается ансамбль его прогностических значений f_1, \dots, f_N , где N – число членов ансамбля. Эти прогностические значения упорядочиваются по возрастанию и весь диапазон прогноза разбивается на $N+1$ интервал (первый интервал – значения меньше минимального f , $(N+1)$ -й – значения больше максимального f , и т.д.). Затем определяется номер того интервала, в который попадает наблюдение, соответствующее данному моменту времени. Такая процедура повторяется в каждой точке пространства и затем строится гистограмма, показывающая частоту попадания наблюдения в i -й интервал. В случае правильного формирования ансамбля, все столбики диаграммы Талаграна должны быть одинаковой высоты.

На рис. 2 представлены диаграммы Талаграна для старой и новой версий ансамблевой системы, основанной на моделях T85L31 и T169L31. U-образный вид диаграммы для температуры на уровне 850 гПа свидетельствует о недостаточности разброса в ансамбле. Однако для давления

на уровне моря (нижний рисунок) вид гистограмм вполне удовлетворительный. На обоих рисунках очевидно преимущество новой системы.

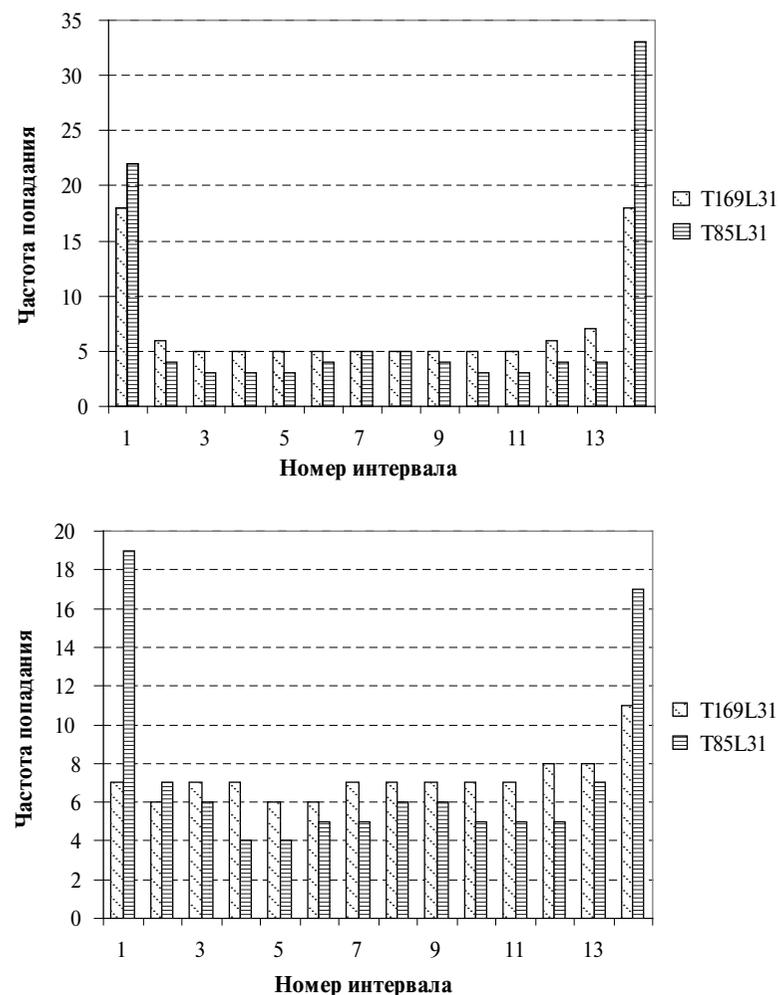


Рис. 2. Диаграммы Талаграна для ансамблевых систем, построенных на основе моделей T85L31 и T169L31: для 96-часового прогноза температуры на уровне 850 гПа (сверху) и 216-часового прогноза давления на уровне моря (снизу), 23 февраля–19 марта 2011 г.

Еще одним важным требованием, предъявляемым к ансамблевым системам, является согласованность скорости роста разброса в ансамбле и среднеквадратической ошибки контрольного прогноза с увеличением заблаговременности прогноза. Рис. 3 демонстрирует соответствие этих характеристик для рассматриваемой ансамблевой системы.

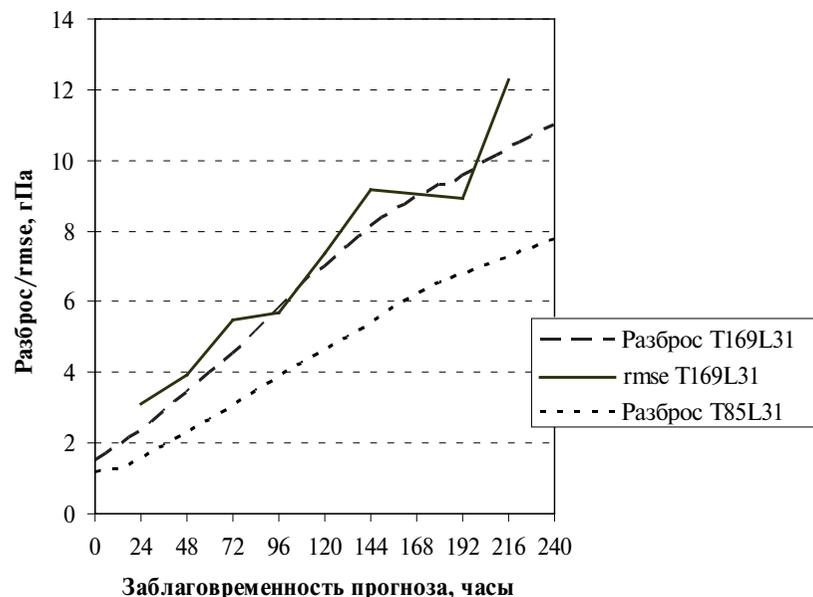


Рис. 3. Разброс в ансамблях, основанных на модели T169L31 и T85L31, и среднеквадратическая ошибка контрольного прогноза.

Таким образом, на основе представленных оценок можно утверждать, что качество ансамблевой системы удовлетворительное.

Заключение

В Гидрометцентре России разработана и реализована на суперкомпьютере система ансамблевого прогноза на срок до 10 суток. Ансамбль состоит из 12 прогнозов по спектральной модели T169L31 по

возмущенным с использованием бридинг-метода исходным данным, и двух прогнозов – по модели T169L31 и по полулагранжевой модели ПЛАВ-2008 – по невозмущенным исходным данным. Ежедневно выпускаются прогнозы по сроку 12 ч ВСВ с заблаговременностью до 10 суток. Большой объем выходной продукции записывается в общедоступную базу данных. При реализации системы на ЭВМ Altix 4700 учтены особенности многопроцессорной техники. Оценки показали удовлетворительное качество системы.

Список использованных источников

1. Астахова Е.Д. Построение ансамблей начальных полей для системы кратко- и среднесрочного ансамблевого прогнозирования погоды // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 98–117.
2. Бундель А.Ю., Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Алферов Д.Ю., Семенов А.Е. Верификация кратко- и среднесрочных прогнозов осадков на основе системы ансамблевого моделирования Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 10. – С. 20–34.
3. Курбаткин Г.П., Астахова Е.Д., Крупчатников В.Н., Рябинин В.Э., Сальник В.А., Смирнов В.Д., Фролов А.В. Модель среднесрочного прогноза погоды // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 194, вып. 2.
4. Курбаткин Г.П., Дегтярев А.И., Фролов А.В. Спектральная модель атмосферы, инициализация и база данных для численного прогноза погоды. – СПб.: Гидрометеиздат, 1994. – 184 с.
5. Розинкина И.А., Алферов Ю.В., Астахова Е.Д., Пономарева Т.Я., Цветков В.И. Глобальная оперативная спектральная модель Гидрометцентра России: основные характеристики и особенности использования в технологиях кратко- и среднесрочного прогноза // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 160–193.
6. Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Фролов А.В., Цветков В.И., Рузанова И.В., Пономарева Т.Я. Особенности реализации новой версии спектральной модели Гидрометцентра России T85L31 и технологии выпуска глобальных кратко- и среднесрочных гидродинамических прогнозов // Труды Гидрометцентра России. – 2002. – Вып. 338. – С. 84–98.
7. Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Юрова А.Ю. Полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 193–216.
8. Фролов А.В., Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Цветков В.И., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В. О практической предсказуемости метеорологических величин с помощью глобальной спектральной модели Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 5. – С. 5–20.

9. *Astakhova E.D., Bundel A.Yu.* Medium-Range Ensemble Prediction at the Hydrometcenter of Russia // WMO/WGNE Research Activities in atmospheric and oceanic modeling. – 2009. – N 39. – P. 6-03–6-04.

10. *Bougeault P., Toth Z., Bishop C., Brown B., Burridge D., Chen D., Ebert E., Fuentes M., Hamill T., Mylne K., Nicolau J., Paccagnella T., Park Y.-Y., Parsons D., Raoult B., Schuster D., Silva Dias P., Swinbank R., Takeuchi Y., Tennant W., Wilson L., Worley S.* The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) // Bull. Amer. Met. Soc. – 2010. – V. 91, Iss. 8. – P. 1059–1072.

11. *Buizza R., Palmer T.N.* The singular-vector structure of the atmospheric general circulation // J. Atm. Sci. – 1995. – V. 52, N 9. – P. 1434–1456.

12. *Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L., Haseler J.* Combined use of EDA- and SV-based perturbations in the EPS // Newsletter. N 123. – 2010. – ECMWF, Shinfield Park, Reading RG2-9AX, UK. – P. 22–28.

13. *Errico R.M.* Interpretations of the total energy and rotational energy norms applied to determination of singular vectors // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2000. – N 126. P. 1581–1599.

14. *Jolliffe I.T., Stephenson D.B.* Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, England, 2003. – 240 p.

15. *Houtekamer P.L., Lefaiivre L., Derome J., Ritchie H., Mitchell H.L.* A system simulation approach to ensemble prediction // Mon. Wea. Rev. – 1996. – V. 124. – P. 1225–1242.

16. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method // Mon. Wea. Rev. – 1997. – V. 125. – P. 3297–3319.

17. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1993. – V. 74. – P. 2317–2330.

18. *Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y.* Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system // Tellus. – 2008. – N 60A. – P. 62–79.

Поступила в редакцию 05.06.2011 г.