

## **Особенности реализации новой версии спектральной модели Гидрометцентра России Т85L31 и технологии выпуска глобальных кратко- и среднесрочных гидродинамических прогнозов**

В 2000 г. в Гидрометцентре России была введена в опытно-оперативную эксплуатацию новая прогностическая система на базе спектральной модели общей циркуляции атмосферы высокого пространственного разрешения Т85L31 (треугольное усечение рядов по 85 сферическим функциям, горизонтальное разрешение  $\approx 1,4^\circ$ , по вертикали толща атмосферы от поверхности Земли до высоты  $\approx 10$  гПа разбита на 31 слой, к их серединам предписаны основные счетные  $\sigma$ - уровни). По вертикали координатная сетка неоднородна (ее разрешение увеличивается при приближении к подстилающей поверхности), пограничный слой атмосферы описывают 7-8 счетных уровней. Область интегрирования - глобус. По сравнению с предыдущим вариантом оперативной технологии на базе модели Т40L15 (40 гармоник, 15 уровней, разрешение  $\approx 2,8^\circ$ ) увеличены заблаговременности выпуска прогнозов до 84 ч по исходным данным за 00 ч UTC и до 240 ч по исходным данным за 12 ч UTC. Новая версия спектральной модели атмосферы была признана базовой российской глобальной оперативной гидродинамической моделью прогнозов погоды на сроки 1-10 сут. с октября 2001г., после подведения итогов оперативных испытаний [2]. Цель настоящей статьи – познакомить с основными особенностями и проблемами реализации данной прогностической системы.

### **1. Основные проблемы изменения конфигурации модели при создании версии Т85L31**

Переход от полусферной версии спектральной модели Т40L15 к глобальной Т85L31 осуществлялся в несколько этапов и был результатом большого объема как технологических, так и исследовательских работ и осуществлялся в несколько этапов. Этим работам предшествовало создание специального программного комплекса – исследовательской технологии, предназначенной для оптимальной организации работ по численному экспериментированию с моделью атмосферы. Подробному описанию этого комплекса посвящена статья [1] настоящего сборника.

Отметим, что разработка специальной системы для выполнения численных экспериментов основной задачей ставила обеспечить возможность одновременной работы несколькими пользователями с одной и той же базовой версией модели атмосферы. Работа в рамках этого комплекса позволила производить всевозможные настройки конфигураций, отладку алгоритмов, обработку большого количества численных экспериментов. При этом каждый исследователь работал с общей базовой версией модели, подключая к ней только свои модифицируемые и отлаживаемые алгоритмы. Благодаря этому коллектив исследователей мог согласованно и эффективно производить отладку разнообразных модулей. В данной статье мы имеем возможность лишь конспективно рассмотреть наиболее принципиальные и, на наш взгляд, интересные, этапы и итоги этой деятельности.

1. *Реализация глобального варианта модели Т40L15.* Это был первый этап создания глобальной прогностической системы. До 1999 г. в Гидрометцентре России объективный анализ по южному полушарию из-за нерегулярного поступления прогностической информации из Регионального специализированного метеорологического центра (РСМЦ) Брекнелл, используемой в качестве полей первого приближения, отсутствовал. Поэтому некоторое время глобальный вариант модели выступал в роли средства прогнозов по северному полушарию с симметричным отображением начальных и граничных условий относительно экватора. Использование глобальной модели с симметрично-отображенными начальными и граничными условиями повысило качество прогнозирования за счет

включения зонально-симметричных мод и, кроме того, явилось полезным промежуточным шагом на пути построения оперативной технологии выпуска глобальных прогнозов. Впоследствии (до конца 2002 г.) в схеме оперативного объективного анализа Гидрометцентра России [3] в качестве полей первого приближения стали применяться прогнозы полей метеоэлементов по южному полушарию, вырабатываемые глобальной версией T40L15.

*2. Увеличение вертикального разрешения модели и подъем верхней границы области интегрирования до высоты 10 гПа (реализация модели T40L31).* Увеличение вертикального разрешения для моделей в  $\sigma$ -системах координат начинается с выбора значений новых счетных уровней. Как правило, выбор значений  $\sigma$ -поверхностей производится на основе рекуррентных соотношений с использованием эмпирических коэффициентов. При разработке конфигурации T40L31 В.И. Цветковым был предложен алгоритм, позволяющий аналитическим образом определять значения новых  $\sigma$ -поверхностей на основе использования корней полиномов Чебышева-Лагерра. Аналитически было показано, что использование значений  $\sigma$ -уровней, определенных по новому алгоритму, не только улучшает вычислительные свойства матрицы вертикальной структуры линейного оператора модели атмосферы (повышая её обусловленность), но и обеспечивает максимальную точность вычисления квадратур при заданном числе точек сетки ( $\sigma$ -уровней) [7]. При практической реализации предложенного алгоритма и использовании его вместо эмпирических способов определения значений  $\sigma$ , в частности, применяемых в Европейском Центре среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) [7], выяснилось, что действительно, вычислительная устойчивость схемы интегрирования динамического блока модели повысилась. Кроме этого, численными экспериментами подтвердилось ожидаемое повышение качества прогнозов полей метеоэлементов в средней и верхней тропосфере (рис.1). В целом, увеличение вертикальной дискретизации и поднятие верхней границы области интегрирования положительно сказалось на качестве моделирования процессов во всей толще атмосферы, существенно повысив реалистичность воспроизведения полей в верхней тропосфере – нижней стратосфере [7].

Была проанализирована вычислительная устойчивость новой модели. Новый шаг интегрирования был выбран равным 15 мин (заменяя 30 мин версии T40L15). Были выполнены работы по подбору оптимальных значений коэффициента горизонтальной диффузии. Было показано, что для более реалистичного отображения процессов вблизи верхней границы счетной области модели ( $\sigma = 0.1$ , т.е. приблизительно 10 гПа) целесообразно вводить профиль по вертикальной координате значений с существенным увеличением (в 10- 20 раз) этого коэффициента для уровней вблизи верхней границы области интегрирования T85L31.

*3. Увеличение горизонтального разрешения, создание окончательной конфигурации новой версии модели.* Вычислительные возможности имеющейся техники позволили остановиться на выборе конфигурации T85L31. Переход от полусферной версии T40L15 к глобальной T85L31 потребовал более чем 30-кратного увеличения объемов вычислений. За счет оптимизации алгоритмов модели удалось добиться увеличения скорости интегрирования приблизительно в 10 раз. Основными приемами при этом являлись изменения программной реализации алгоритмов модели для обеспечения возможности их векторизации, а также - использования стандартных векторизованных процедур математического обеспечения суперЭВМ CRAY Y-MP (обращения матриц, быстрого преобразования Фурье и др.). Основные результаты этих работ приведены в [1] настоящего сборника.

Помимо этого, существенную экономию времени счета обеспечила организация на параллельных процессорах задач интегрирования уравнений модели и обработки результатов (постпроцессинга) [6]. Взаимодействие между процессами было организовано путем обмена сообщениями в системе UNICOS: задача постпроцессинга в течение всего процесса интегрирования модели находится в режиме ожидания и включается несколько раз,

только после получения сообщения от задачи интегрирования о том, что очередной файл с прогнозами какой-либо заблаговременности готов, т.е. можно приступить к его обработке.

При использовании всех перечисленных приемов суммарное время счета нового глобального варианта модели T85L31 практически не превысило времени счета предыдущей полусферной версии T40L15.

## 2. Исследования чувствительности модели T85L31 к различным факторам

Само по себе повышение пространственного разрешения модели является лишь необходимым условием выработки гидродинамических прогнозов более высокого качества. Формальное изменение конфигурации модели потребовало выполнения ряда исследовательских работ. Рис.2 иллюстрирует пример соотношения качества прогнозов после изменения конфигурации и в результате последующей «настройки» новой версии.

Данный этап работ включал в себя цикл разнообразных исследований, в конечном счете приведших к модификациям как входной информации, так и алгоритмов модели. Остановимся подробнее на наиболее важных.

1. *Анализ чувствительности новой версии модели атмосферы к информации на нижней границе (подстилающей поверхности).* В ходе работы с версией T85L31 была выявлена большая чувствительность качества прогнозов к информации на нижней границе: полям рельефа, альбедо, шероховатости, влажности почвы, температуры поверхности океана и суши. При реализации на ЭВМ CRAY Y-MP глобальной спектральной модели T85L31 в 1999 г. за основу был взят архив характеристик поверхности суши, использующийся в Meteo-France, с широтно-долготным разрешением  $1 \times 1^\circ$ . После преобразования этих данных для нового пространственного разрешения ( $\approx 1.4^\circ$  для узлов гауссовой широтно-долготной сетки) был выполнен их контроль и частичная модификация. Корректировка данных была продиктована следующим.

Во-первых, была обнаружена большая чувствительность отображения особенностей крупномасштабной циркуляции в нижней и средней тропосфере к особенностям построения полей рельефа. В результате многих экспериментов был подобран алгоритм построения адаптированного рельефа, использование которого наилучшим образом сказалось на качестве прогнозов. Он сочетал в себе процедуры спектрального представления осредненного по ячейкам рельефа, обнуления появляющихся при этом отрицательных значений высот и сглаживания 9-точечным фильтром [5]. Построение «оггибающей» орографии положительно сказалось на качестве прогнозов в средней тропосфере, однако значительно ухудшило результаты для нижних атмосферных уровней при заблаговременностях прогнозов свыше 72 ч.

Во-вторых, было показано, что избыточная детализация свойств подстилающей поверхности в некоторых случаях может существенно ухудшить качество прогнозов. Это относится, в первую очередь, к заданию свойств водных массивов в зонах аридного климата (например, озера Чад в Африке, озера Эйр в Австралии и т.д.). Дело в том, что, согласно алгоритмам модели, значения температуры подстилающей водной поверхности не изменяются в процессе интегрирования. Задание неадекватных реальности значений температуры и размеров этих водоемов никак не может в процессе интегрирования «подстроиться», как подстраиваются, например, значения температуры поверхности суши. В результате над модельными водоемами – локальными перегретыми областями с неограниченно высокой влажностью – могут возникать активные восходящие движения, нереально высокие турбулентные потоки скрытого тепла, а также – активные конвективные движения. Происходящая вследствие этого конденсация водяного пара приводит к сильнейшим фиктивным источникам неадиабатического тепла на уровнях 850-700 гПа. В отдельных случаях переход высвободившейся при этом теплоты в кинетическую энергию может привести к развитию в модели ложных вихревых циркуляций, перемещающихся в процессе интегрирования на тысячи километров. (Описанный механизм напоминает

механизм развития тропических циклонов). Таким образом, для избежания таких эффектов потребовалось уточнение целого комплекса климатической информации (так называемой «маски» суша-водоемы, альbedo, температуры и влажности поверхности суши с учетом их годового хода).

В-третьих, была показана целесообразность использования различных значений параметра шероховатости для потоков тепла и момента импульса при моделировании динамики атмосферы над горными массивами. Задание единых высоких значений шероховатости для этих областей (до 15 м), предлагаемых архивом Meteo-France, приводят к формированию весьма реалистичного модельного профиля ветра над ними, однако создают нереально завышенные потоки скрытого и явного тепла.

### *2. Анализ чувствительности к качеству начальных полей.*

В этом отношении новая версия высокого разрешения T85L31 оказалась гораздо требовательнее, чем предыдущий, более грубый с точки зрения пространственного разрешения, вариант модели T40L15.

Одной из серьезных причин ухудшения качества прогнозов в отдельных синоптических ситуациях при переходе к версии более высокого разрешения неожиданно оказалось отсутствие информации объективного анализа влажности воздуха выше уровня 400 гПа (с 2001 г. - выше 300 гПа). Ранее (при эксплуатации T40L15) принималось, что в верхних слоях тропосферы влажность воздуха пренебрежимо мала, и никаких значимых нарушений в работе модели при этом не обнаруживалось. В версии T85L31 это допущение приводило в отдельных случаях к ухудшению качества прогнозов при моделировании внетропических циклонов и практически всегда - к возникновению ложных возмущений в средней тропосфере в районе внутритропической зоны конвергенции, что в конечном счете сказывалось на динамике всей тропической зоны. Поэтому были предложены алгоритмы «восполнения» отсутствующей информации. Наибольшие различия в данных о начальных полях влажности, естественно, касались приэкваториальных районов.

Важная группа исследований касалась вопросов согласования начальных полей. На начальных стадиях интегрирования «шум» в новой версии оказывался более сильным. Для фильтрации ложных гравитационных мод, были реализованы модифицированные алгоритмы нелинейной инициализации по нормальным модам (НИНМ), принципиальное отличие которых от применяемых ранее в T40L15 [напр., 5] заключается в такой организации итерационного процесса, которая обеспечивает его абсолютную сходимость. Поэтому применение новой схемы НИНМ позволяет корректировать высокочастотные гравитационные моды, возникающие в модельных полях не только в результате несогласованности ветра и давления, но и провоцируемые ложным выделением неадиабатического тепла на первых шагах интегрирования модели. Разработка окончательного варианта неадиабатической схемы НИНМ для T85L31 является предметом текущих исследований. Получены предварительные выводы, говорящие о существенном положительном эффекте от применения новых алгоритмов НИНМ на воспроизведение дивергентной составляющей скорости ветра, в первую очередь, в тропиках, а также – во внетропических областях активной конвективной фронтальной деятельности.

### *3. Анализ чувствительности модели к работе схем параметризации подсеточных процессов.*

Новая версия модели проявила высокую чувствительность к особенностям работы отдельных схем параметризаций «подсеточных» неадиабатических процессов. Главным образом это касалось описания процессов переноса и преобразования влаги и выделения в связи с этим скрытой теплоты.

В результате для уточнения параметризации турбулентного переноса влаги от поверхности суши в атмосферу была изменена зависимость, используемая ранее в модели T40L15, связывающая значения потоков скрытого тепла в приземном слое со значениями влажности почвы. Эффект от этой корректировки алгоритма наблюдался в полях температуры и геопотенциала, начиная со вторых суток прогноза, вплоть до высоты 700 гПа. (рис.3). Кроме этого, для уменьшения вероятностей наступления «шоковых» эффектов в

модели были произведены изменения в блоках, связанных с осадкообразованием – проникающей конвекции Куо [5] и крупномасштабной конденсации. Оказалось целесообразным на одном шаге интегрирования по времени вначале вызывать блок конденсации без конвективного приспособления, тем самым «ликвидируя» излишки влаги во всем столбе атмосферы, а лишь затем – блок конвекции и конденсации.

### **3. Изменения алгоритмов блока обработки выходной информации (пост-процессинга)**

Пост-процессинг модели атмосферы производит преобразования выходной модельной информации, т.е. переменных модели на  $\sigma$ -поверхностях в узлах счетной гауссовой широтно-долготной сетки в информацию для пользователей, на стандартных изобарических поверхностях и в узлах регулярных широтно-долготных сеток. Процедурам интерполяции (горизонтальной и вертикальной) предшествует восстановление ряда полей на основе диагностических соотношений по прогностическим переменным модели (например, геопотенциала по прогнозируемой моделью температуре). После этого производится запись продукции в базы данных, с которыми впоследствии работают пользователи. В ходе отладки новой версии Т85L31 в пост-процессинг были внесены модификации в алгоритмы построения полей давления на уровне моря в случаях «спусков под гору», т.е. когда эта поверхность находится ниже уровня рельефа. Помимо этого, для уменьшения значений систематических ошибок модельных прогнозов, были включены алгоритмы схемы статистической коррекции результатов расчетов для полей температуры, геопотенциала и давления [6]. Более высокое пространственное разрешение модели атмосферы позволило организовать выпуск продукции на сетке  $1,25 \times 1,25^\circ$  (помимо традиционной  $2,5 \times 2,5^\circ$ ), что потребовало дополнительных работ по организации записи продукции с высоким разрешением в специально созданные базы данных.

### **4. Реализация новой технологии выпуска прогнозов**

Внедрение оперативной глобальной модели Т85L31 потребовало кардинального пересмотра технологической цепочки в целом, от объективного анализа до выпуска выходной продукции (заполнения баз данных, карт, цифровой информации в международных кодах и т.п.). В результате в рамках системы автоматизированной обработки информации (АСОИИ) Гидрометцентра России был создан специальный программно-технологический комплекс «Спектральная модель».

Таким образом, в настоящее время оперативный счет модели производится дважды в сутки [2,6]. Существует определенный временной «зазор» между временем старта задач модели и исходным сроком, составляющий примерно 3-4 ч. Это время необходимо для приема информации наблюдений, ее контроля и первичной обработки, выполнения процедур объективного анализа. Таким образом, время старта «утреннего» сеанса – 3.00 UTC, «вечернего» – 15.40 UTC. Прогнозы по «утреннему» сеансу вычисляются до заблаговременности 84 ч. Время готовности прогнозов 3.30 (на 24 ч) – 4.30 UTC (на 78 ч). Прогнозы по «вечернему» сеансу вычисляются до заблаговременности 240 ч. Время готовности прогнозов максимальной заблаговременности 22.00 UTC. Результаты расчетов становятся доступными после их записи в циклические оперативные базы данных Гидрометцентра России. После этого прогнозы распространяются пользователям различных синоптических подразделений Гидрометцентра России, а также поступают в каналы Глобальной сети телесвязи (ГСТ) и на серверы сети ИНТЕРНЕТ. На рис.4 показаны основные пути распространения продукции, содержащейся в различных базах данных банка данных «Прогноз» Гидрометцентра России.

Новая оперативная технология приобрела две принципиальные особенности. Во-первых, впервые в Гидрометцентре был построен процесс параллельной обработки

результатов интегрирования гидродинамической модели по мере их появления, частично речь об этом шла в разделе 1(3). При этом были использованы возможности предоставляемые архитектурой 8- процессорного компьютера CRAY Y-MP. Так, например, после того как, спустя 20 минут после старта, прогноз с заблаговременностью 24 ч сосчитан, модель производит запись соответствующего «исторического» файла с результатами, после чего интегрирование продолжается. В это время находящаяся в режиме ожидания на параллельном процессоре задача пост-процессинга получает сообщение о готовности этого файла для обработки. Это служит сигналом для начала обработки данных результатов пост-процессингом. Затем свои результаты задача пост-процессинга записывает в базы данных. Одновременно фоновая задача кодировки информации, находящаяся на следующем параллельном процессоре, производит кодировку и передачу появившейся в базах новой информации в виде сводок GRID и GRIB по локальной вычислительной сети в центр коммутации сообщений Радиометцентра для распространения по ГСТ, а также - на серверы сети ИНТЕРНЕТ, пользователям системы ГИС МЕТЕО и др. Помимо этого, на параллельных процессорах стартуют дополнительные «дочерние» задачи, например, производящие расчеты ряда характеристик для авиационных прогнозов (характеристик максимального ветра, высоты тропопаузы и т.д.). Таким образом, еще задолго до окончания сеанса счета модели пользователи имеют возможность работать с готовыми модельными прогнозами для предшествующих заблаговременностей [6]. Это крайне важно для составления оперативных краткосрочных прогнозов погоды и, в будущем открывает широкие возможности для последующей синоптической интерпретации на основе графических систем (выполнения прогностического фронтального анализа, выявления зон неблагоприятных явлений и т.д.).

Второй особенностью новой технологии явилось резервирование оперативного объективного анализа Гидрометцентра России (ОА, основанного на использовании прогнозов РСМЦ Брекнелл [3] в качестве полей первого приближения) результатами глобальной дискретной системы усвоения данных (ГСУД, базирующейся на прогнозах глобальной спектральной модели T40L15 Гидрометцентра России [8]). Так, пре-процессинг модели (задача, подготавливающая стартовый набор для интегрирования) вначале производит чтение полей анализа, подготовленных ГСУД, а затем еще раз – чтение аналогичных полей ОА. Такое резервирование при формировании начальных полей для модели было выполнено впервые и обеспечило высокую надежность выпуска прогнозов по спектральной модели T85L31 [6], поскольку была снята зависимость от поступления прогностической продукции из Брекнелла. Ранее, как правило, один-два раза в месяц оперативные гидродинамические прогнозы не считались из-за отсутствия зарубежной продукции, необходимой для выполнения ОА.

Таким образом, взамен предыдущей версии модели атмосферы T40L15 была реализована новая версия T85L31, использующая другие граничные и начальные условия, имеющая модифицированные алгоритмы и «вмонтированная» в другую оперативную систему выпуска прогнозов. После выполнения продолжительных оперативных испытаний, показавших систематическое превышение качества по сравнению с предыдущей версией спектральной модели T40L15, новая оперативная глобальная модель была признана основным средством глобального гидродинамического прогноза Росгидромета.

## **5. Результаты оперативной эксплуатации и анализ качества новой прогностической системы**

Основные базовые оценки успешности были получены в ходе оперативных испытаний в период октябрь 2000 г. – апрель 2001 г. [2]. На основе анализа результатов испытаний ЦМКП признала, что, согласно критериям Всемирной Метеорологической Организации, «прогноз Ро по модели T85L31 по северному полушарию с заблаговременностью 24 ч «перешел» в разряд хорошего прогноза из разряда

удовлетворительного по T40L15 [4]. Прогноз по T85L31 имеет удовлетворительное качество структуры барического поля до 4-5 сут (по T40L15 такой период ограничивался 3-4 сут), для прогнозов поля 500 гПа – до 6-7 сут (соответственно, по T40L15 – до 5-6 сут) и для прогнозов поля 250 гПа – до 8-9сут (по T40L15 – до 7-8 сут).

Соотношение качества прогнозов высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа по моделям T40L15 (Россия), T85L31 (Россия), R106L31(Германия), T511L64 (ЕЦСПП) показан на рис. 5. Очевидно, что замена версии спектральной модели существенно приблизила уровень успешности отечественных прогнозов к уровню известных центров по моделированию атмосферных процессов, продукция которых активно используется синоптиками России при составлении прогнозов погоды.

Важным достоинством развитых национальных глобальных моделей атмосферы является то, что с их помощью может быть получен большой спектр продукции, не передаваемый по каналам связи из зарубежных центров, с максимально возможной пространственно-временной дискретизацией. Так, с 2001 г. на основе модели T85L31 ведется разработка технологии глобального гидродинамического прогноза элементов погоды (осадков, температуры, облачности с дискретностью заблаговременностей 6 ч и шагом 1,25°). Были выполнены авторские испытания прогнозов осадков для внетропических областей северного полушария, усовершенствуются алгоритмы прогноза и диагноза полей облачности, приземной температуры воздуха. Так, рис. 6 иллюстрирует соотношение прогностических и фактических значений осадков в Москве в феврале 2001 г. Как видно, единственный раз были спрогнозированы «ложные» осадки, в остальном наблюдалось хорошее совпадение по факту, а также - практическое совпадение градаций «слабые» – «умеренные» – «сильные». Однако очевидно некоторое завышение сумм осадков. Пример прогностической эволюции во времени полей давления на уровне моря, осадков и облачности показан на рис.7.

Авторы статьи выражают глубокую признательность большому коллективу специалистов, оказавших конструктивное содействие при разработке новой прогностической системы Гидрометцентра России. В первую очередь – Ю.В.Степанову, И.И.Жабиной и всему коллективу Отдела систем информационного обеспечения Гидрометцентра России. Помимо этого, П.И.Свиренко, автору ряда эффективных программных разработок в среде UNICOS, который, в частности, реализовал алгоритм обмена сообщениями между моделью и постпроцессингом (что обеспечило параллельный счет и обработку информации); Д.Б.Киктеву, автору алгоритма статистической коррекции гидродинамических прогнозов, Е.Н.Кругловой, подготовившей архив характеристик поверхности суши в узлах гауссовой сетки для версии T85L31 по данным Meteo-France, Ю.В.Алферову, разработавшему систему визуализации результатов модели, Г.С. Булдовскому, внесшему большой вклад в организацию и выполнение оперативных испытаний, А.Н.Багрову, а также - сотрудникам Лаборатории среднесрочных гидродинамических прогнозов погоды Мостовому Г.В., Акимову И.В., Сноповой О.В.

Работы выполнялись с участием финансовой поддержки грантов РФФИ 00-05-64803,

00-05-65493

### Список литературы

1. Астахова Е.Д. Исследовательская технология численного среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России // Труды Гидрометцентра России – см. наст. сборник
2. Булдовский Г.С., Розинкина И.А., Фролов А.В. Об успешности прогнозов метеорологических полей на основе глобальной спектральной модели атмосферы высокого пространственного разрешения T85L31 на 1-10 суток // Информационный сборник 2002.-№ 29. – С.3-16.
3. Багров А.Н., Локтионова Е.А., Цырульников М.Д.. Развитие оперативного объективного анализа в Гидрометцентре России. // Труды Гидрометцентра России – 2001. - Вып. 334. -С. 19-30
4. Веселова Г.К., Розинкина И.А., Фролов А.В. О качестве прогнозов метеорологических полей на средние сроки по спектральной модели Гидрометцентра России, реализованной на суперЭВМ CRAY // - 2000 - Информационный сборник 2000.- №27, С.3-19.
5. Курбаткин Г.П., Дегтярев А.И., Фролов А.В. Спектральная модель атмосферы, инициализация и база данных для численного прогноза погоды. С.П., Гидрометеиздат, 1994, 183 с.
6. Розинкина И.А., Киктев Д.Б., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В. Оперативный выпуск гидродинамических прогнозов по спектральной глобальной модели Гидрометцентра России . // Труды Гидрометцентра России – 2000. - Вып. 334. - С. 52-68
7. Фролов А. В., Важник А. И., Цветков В.И., Астахова Е. Д. Глобальная спектральная модель атмосферы с высоким разрешением по вертикали.//Метеорология и гидрология.-2000.- № 2.- С.10-21
8. Фролов А.В., Важник А.И., Свиренко П.И., Цветков В.И. Глобальная система усвоения данных наблюдений о состоянии атмосферы // Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 2000, 188 с.