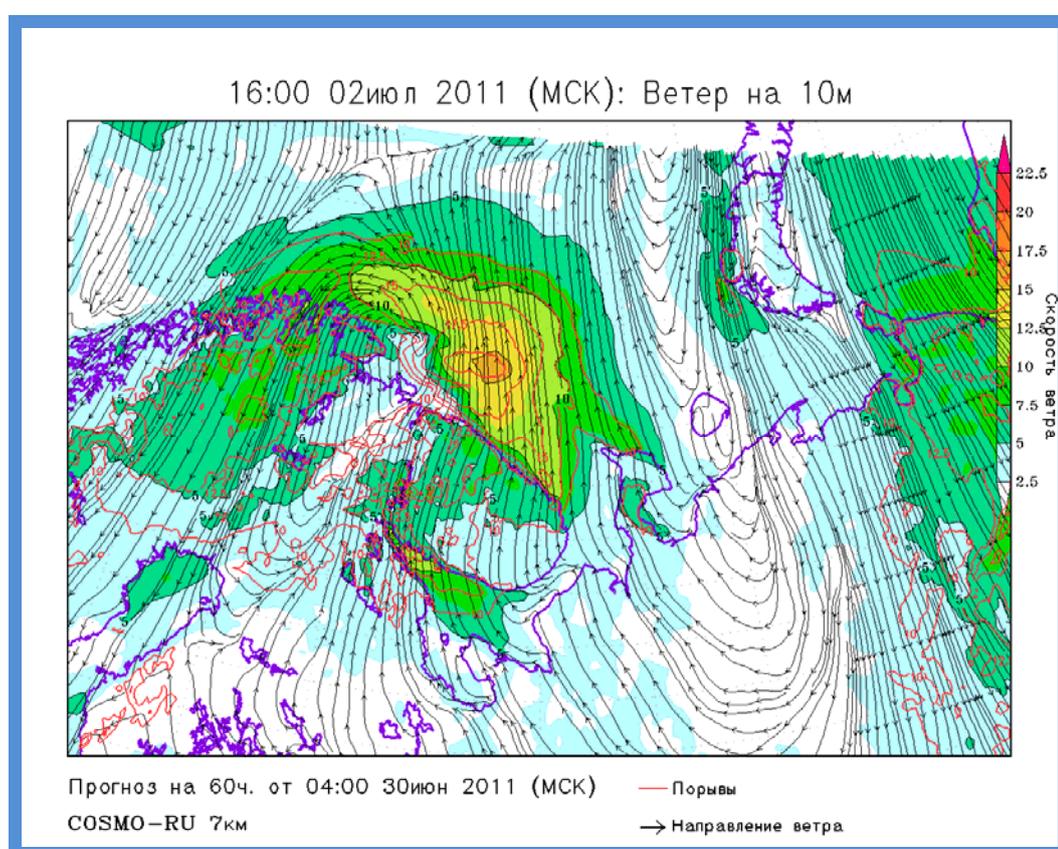


Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

Выпуск
346

Москва

2011

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

Выпуск

346

Гидрометеорологические прогнозы

Под редакцией

д-ра физ.-мат. наук Г.С. Ривина,
канд. физ.-мат. наук И.А. Розинкиной

Москва

2011

Адрес: 123242 Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13
Телефон: (499) 252-34-48
Факс: (499) 255-15-82
e-mail: vilfand@mecom.ru
web site: <http://www.meteoinfo.ru>

Редакционная коллегия

д-р техн. наук Р.М. Вильфанд (главный редактор),
д-р геогр. наук А.А. Васильев (редактор),
д-р физ.-мат. наук П.П. Васильев, д-р физ.-мат. наук Н.Ф. Вельтищев,
д-р физ.-мат. наук Л.Р. Дмитриева, д-р физ.-мат. наук А.В. Муравьев,
д-р геогр. наук Е.С. Нестеров, д-р физ.-мат. наук Ю.Д. Реснянский,
д-р физ.-мат. наук Г.С. Ривин, д-р физ.-мат. наук В.П. Садоков,
д-р физ.-мат. наук Н.П. Шакина, канд. геогр. наук С.В. Борщ,
канд. геогр. наук И.Н. Кузнецова, канд. геогр. наук А.И. Страшная,
канд. геогр. наук В.М. Хан (секретарь редколлегии).

Излагаются результаты исследований в области численного прогноза погоды, технологические аспекты оперативных систем прогноза погоды, проблемы модернизация центров обработки оперативной гидрометеорологической информации Росгидромета, варианты визуализации и доставки информации конечным пользователям, возможные причины аномально-жаркого лета 2010 г. на Европейской территории России.

Proceedings of Hydrometcentre of Russia

Edited by G.S. Rivin, I.A. Rozinkina

The results of the research in the field of numerical weather prediction, technological aspects of operational weather forecasting systems, the problems of modernization of the Roshydromet centers of the operational hydrometeorological information, the visualization options and deliver information to end users, the possible causes of abnormally hot summer of 2010 in European part of Russia are presented.

СОДЕРЖАНИЕ

Гидродинамический прогноз погоды

<i>Д.Ю. Алферов, Г.С. Ривин.</i> Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU: ансамблевый прогноз	5
<i>Ю.В. Алферов, В.В. Копейкин.</i> Аспекты автоматизации в гидрометеорологической системе визуализации Isograph	16
<i>В.А. Аncyпович, С.В. Лубов.</i> Модернизация центров обработки оперативной гидрометеорологической информации Росгидромета.....	25
<i>Е.Д. Астахова.</i> Ансамблевый среднесрочный прогноз погоды: реализация технологии на современной компьютерной базе.....	33
<i>Д.В. Блинов, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина.</i> Система краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU: технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов	47
<i>В.В. Копейкин, Ю.В. Алферов.</i> Построение изолиний по нерегулярной сети точек в рамках графической системы Isograph	55
<i>В.Л. Перов.</i> Реализация алгоритма расчета турбулентного масштаба длины, основанного на методе смещения частиц воздуха под влиянием сил плавучести, в модуле пограничного слоя атмосферы модели COSMO-RU Гидрометцентра России.....	67
<i>А.Э. Похил, Е.С. Глебова, А.В. Смирнов.</i> Расчет на мезомасштабных моделях атмосферы ETA и WRF(NMM) взаимодействия тропических циклонов с полярными фронтами и струйными течениями.....	77
<i>И.Э. Пурина, А.И. Страшная, Т.С. Чекулаева, Н.С. Игнатова.</i> Технология обработки и доведения конечной агрометинформации до потребителей в Гидрометцентре России и оперативно-производственных учреждениях Росгидромета в программном комплексе PROMETEI.....	89
<i>И.А. Розинкина, Е.Д. Астахова, Т.Я. Пономарева, Ю.В. Цветков.</i> Технология оперативного выпуска глобальных прогнозов на 1–10 суток на основе модели T169L31 (шаг сетки 60-70 км) на новой суперкомпьютерной технике ММЦ Москва	102
<i>Ю.А. Степанов, И.И. Жабина.</i> Новая версия автоматизированной технологии АСООИ на выделенном сервере Гидрометцентра России	124
<i>М.А. Толстых, Н.Н. Богословский, А.В. Шляева, В.Г. Мизяк.</i> Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ	145
<i>М.А. Толстых, В.Г. Мизяк.</i> Параллельная версия полулагранжевой модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением порядка 20 км.....	155
 <i>Долгосрочный прогноз погоды</i>	
<i>Н.С. Сидоренков, К.А. Сумерова.</i> Причины аномально-жаркого лета 2010 года на Европейской территории России.....	162

CONTENTS

Hydrodynamic weather forecast

<i>D.Yu. Alferov, G.S. Rivin.</i> The mesoscale weather forecast COSMO-RU system: the ensemble forecast	5
<i>Yu.V. Alferov, V.V. Kopeikin.</i> Aspects of automation in the hydrometeorological visualization system Isograph.....	16
<i>B.A. Antsipovich, S.V. Lubov.</i> Modernization of the Roshydromet operational hydrometeorological information processing centers.....	25
<i>E.D. Astakhova.</i> Ensemble medium-range weather prediction: the technology implementation on a modern computer base	33
<i>D.V. Blinov, G.S. Rivin, I.A. Rozinkina.</i> The mesoscale weather forecast COSMO-RU system: the technological aspects of the visualization and mailing of the forecasts.....	47
<i>V.V. Kopeikin, Yu.V. Alferov.</i> Construction of isolines on an scatter points network within the graphic system Isograph framework	55
<i>V.L. Perov.</i> The implementation of the algorithm for calculating the turbulent length scale, based on the method of displacement of air parcel under the influence of buoyancy forces, in a module of the atmospheric boundary layer, in the model COSMO-RU of the Russian Hydrometcenter	67
<i>A.E. Pokhil, E.C. Glebova, A.V. Smirnov.</i> Calculation of tropical cyclones' and polar fronts and jet-streams interaction on mesoscale models of atmosphere ETA and WRF (NMM).....	77
<i>I.E. Purina, T.S. Chekulaeva, A.I. Strashnaia, N.S. Ignatova.</i> Tecnology of processing and DELIVERING of the final agrometeorological information to the customers in HMC Russia and operating organizations of Roshydromet structure in software package PROMETEI.....	89
<i>I.A. Rozinkina, E.D. Astakhova, T.Ya. Ponomareva, V.I. Tsvetkov.</i> A technology of the operational of global weather prediction 1 to 10 days ahead based on the T169L31 model (with a 60-70 km resolution) on the new supercomputer technique of Moscow WMC.....	102
<i>Yu.A. Stepanov, I.I. Shabina.</i> New version of automated technology ASOIP on dedicated server of Hydrometcenter of Russia	124
<i>M.A. Tolstykh, N.N. Bogoslovskii, A.V. Shlyayeva, V.G. Mizyak</i> Operational technology for computing global forecasts using semi-Lagrangian atmospheric model SL-AV	145
<i>M.A. Tolstykh, V.G. Mizyak.</i> Parallel version of the semi-lagrangian model SL-AV with the horizontal resolution of about 20 km	155

Long-range weather forecasts

<i>N.S. Sidorenkov, K.A. Sumerova.</i> Causes of an anomalous hot summer in 2010 over European Russia.....	162
--	-----

СИСТЕМА МЕЗОМАСШТАБНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ COSMO-RU: АНСАМБЛЕВЫЙ ПРОГНОЗ

Д.Ю. Алферов, Г.С. Ривин

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
dalferov@mecom.ru, Gdaly.Rivin@mecom.ru*

Введение

Ограниченная предсказуемость атмосферных процессов и вытекающая из нее необходимость их вероятностного описания были впервые выявлены в 1960-е гг. в работах Э. Лоренца [13, 14]. Единственным реально осуществимым способом получения таких прогнозов оказалось вычисление некоторого множества численных прогнозов – прогностического ансамбля. Вычисление таких ансамблей в оперативном режиме стало возможным лишь в конце 1980-х – начале 1990-х гг., с развитием вычислительной техники [7]. В это время метеослужбами европейских стран, США, Канады, Австралии, ЮАР, Японии, а также Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП, ECMWF) разработан ряд систем ансамблевого прогноза погоды, преимущественно на основе глобальных атмосферных моделей.

В последнее десятилетие, с дальнейшим развитием вычислительной техники и технологии параллельных вычислений, стала актуальной задача мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды. В настоящее время системы мезомасштабного ансамблевого прогнозирования погоды внедрены или внедряются в ряде метеослужб Европы и США.

В России развитие систем ансамблевого прогноза погоды до недавнего времени сдерживалось нехваткой необходимой для этого высокопроизводительной вычислительной техники, позволяющей в сжатые сроки проводить расчеты атмосферных процессов на большой территории с высоким разрешением, что особенно важно в случае ансамблевого прогнозирования, для которого требуется одновременный расчет нескольких прогнозов. Тем не менее уже в 2000-х гг. в Гидрометцентре России была разработана система ансамблевого долгосрочного прогноза [6], а также система глобального ансамблевого прогноза на основе глобальной спектральной атмосферной модели Гидрометцентра России [1].

Системы мезомасштабного ансамблевого прогнозирования погоды до настоящего момента в России не существовало. Таким образом, рассматриваемая в данной работе система является первой подобной системой в нашей стране.

При построении прогностических ансамблей выделяются два основных источника неточностей в прогнозе: погрешности начальных данных (возникающие из-за погрешностей наблюдений и анализа) и погрешности самой модели (за счет неточности дифференциальной постановки задачи, дискретизации дифференциальных уравнений и неточностей в описании процессов подсеточного масштаба).

Прогностический ансамбль, как правило, состоит из невозмущенного (контрольного) прогноза и возмущенных прогнозов, которые называются членами ансамбля. Иногда в качестве членов ансамбля также берутся прогнозы нескольких различных моделей (мультимодельный подход).

Обычным методом формирования прогностического ансамбля на основе одной модели является внесение искусственных случайных возмущений масштаба обычно возникающих ошибок в начальные данные модели или входящие в ее уравнения эмпирические параметры (параметризации подсеточных процессов).

Для построения ансамблей с возмущением начальных данных разработан ряд методов, улучшающих воспроизведение в ансамбле наиболее критичных для данного прогноза, т. е. наиболее быстро растущих, ошибок. Наиболее известны из них метод сингулярных векторов и бридинг-метод (метод «выращивания» наиболее быстро растущих мод). Метод сингулярных векторов, разработанный в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды [16], основан на вычислении наиболее быстро растущих возмущений – сингулярных векторов прогностического оператора. Бридинг-метод разработан в метеослужбе США (NCEP) [21, 22]. Этот метод основан на добавлении в качестве новых возмущений в ансамбле реально возникающих расхождений между ранее запущенными возмущенными прогнозами и контрольным прогнозом, приведенных к масштабу исходного случайного возмущения (рис. 1).

Для мезомасштабного ансамблевого прогноза существует ещё один метод возмущения начальных и боковых граничных условий – использование различных «материнских» глобальных моделей. Это могут быть как просто несколько различных глобальных моделей (такой подход используется, к примеру, в системе ансамблевого прогноза COSMO-SREPS [15]), так и члены некоторого глобального прогностического ансамбля (на этом основана система COSMO-LEPS [17]).

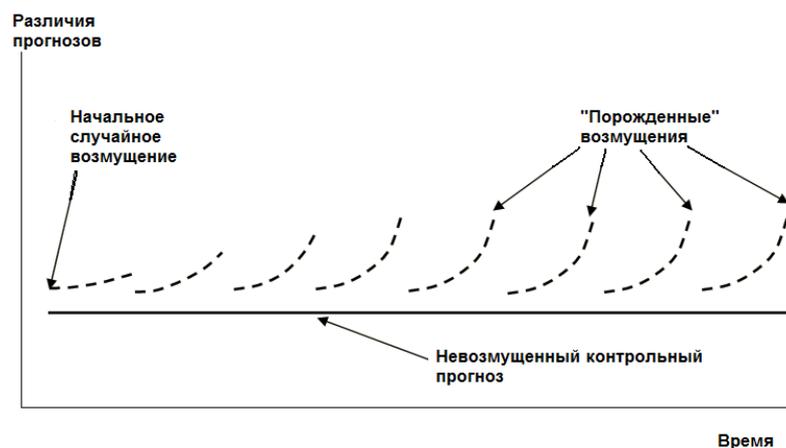


Рис. 1. Схема бридинг-метода [11].

Также широко используется возмущение эмпирических параметров и варьирование используемых схем параметризации подсеточных процессов, а также варьирование самих моделей, что позволяет скомпенсировать погрешности моделирования.

Схема ансамблевого прогноза показана на рис. 2. Крестиком помечены начальное состояние и результаты детерминированного контрольного прогноза. Черные кружки – фактическая погода в соответствующие моменты времени. Белыми кружками отмечены возмущенные прогнозы. Серые диаграммы слева и справа показывают распределение вероятностей для начального и конечного состояний. Черные линии обозначают положение фактических данных (жирная линия) и детерминированного прогноза (тонкая линия).

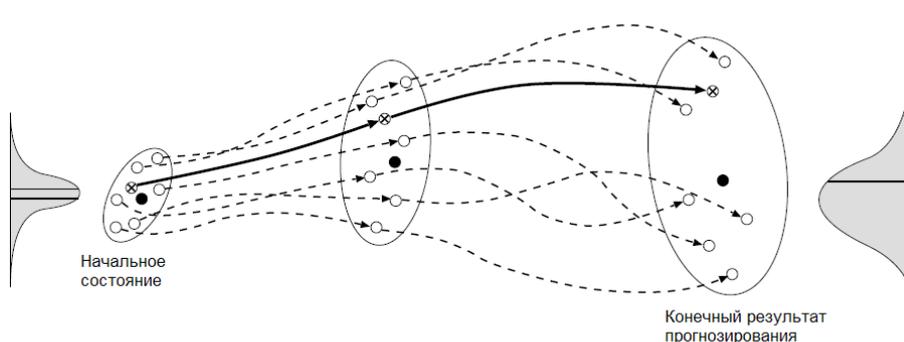


Рис. 2. Схема ансамблевого прогноза с возмущенными начальными условиями [12].

Мы видим, что разброс в ансамбле растет со временем, при этом среднее по полученным прогнозам при достаточно большом количестве членов ансамбля и хорошо подобранном возмущении может оказаться точнее, чем результат детерминированного прогноза. На этом и основан полезный эффект от использования прогностических ансамблей. Кроме того, наличие нескольких прогнозов с определенным разбросом на один и тот же срок дает возможность оценить вероятность тех или иных явлений погоды (к

примеру, определенных значений осадков или температуры на заданном уровне), т. е. получить вероятностный прогноз.

Метод построения ансамбля прогнозов и численные эксперименты

Для построения ансамбля используется мезомасштабная негидростатическая атмосферная модель COSMO-RU [2, 3] с шагом сетки 14 км (COSMO-RU/14). Это связано с высокой скоростью вычисления такого ансамбля на вычислительной системе, имеющейся в Гидрометцентре России: прогноз на 78 часов с помощью модели COSMO-RU/14 при проведении параллельных вычислений на 1024 ядрах суперкомпьютера SGI ALTIX 4700 занимает примерно 2,5 минуты.

Возмущение в ансамбле строится путем варьирования используемых в модели вычислительных схем и параметризаций физических процессов. Эксперименты с заданием возмущений в ансамбле путем варьирования блоков параметризации подсеточных процессов проводились метеослужбами Италии, Греции и Швейцарии в рамках одной из функционирующих в настоящее время систем мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды на основе модели COSMO – системы COSMO-SREPS [15]. Кроме того, аналогичный подход использовался в разрабатываемой метеослужбой Германии ансамблевой системе конвекционного масштаба COSMO-DE-EPS (шаг сетки – 2,8 км), использующей помимо этого варьирование начальных условий и системы усвоения данных [18]. Варьирование вычислительных схем ранее в проектах мезомасштабного ансамблевого прогноза консорциума COSMO не применялось.

В первых экспериментах применялся ансамбль, имевший 24 члена. Они различались выбором вычислительных схем (схема чехарды и схема Рунге-Кутта второго порядка), схем параметризации конвекции (схема Тидтке [20] и схема Кайна-Фрицша [9, 10]), а также различным учетом характерного размера подсеточных термических неоднородностей поверхности pat_len и максимального линейного масштаба турбулентных вихрей tur_len . По умолчанию в модели последние две характеристики равны 500 м. В ансамбле дополнительно использовались значения pat_len , равные 0 и 10000 м (границы допустимого для данного параметра интервала) и масштаб tur_len , равный 1000 м (верхний предел для значений данного параметра).

В первых экспериментах проводился прогноз на 24 ч по данным за 00 ч ВСВ трех дней в мае, июле и октябре 2010 г. В качестве изучаемых ансамблевых прогнозов рассматривались прогнозы общей облачности, суточной суммы осадков, удельной приземной влажности и температуры на высоте 2 м над поверхностью земли. Результаты этих экспериментов показали, что возмущение масштаба турбулентных вихрей вносит лишь

небольшой вклад в разброс, возникающий в ансамбле, поэтому в дальнейшем от его использования при выборе членов ансамбля было решено отказаться.

В таблице приведен окончательный список из 28 членов ансамбля. Дополнительные члены введены с помощью схемы Рунге-Кутты второго порядка с невозрастанием полной вариации численного решения (TVD), явной схемы для боковых граничных условий (в контрольном прогнозе – неявная схема) и варьирования значений коэффициента влияния толщины ламинарного пограничного слоя на потоки тепла `lam_heat` (варьирование дало хорошие результаты в экспериментах с системой COSMO-SREPS [15]).

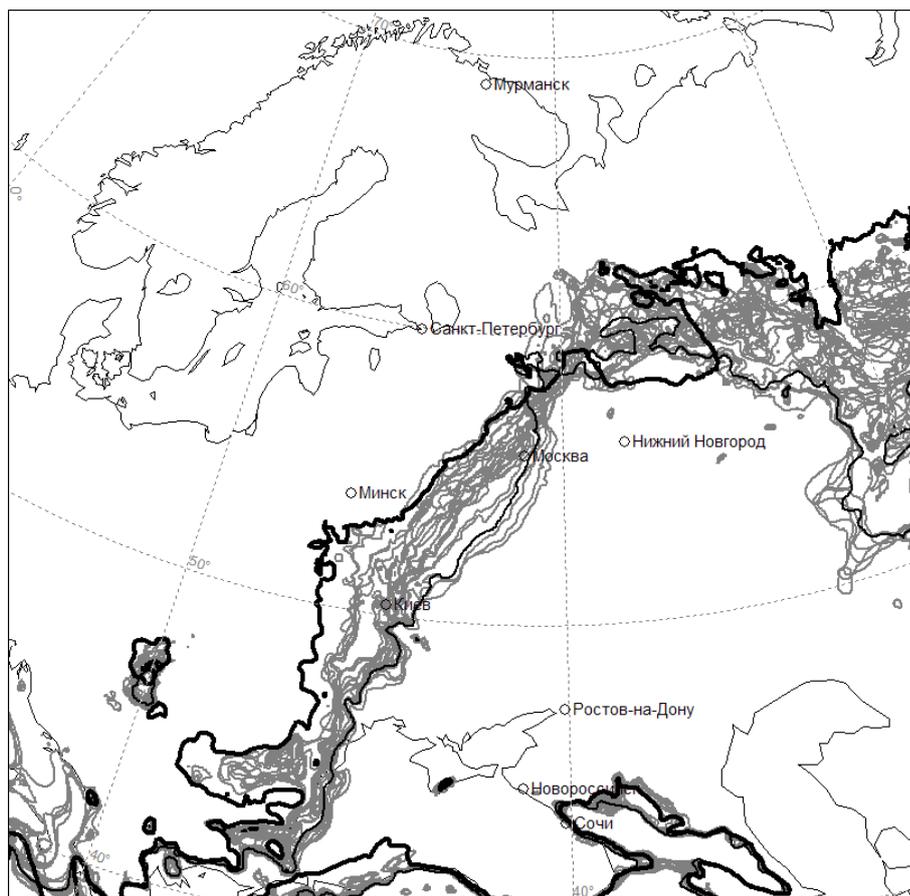
Запускающий скрипт для каждого члена ансамбля представляет собой запускающий скрипт модели COSMO-RU/14, в `namelist`-ы которого внесены соответствующие изменения (см. таблицу). Для удобства запуск этих скриптов реализован в виде одного запускающего скрипта с заданием даты прогноза. Для прогнозов по старым данным предусмотрена возможность вычисления тестового 6-часового прогноза на тот же срок, что и ансамблевого 78-часового. Члены ансамбля чаще всего вычисляются последовательно, поскольку для запуска нескольких модельных прогнозов одновременно свободных процессоров на существующей суперЭВМ, как правило, недостаточно.

Для обработки результатов прогноза и его верификации была разработана программа на языке Фортран. С ее помощью находятся следующие величины: средний прогноз по ансамблю (медиана прогнозируемых значений членов ансамбля в каждой точке сетки), разброс в ансамбле и прогнозы вероятностей (например, для осадков или температуры) для событий вида “прогнозируемые значения больше или меньше заданного значения”. Кроме того, вычисляются средний и максимальный разброс в ансамбле, оценка Брайера для вероятностных прогнозов ([5]), процент точек, фактическое значение в которых оказалось за пределами прогнозируемого диапазона (`outliers`), подготавливаются диаграммы Талаграна [19], ROC-кривые [4] и диаграммы надежности [8].

В качестве примера результатов работы системы рассмотрим прогноз температуры на высоте 2 м над уровнем земли на 06 ч ВСВ 3 августа 2010 года по исходным данным за 00 ч ВСВ 31 июля 2010 года. На рис. 3 изображена карта-«спагетти» (`spaghetti plots` – карты, изображающие одну и ту же изолинию по прогнозу различных членов ансамбля) для изотермы 25 °С.

Окончательный состав ансамбля

Вычислительная схема	Граничные условия	Физика		
		Схема конвекции	Характерный размер подсеточных термических неоднородностей поверхности (м) (<i>pat_len</i>)	Коэффициент влияния толщины ламинарного пограничного слоя на потоки тепла (<i>rlam_heat</i>)
<i>Чехарда</i>	<i>Стандартные</i>	<i>Тидтке</i>	0	0,1
				1,0
				10,0
			500	0,1
				1,0
				10,0
		10000	0,1	
			1,0	
			10,0	
		<i>Кайн-Фрицш</i>	0	0,1
				1,0
				10,0
	500		0,1	
			1,0	
			10,0	
	10000	0,1		
		1,0		
		10,0		
<i>Явная формулировка</i>	<i>Тидтке</i> <i>Кайн-Фрицш</i>	500	1,0	
<i>Рунге-Кутта</i>	<i>Стандартные</i>	<i>Тидтке</i> <i>Кайн-Фрицш</i>	500	1,0
	<i>Стандартные</i>	<i>Тидтке</i> <i>Кайн-Фрицш</i>		



**Рис. 3. Карты-«спагетти» изотермы 25 °С по прогнозу на 06 ч ВСВ 3.08.2010 г.
по данным за 00 ч ВСВ 31.07.2010 г.**

Тонкой черной линией выделен контрольный невозмущенный прогноз, жирной – 6-часовой прогноз на тот же срок.

Хорошо видны области с меньшим и большим разбросом значений. Это показывает способность построенного ансамбля давать априорную оценку качества прогноза: чем больше разброс в ансамбле, тем ниже предсказуемость и больше вероятность ошибки в прогнозе. Кроме того, видно, что прогноз отдельных членов может приближаться к заведомо более точному 6-часовому прогнозу ближе, чем контрольный прогноз. Тем самым ансамбль уточняет детерминированный прогноз температуры на высоте 2 м. Средний по ансамблю прогноз (поточечная медиана прогнозируемых значений) в данном случае показал снижение средней абсолютной ошибки на 0,5 градуса (22,2 % от исходного значения) и средней квадратической ошибки (RMS) – на 0,8 градуса (соответственно 27,1 %).

На рис. 4 приведена ранжированная диаграмма Талаграна, построенная по ряду прогнозов температуры на высоте 2 м по данным за май, июль, август, октябрь и декабрь 2010 года, а также за январь 2011 года. Хорошо видно, что разброс в ансамбле хотя и недостаточен, но практически не имеет смещения в сторону переоценки или недооценки

фактического состояния рассматриваемого поля, а доля фактических значений, не попавших в предсказанный диапазон, сравнительно невелика.

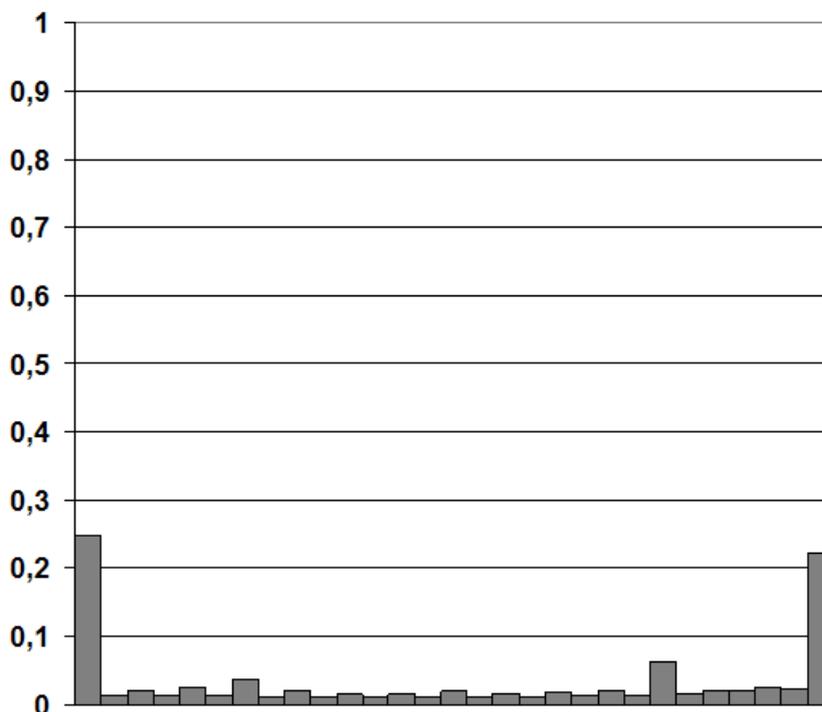


Рис. 4. Диаграмма Талаграна для прогноза T2m.

Препроцессинг для каждого члена ансамбля выполняется на 16 процессорах, основной счет модели – на 256 процессорах. Таким образом, время выполнения полного ансамблевого прогноза на 78 часов в настоящее время составляет около 7 часов. При возможности работы на 1024 процессорах это время может быть сокращено до 2 ч.

Время вычисления прогноза получается достаточно большим, поэтому имеет смысл сократить число членов ансамбля. В первую очередь следует исключить члены, систематически дающие худшие прогнозы. По результатам экспериментов такими представляются члены, в которых характерный размер подсеточных термических неоднородностей поверхности равен 10000 м.

Еще одним способом сокращения числа вычислений может быть, к примеру, «прореживание» ансамбля по аналогии с бридинг-методом, когда во время счета с некоторой периодичностью проверяется близость текущих результатов прогноза к контрольному прогнозу, и далее вычисляются лишь члены, показавшие наибольшие расхождения с контрольным прогнозом. Эта процедура в настоящее время пока не реализована, и ее исследование остается для дальнейшей работы.

Заключение

В результате проведенной работы была построена экспериментальная система мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды, неплохо оценивающая неопределенности в прогнозах, а также позволяющая уточнить детерминированный прогноз атмосферных полей. Помимо прогноза температуры, рассмотренного выше, заметное снижение ошибок достигается в прогнозе осадков.

Кроме того, в процессе работы был исследован возможный вклад в ансамбль ряда параметров и методов, используемых в модели COSMO. Сформулированы рекомендации по их использованию, а также намечены возможные пути сокращения времени вычисления ансамблевого прогноза.

Построенная система ансамблевого прогноза является первой в России прогностической системой подобного рода и использует мировой опыт мезомасштабного ансамблевого прогнозирования, в том числе опыт зарубежных систем на основе модели COSMO.

Выражаем глубокую признательность Е.Д. Астаховой и И.А. Розинкиной за полезное обсуждение работы на различных ее этапах.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.» по составной части темы «МЕГАПОЛИС – интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

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. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 1. – С. 5–17.
3. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.

4. *Муравьев А.В., Вильфанд Р.М.* О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // *Метеорология и гидрология.* – 2000. – № 12. – С. 24–34.
5. *Муравьев А.В., Куликова И.А.* Оценка экономической эффективности ансамблей гидродинамических прогнозов на основе вероятностных оценок качества // *Метеорология и гидрология.* – 2004. – № 11. – С. 17–26.
6. *Муравьев А.В., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Казначеева В.Д.* Использование ансамблей в прогнозе метеорологических полей // *Метеорология и гидрология.* – 2005. – № 7. – С. 5–17.
7. *Ситников И.Г., Полякова И.В.* Практическое применение ансамблей гидродинамических прогнозов метеорологических полей // *Метеорология и гидрология.* – 1997. – № 8. – С. 113–118.
8. *Hsu W.-R., Murphy A.H.* The attributes diagram: A geometrical framework for assessing the quality of probability forecasts // *Int. J. Forecasting.* – 1986. – Vol. 2, Iss. 3. – P. 285–293.
9. *Kain J., Fritsch J.* Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme // *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr.* – Boston.: American Meteorological Society, 1993. – Vol. 24. – No. 46. – P. 165–170.
10. *Kain J.* The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update // *Journal of Applied Meteorology.* – 2004. – Vol. 43. – No. 1. – P. 170–181.
11. *Kalnay E.* Atmospheric modelling, data assimilation and predictability. – Cambridge university press, 2003. – 341 p.
12. *Keller J.D.* Ensemble initialization using the breeding technique in a new ensemble forecasting system based on the numerical weather prediction model GME // *Dissertation «Meteorologisches Institut der Rhein».* – Friedr.-Wilh.-Universität Bonn, 2008. – 109 p.
13. *Lorenz E.N.* A deterministic non-periodic flow // *J. Atmos. Sci.* – 1963. – Vol. 20. – P. 130–141.
14. *Lorenz E.N.* A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model // *Tellus.* – 1965. – Vol. 17. – P. 321–333.
15. *Marsigli C.* COSMO Priority Project “Short Range Ensemble Prediction System” (SREPS): Final Report // *COSMO Technical Report No. 13.* – Deutscher Wetterdienst, 2009. – 32 p.
16. *Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., Petroliagis T.* The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation // *Q. J. Roy. Met. Soc.* – 1996. – Vol. 122. – P. 73–119.
17. *Montani A., Cesari D., Marsigli C., Paccagnella T.* Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges // *COSMO Technical Report No. 19.* – Deutscher Wetterdienst, 2010. – 28 p.
18. *Peralta C., Buchhold M.* Initial condition perturbations for the COSMO-DE-EPS // *COSMO Newsletter No. 11.* – Deutscher Wetterdienst, 2011. – P. 115–123.
19. *Talagrand O., Vautraud R., Strauss B.* Evaluation of probabilistic prediction systems. // *Proceedings of the workshop on predictability.* – ECMWF, 1998. – P. 1–25.
20. *Tiedtke M.* A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models // *Mon. Wea. Rev.* – 1989. – Vol. 117. – No. 8. – P. 1779–1800.

21. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations // Bull. Am. Met. Soc. – 1993. – Vol. 74. – P. 2317–2330.

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

Поступила в редакцию 21.06.2011 г.

АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ISOGRAPH

Ю.В. Алферов, В.В. Конейкин

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
alferov@mecom.ru, help@tushino.com*

В течение нескольких лет в Гидрометцентре России проводится работа по развитию автоматизированной графической системы Isograph для визуализации метеорологических данных в операционных системах семейства MS Windows [1, 2]. К настоящему моменту система включает комплекс векторных географических данных, таких как береговая линия материков и островов, внутренних водоемов, границы населенных пунктов, реки, дороги и т.д. и программные средства для их отображения, а также для визуализации метеоданных в форме полей и метеоданных, заданных в точке (наблюдения). При этом можно использовать несколько разных картографических проекций, как для карт, так и при описании сеток полей метеоданных. Формы представления метеоданных также могут быть различными: изолинии, цветное закрашивание изоконтуров и нанеска значений или значков. Количество карт, одновременно размещенных на экране компьютера, не ограничено. Количество изобразительных слоев на одной карте, каждый из которых определяется некоторым видом данных, также не ограничено. Графическая система Isograph, таким образом, в комплексе с оперативными базами данных имеет признаки глобальной метеорологической геоинформационной системы (ГИС) [6].

Первоначально разрабатываемый графический комплекс предполагалось использовать для визуализации данных в научных исследованиях. Программа была полностью интерактивной, т.е. управление изображением осуществлялось исключительно через меню и окна диалогов. Затем оказалось, что система полезна также и оперативным синоптикам для доступа и визуализации результатов численного прогнозирования погоды из внутренних баз данных Гидрометцентра России. С этого момента некоторые функции системы были автоматизированы, и определяющим принципом, строго соблюдающимся при разработке средств автоматизации, было облегчить работу с системой для пользователей-непрограммистов.

Для обеспечения ускорения построения карт в интерактивном режиме работы с системой Isograph используется три средства:

- возможность сохранения бланка карты в виде файла с параметрами региона и ссылками на необходимые географические данные;

– возможность сохранения заготовленных заранее комплектов параметров для последующей быстрой настройки изображения метеоэлементов, так называемые профили;

– возможность сохранения шаблонов карт с настроенным пользователем бланком и подобранными метеорологическими данными и профилями их изображения;

Все эти средства нацелены на использование пользователем-непрограммистом. Соблюдается принцип так называемого «визуального программирования». В данном случае этот процесс выглядит следующим образом. Пользователь строит карту, в интерактивном режиме, подбирая параметры изображений и руководствуясь при этом стоящими перед ним задачами и собственным вкусом. На любом этапе работы над картой, когда пользователя удовлетворяет полученное изображение, ему необходимо вызвать соответствующее средство сохранения достигнутых параметров. Для сохранения бланка и профиля изображения метеоэлемента пользователю достаточно лишь назначить имя соответствующему объекту.

Процедура сохранения шаблона карты, то есть полного состава изобразительных слоев, более сложная. Затруднение возникает здесь из-за того, что система Isograph не имеет собственного хранилища данных, и доступ к метео данным реализуется через механизм программного шлюза, как описывалось в [2]. Таким образом, виды запросов на метео данные для различных хранилищ данных и, соответственно, для различных программных шлюзов оказываются различными, поэтому и сохранить их автоматически не представляется возможным. При создании карты пользователем система Isograph «запоминает» имена примененных им бланка, шлюза и профилей расчерчивания метео данных. Кроме того, в требованиях, сформулированных для разработчиков шлюзов, содержится пункт о необходимости сохранения запроса к данным, однозначно их определяющего, который затем передается вместе с другими необходимыми параметрами данных в ядро системы Isograph. Таким образом, в идеале, к моменту сохранения карты система «знает» все обо всех используемых данных. То же относится и к данным, которые рассчитываются внутри Isograph. В этом случае запоминается информация о том, с помощью каких функций получены данные, из каких данных они получены и откуда те, в свою очередь, взяты. В результате при сохранении каждого изобразительного слоя пользователю предлагается своеобразная анкета, все графы которой уже заполнены, и достаточно лишь указать местоположение характеристик времени в соответствующих местах. Пример такого диалога для метеополя из оперативной базы данных Гидрометцентра России приведен на рис. 1. На рисунке в графах «анкеты» уже отмечены места для подстановки времени и даты при последующем вызове шаблона. Это группы букв, ограниченные символами решетки («#»). При реальной работе пользователю приходится выполнять эту разметку самостоятельно, что можно легко выполнить при помощи всплывающих меню. Здесь возникает лишь одна

трудность: пользователю необходимо знать, где, какие и в каком формате временные параметры используются. Если названия карты и данных имеют достаточно произвольный вид, то форма запроса данных имеет строгую структуру, предусмотренную разработчиком шлюза. И, конечно, в этом случае за дополнительной информацией необходимо обратиться к разработчику либо к документации, представленной им.

Параметры сохранения карты

ЗАПОЛНЕНИЕ ВСЕХ ПОЛЕЙ ОБЯЗАТЕЛЬНО!!!

Название карты: PO, T, R на #z# ч от #ddddd# г., #hh# ч

Бланк карты: D:\isograph\Бланки\Европа.igb

Название данных: Облачность на #z# ч от #ddddd#, #hh# ч (SEL1)

Данные вводятся с помощью шлюза: XeonDB.dll

Запрос к БД / файл: SEL1 420511 C55N#zzz#Z #yyy##mm##dd# #hh# 0 0 0 0

Профиль для рисования*: D:\ISOGRAPH\Профили\Облачность.2ds

Сохранить параметры сетки* *) Для нанесения данных наблюдений не используются

Отклонение от основных значений параметров времени:

Дата, срок:

время: 0 заблаговременность +

Единица измерения для отклонения срока: час

Заблаговременность: 0 Декада: 0

Параметры задаются отдельно для каждого метеоэлемента и каждого блока легенды

Сохранить Пропустить Отменить

Рис. 1. Диалоговое окно с параметрами сохранения одного из изобразительных слоев шаблона карты.

Вызов всех описанных объектов производится системой после соответствующих команд оператора, подаваемых с помощью меню и окон диалогов. Вместе с тем, пользователями системы уже давно высказывались пожелания организации полностью автоматического режима запуска системы для создания карт. Такой режим был бы полезен в оперативной работе для генерации карт по расписанию, для создания прогностического иллюстративного материала для веб-сайта и т.д. Если все перечисленные выше аспекты автоматизации могли быть максимально переложены на плечи разработчиков Isograph, то решение последней задачи предполагает со стороны пользователя системы разработку некоторых сценариев создания и обработки карт, анализ нестандартных ситуаций и т.п., а также от разработчиков реализацию синтаксического разбора таких сценариев и их исполнения.

Поэтому, к сожалению, от пользователя системы требуется способность составить план создания карт, манипулирования ими, реагирования на различные события и т.п., то есть владения навыками программирования.

Итак, для автоматического создания карт и манипулирования ими разработан несложный язык программирования. При этом предполагается, что создаваемые карты были ранее сохранены в форме шаблонов и путем действий, описанных выше. Ядром этого языка являются операторы цикла с числовым счетчиком итераций и по списку строк. Допускается значительная глубина вложенности циклов. Также для реализации возможности анализа событий добавлен оператор условия. Переменные внутри программы (скрипта) на этом языке не требуют описания. Помимо стандартных и для других языков программирования числовых и строковых констант, введены специальные константы вида год/мес/день/час/мин/сек – для обозначения даты и времени. Допустимо сокращать конечную часть такой константы, например, 2011/04/15 – 15 апреля 2011 года. Также введены константы целого типа с постфиксной литерой для обозначения временных единиц: у — годы, m – месяцы, d – дни, h – часы, i – минуты, s – секунды, например, 2d – два дня (двое суток), 3m – три месяца и т.п. Из общераспространенных операторов есть еще, конечно, оператор присваивания. Определены также специальные операторы, реализующие известную функциональность Isograph: создание и удаление карты, печать и сохранение карты, выстраивания карт рядами. Также есть арифметические операторы-функции. Есть операторы получения и преобразования даты и времени. Также имеются некоторые другие служебные операторы. Таким образом, основное назначение операторов языка — создание карт по готовым шаблонам и манипуляции ими. Полный список зарезервированных слов языка и их значение приведены в таблице.

Логика обработки скрипта следующая. При его запуске создается пустой список карт. При каждом выполнении команды создания карты вызывается соответствующая процедура в Isograph, а ссылка на новую карту добавляется в список карт скрипта. В процессе работы возможно использование как команд работы с комплектом карт, так и команд работы с последней созданной картой. Карты можно сохранять в файл, выводить на печать и удалять из Isograph. Также возможна модификация комплекта карт командой удаления из него ссылки на последнюю созданную карту либо полной очисткой списка карт. При этом из Isograph карты не удаляются. Полная очистка списка карт используется для начала работы с формально новой группой карт. Удаление из списка карт последней созданной карты позволяет при необходимости исключить карту, созданную с ошибкой.

Зарезервированные слова языка манипулирования картами

Функции манипулирования картами и переменными	
Create	Создание карты
Destroy	Удаление последней созданной карты
DestroyAll	Удаление всех созданных карт
BuildToRow	Выстраивание карт рядами
Export	Запись последней созданной карты в файл графического формата
ExportAll	Запись всех созданных карт в файл графического формата
Print	Печать последней созданной карты
PrintAll	Печать всех созданных карт
ClearVarList	Очистка списка переменных скрипта
ClearMapList	Очистка списка карт скрипта без уничтожения самих карт
DeleteFromList	Удаление карты из списка без ее уничтожения
MapError	Статус последней созданной карты: 0 – карта создана успешно, 1 – создана карта с неполным составом слоев, 2 – карта не может быть создана.
Операторы для работы с датой и временем	
Now	Текущие поясные дата и время (из компьютера)
UTC	Текущие дата и время по ВСВ (при условии правильной настройки операционной системы пользователя)
Srok	Ближайший к заданному времени прошедший синоптический срок
Управляющие инструкции	
If	Оператор условия
EndIf	Окончание оператора условия
For	Оператор цикла
Next	Окончание оператора цикла, переход на следующую итерацию
Break	Выход из текущего цикла
Halt	Немедленное прекращение выполнения скрипта без закрытия Isograph
Exit	Немедленное прекращение выполнения скрипта и закрытие Isograph
Арифметические операторы	
Inc	Сложение
Dec	Вычитание
Mult	Умножение
Div	Деление
Trunc	Целая часть числа
Frac	Дробная часть числа
Abs	Абсолютная величина числа
Дополнительные зарезервированные символы	
!	Комментарий
#	Ссылка на параметр скрипта
Дополнительные слова для реализации цикла и условия	
To	Составляющая арифметического цикла. Пример: For A=1 To 5 Step 2
Step	Составляющая арифметического цикла
Of	Составляющая цикла по списку строк. Пример: For A of (B, "text2", C)
Not	Отрицание логической переменной
Then	Составляющая оператора условия

Переменные скрипта также попадают в список переменных. Тип переменной определяется по ее первому упоминанию. Изменять тип переменной внутри скрипта нельзя, если не вызвать `ClearVarList`, но в этом случае потеряются значения всех переменных. Таким образом, фактически после вызова `ClearVarList` и `ClearMapList` внутри того же файла начинается новый скрипт.

Запуск скрипта в пакетном режиме может быть осуществлен командой:

```
Ig.exe "<имя скрипта>" "<параметры>"
```

Здесь `Ig.exe` — имя программы `Isograph`, например:

```
Ig.exe "Европа" "date=2010/12/01 z1=24 z2=72 stp=12"
```

Запуск подобной задачи по расписанию выполняется при помощи штатного Планировщика заданий MS Windows.

Был разработан интерпретатор этого языка. Основным предназначением интерпретатора является синтаксический разбор текста программы (скрипта), распознавание конструкций языка, детектирование ошибок и указание на них, а также вызов соответствующих функций графической системы в случае отсутствия ошибок.

Итак, интерпретирование скрипта представляет собой синтаксический анализ текста путем выделения из него последовательности предложений языка, после чего интерпретатор выполняет действие, соответствующее данному предложению. Выделение предложений производится путем сравнения последовательности элементарных конструкций, выделяемых из текста, по типам с последовательностями элементарных конструкций, указанными в шаблонах предложений языка [3–5, 7, 8].

Выделение элементарных конструкций из текста скрипта производится при помощи двух модулей. Первый модуль осуществляет получение очередного символа из буфера текста скрипта и помещает этот символ в буфер символа. Если буфер текста скрипта оказывается пуст, то модуль устанавливает флаг конца текста. Второй модуль осуществляет сборку элементарных конструкций из символов, находящихся в буфере символа.

Сборка элементарных конструкций производится путем добавления очередного символа к уже частично собранной элементарной конструкции, до тех пор, пока не встретится символ, недопустимый для данного типа конструкции. После чего конструкция считается полностью собранной. Тип элементарной конструкции определяется в процессе её сборки.

В процессе выделения из текста скрипта, как элементарных конструкций, так и предложений, неявно производится проверка текста скрипта на наличие синтаксических ошибок, в случае обнаружения которых генерируется соответствующее сообщение.

С целью облегчения написания скрипта для пользователя-непрограммиста была создана специальная программа Генератор скриптов (рис. 2). Окно программы содержит несколько панелей, в которых можно как набирать текст вручную (для опытных пользователей), так и создавать его путем перетаскивания иконок команд и заполнения «анкеты» параметров команды, что удобно для непрограммистов. При втором способе структура программы более наглядна, а текст ее генерируется автоматически в соответствии со структурой, получающейся при работе пользователя.

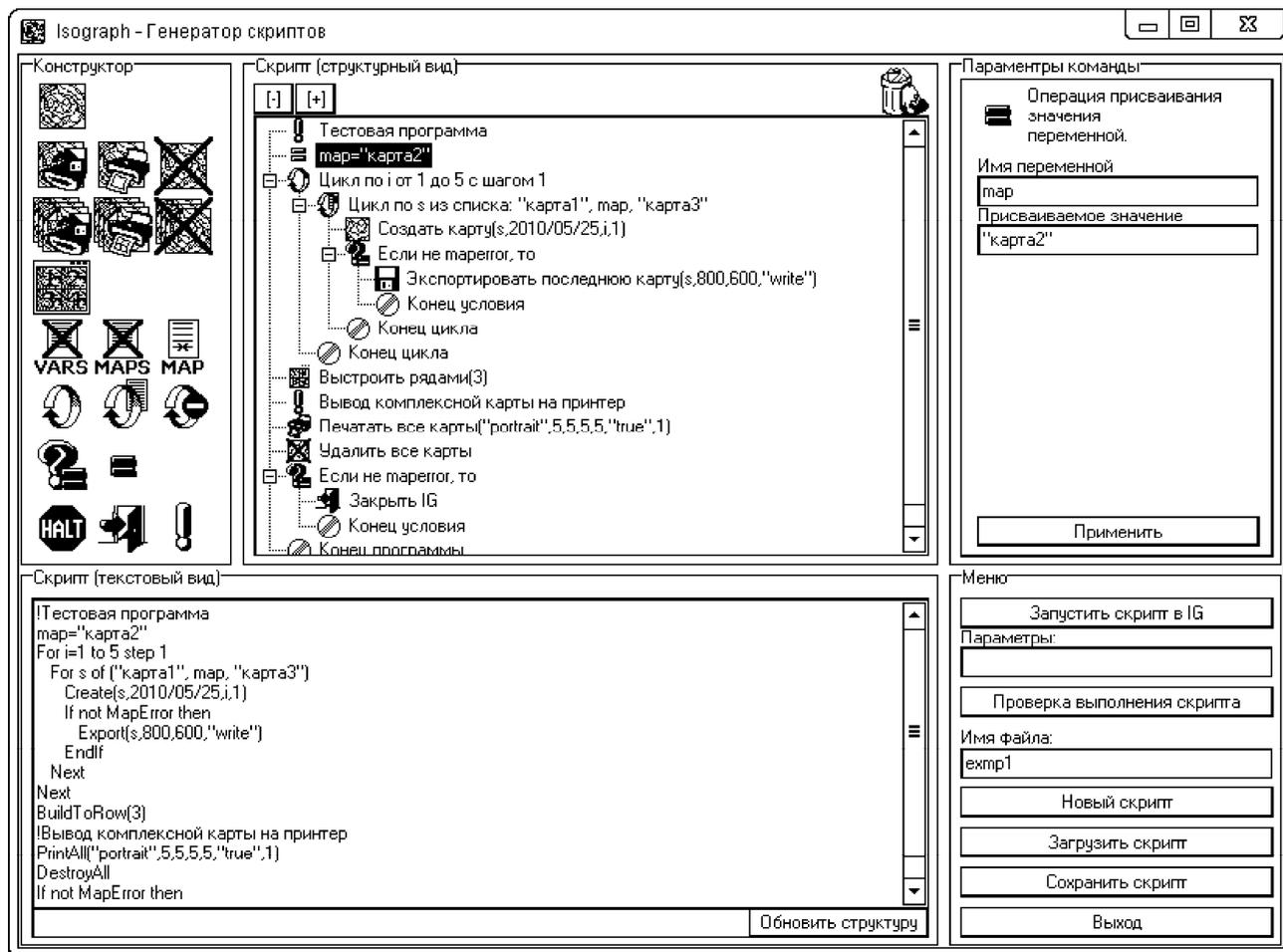


Рис. 2. Окно Генератора скриптов.

Основные возможности Генератора скриптов:

1. Разработка скрипта при помощи графического интерфейса:

– скрипт отображается в виде дерева. В таком представлении четко прослеживается вложенность структур. Текст может быть легко перекомпонован благодаря возможности перемещения структур любой сложности внутри дерева;

– добавление новой команды производится путем перетаскивания соответствующего значка, расположенного на панели «Конструктор», в нужное место дерева. Такой способ исключает возможность появления синтаксических ошибок при написании команд. Также отпадает необходимость помнить названия и синтаксис написания команд;

– редактирование параметров команды осуществляется при помощи диалоговой панели «Параметры команды». После изменения всех необходимых параметров и нажатии кнопки «Применить» происходит проверка корректности задания параметров;

– значки ветвей дерева, соответствующие различным командам, добавляют наглядности тексту;

– в окне «Скрипт (текстовый вид)» при каждом изменении текст скрипта автоматически модифицируется.

2. Набор текста скрипта вручную:

– возможно редактирование текста скрипта вручную в окне «Скрипт (текстовый вид)»;

– после внесения очередного изменения в текст есть возможность отобразить его в дереве скрипта путем нажатия кнопки «Обновить структуру». Одновременно будет произведена проверка синтаксиса написания команд и их параметров, а также вложенности структур.

3. Проверка выполнения скрипта:

– при нажатии на кнопку «Проверка выполнения скрипта» будет произведена полноценная проверка скрипта путем эмуляции работы скрипта в программе Isograph.

Такая проверка обеспечивает контроль правильности использования переменных и значений параметров.

4. Программа имеет возможность создания, сохранения и загрузки скриптов.

Итак, система визуализации Isograph имеет в своем составе средства для автоматизации действий пользователя, как в интерактивном режиме работы, так и позволяющие производить расчет карт в пакетном режиме обработки данных. Все эти средства разработаны с учетом необходимости облегчить использование их для пользователей-непрограммистов.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы” по составной части темы ”МЕГАПОЛИС – интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий”.

Список использованных источников

1. *Алферов Ю.В.* Принципы построения автоматизированной графической системы для визуализации полей метеозакономерностей в научных исследованиях // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 334. – С. 180–189.
2. *Алферов Ю.В.* Автоматизированная графическая система для визуализации результатов численных прогнозов // Труды Гидрометцентра России. – 2003. – Вып. 338. – С. 119–124.
3. *Ахо А.В., Сети Р., Ульман Д.Д.* Компиляторы: принципы, технологии и инструменты. – М.: Вильямс, 2003. – 768 с.
4. *Вирт Н.* Построение компиляторов. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 192 с.
5. *Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж.* Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. – СПб.: Питер, 2001. – 368 с.
6. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Под ред. А.М. Берлянта и А.В. Кошкарева. – М.: ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с.
7. *Свердлов С.З.* Языки программирования и методы трансляции. – СПб.: Питер, 2007. – 637 с.
8. *Шилдт Г.* Теория и практика C++. – СПб.: ВHV-Санкт-Петербург, 2001. – 416 с.

Поступила в редакцию 20.05.2011 г.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ОПЕРАТИВНОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ РОСГИДРОМЕТА

В.А. Анцыпович, С.В. Лубов

*ФБГУ “Главный вычислительный центр Росгидромета”
antsyp@hydromet.ru, loubov@hydromet.ru*

С целью выполнения национальных задач и международных обязательств Российской Федерации во Всемирной метеорологической организации (ВМО) в части численного прогнозирования в рамках Проекта модернизации и технического перевооружения учреждений и организаций, Росгидромет провел переоснащение вычислительных подразделений.

Современный период развития вычислительной базы в Росгидромете характеризуется наличием трех уровней центров обработки оперативной информации:

- единый центр глобальной обработки информации в Москве, который выполняет и функции Мирового метеорологического центра в ВМО; в функции этого центра входят задачи сбора информации о состоянии окружающей среды в глобальном масштабе, их усвоение и расчет прогноза развития процессов по всему Земному шару с различной (от 12 часов до 15 суток) заблаговременностью;
- специализированные центры, обеспечивающие расчет прогноза развития атмосферных процессов по своей зоне ответственности, мониторинг и прогноз развития распространения загрязняющих веществ, а также прогнозы изменения климата (центры Росгидромета в Новосибирске, Хабаровске, Санкт-Петербурге); выполняют функции региональных и мировых специализированных центров оперативной обработки гидрометеорологической информации; центр обработки оперативной информации в Москве также выполняет функции регионального центра;
- локальные оперативные прогностические центры Росгидромета, обеспечивающие интерпретацию прогностической продукции, ее визуализацию, окончательную обработку и подготовку для конкретного потребителя; данные центры Росгидромета расположены по всей территории России.

Современный этап развития технологий прогнозирования атмосферных процессов для обеспечения повышения точности и заблаговременности прогнозов характеризуется переходом к расчетам по глобальным моделям атмосферы с горизонтальным разрешением 25–40 и менее километров и применением ансамблевых методов, связанных с одновременным счетом нескольких десятков вариантов моделей.

В условиях ограничения допустимого времени счета для выполнения задач усвоения оперативных данных и прогноза развития атмосферных процессов, задачи глобального масштаба требуют производительности вычислительных комплексов в десятки терафлопс (1 TFlops = 10^{12} операций с плавающей запятой в секунду), а задачи регионального масштаба – производительности в сотни гигафлопс (1 GFlops = 10^9 операций с плавающей запятой в секунду).

В результате проведенных коллективом специалистов ГВЦ Росгидромета и Гидрометцентра России исследований, в 2005 году в Росгидромете был начат конкурсный процесс модернизации центров обработки оперативной информации в Москве, Новосибирске, Хабаровске и Санкт-Петербурге. Типовая структура модернизированного вычислительного комплекса для каждого из указанных центров представлена на рис. 1.

Вычислитель выполняет функции оперативного и научно-исследовательского счета, ресурсной поддержки научно-исследовательских разработок. Дифференциация задач выполняется по технологическим схемам каждого из центров установки. В комплект системы входит системная консоль организации доступа ко всем узлам системы для инженерного персонала.

Система управления данными состоит из:

- дисковой системы хранения данных, обеспечивающей хранение данных на накопителях ЖМД и предоставляющей ресурсы для подсистем ввода-вывода Вычислителя, серверов баз данных и оперативных систем;
- ленточной системы хранения данных, состоящей из автоматизированной ленточной библиотеки;
- серверов системы управления данными, включая серверы архивирования и резервного копирования, иерархического хранения данных.

Серверы оперативной системы и баз данных включают в себя вычислительные серверы, локальные серверы оперативного назначения, в число которых входят серверы обмена оперативной информацией, серверы информационных систем Росгидромета, файловые серверы, обеспечивающие файловый и транзакционный обмен данными для клиентов ЛВС.

Серверы общего назначения обеспечивают функционирование основных сетевых сервисов, таких как DHCP, NTP, локальных DNS и SENDMAIL.

Абонентские рабочие места оперативного и научно-исследовательского назначения включают персональные компьютеры и станции визуализации оперативного и неоперативного персонала.

Локальная вычислительная сеть объединяет все компоненты информационной системы. Связь с существующей ЛВС осуществляется посредством двух интерфейсов Ethernet 10/100/1000 Base-T. Для обеспечения функционирования осуществляется мониторинг и управление сетевым оборудованием.

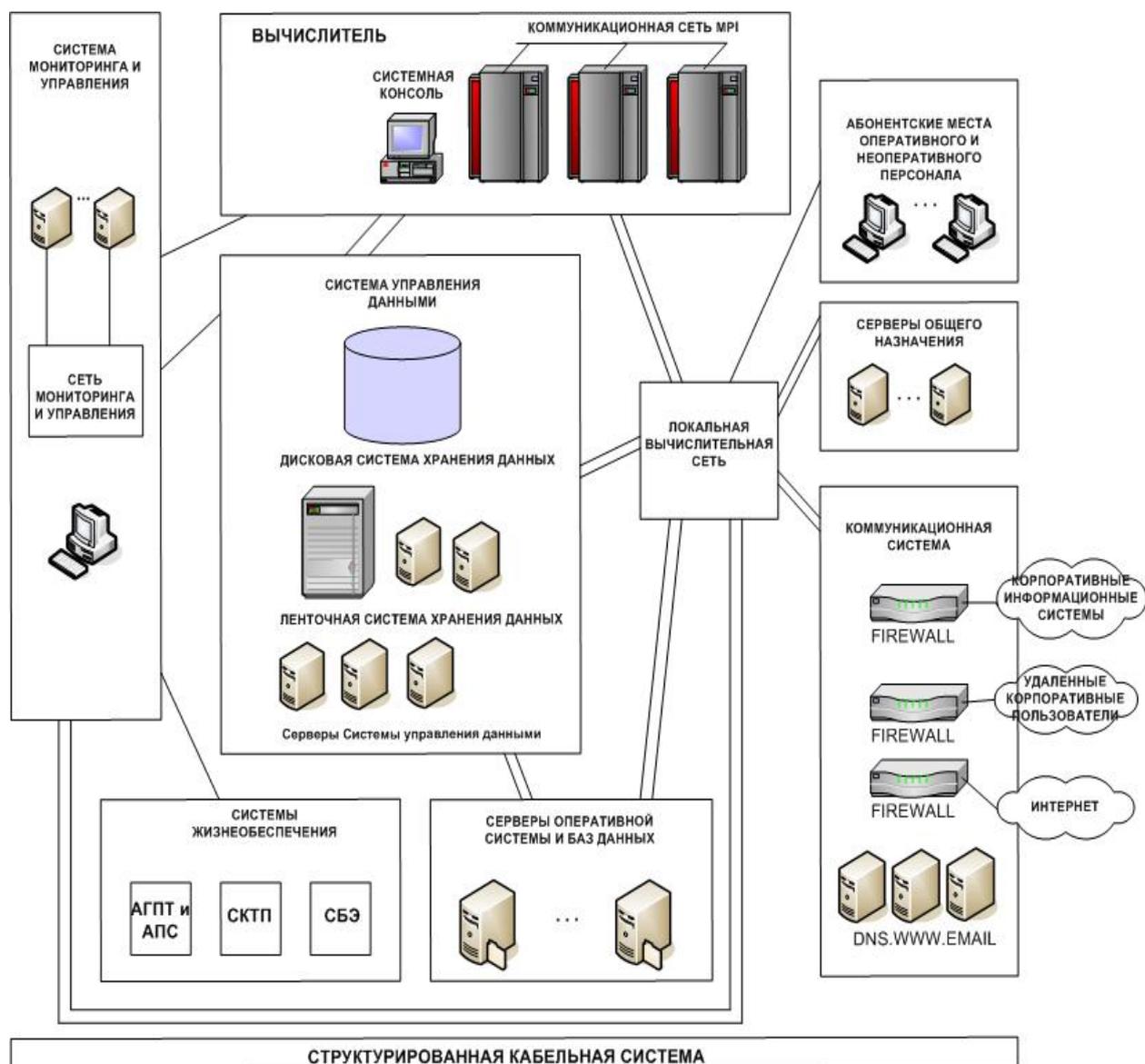


Рис. 1. Типовая структура модернизированного центра обработки оперативных данных Росгидромета.

Система мониторинга и управления обеспечивает мониторинг и централизованное управление Вычислителем и Системой управления данными. Система управления и мониторинга включает в себя Сеть мониторинга и управления, которая объединяет специализированные аппаратные средства Вычислителя, Системы управления данными и

Системы жизнеобеспечения, предназначена для удаленного управления этими компонентами.

Система информационной безопасности и удаленного доступа обеспечивает функционирование сервисов информационной безопасности и авторизации доступа к ресурсам, в том числе удаленного. В частности, к таким сервисам относятся системы антивирусной и антиспамовой защиты, сервисы аутентификации и управления доступом (LDAP), сервисы обеспечения безопасности ЛВС.

Структурированная кабельная система обеспечивает интеграцию всего активного оборудования вычислительного комплекса.

Конкурсный процесс был построен на условиях достижения максимальной производительности на основных вычислительных алгоритмах глобальных моделей атмосферы, применяемых в оперативной практике ММЦ в Москве, и минимальной стоимости контракта. В результате конкурса в 2007-2008 гг. были заключены соответствующие контракты и по результатам установлены вычислительные комплексы, основные характеристики которых указаны в таблице.

Таблица

Конфигурация информационно-вычислительных систем в центрах Росгидромета

Центр Росгидромета	Пиковая производительность TFlops (10^{12})	Тип вычислителя	Количество CPU/CPUV узле	ОЗУ Тбайт (10^{12})	Производитель (фирма/страна)	Дисковая подсистема Тбайт(10^{12})
ММЦ Москва	11	SGI Altix4700	1664/128	6.6	SGI(США)	180TB=60TB SGI IS4000 + 120TB SGI IS10000
	16	SGI Altix ICE8200	1408/8	2/8	SGI(США)	
РСМЦ Новосибирск	0.7	G-Scale S4700	104/104	0.2	Крафтвэй (Россия)	12.3TB SGI InfiniteStorage4000
РСМЦ Хабаровск	0.7	G-Scale S4700	104/104	0.2	Крафтвэй (Россия)	12.3TB SGI InfiniteStorage4000
МЦРД (ГГО им. А.И.Воейкова, С-Петербург)	0.7	G-Scale S4700	108/108	0.2	Крафтвэй (Россия)	14.4TB Kraftway Storage 400S

В специализированных региональных центрах в Новосибирске и Хабаровске, а также в Мировом центре радиационных данных в Санкт-Петербурге пиковая производительность вычислителя компании G-Scale S4700 ЗАО «Крафтвэй Корпорэйшн ПЛС» на базе 54 процессоров Intel Itanium 9040 (для центра в Санкт-Петербурге) и 52 процессоров Intel Itanium 9140M (для центров в Новосибирске и Хабаровске) составляет 0,7 TFlops. Емкость дискового хранилища для центров в Новосибирске и Хабаровске – 12.3 ТВ на базе оборудования SGI InfiniteStorage 4000, а для центра в Санкт-Петербурге – 14.4 ТВ на базе оборудования Kraftway Storage 400S.

Основной вычислительный комплекс для выполнения глобальных усвоения данных наблюдений и прогноза состояния атмосферы установлен в Москве (рис. 2). Вычислительные мощности представлены двумя кластерами общей пиковой производительностью 27 TFlops. Рассмотрим на его примере построение вычислительных процессов подробнее.



Рис. 2. Фото вычислителя SGI Altix4700, установленного в ГВЦ Росгидромета (Москва).

Кластер (Вычислитель #1) SGI Altix 4700 пиковой производительностью 11 TFlops построен на 832 2-х ядерных процессорах Intel Itanium 9140M с оперативной памятью 6.6 ТВ

(1664 процессорных ядер, 4 GB на ядро). Вычислитель представляет собой систему с общей памятью, способен масштабироваться до 1024 ядер в рамках единого образа операционной системы. Архитектура SGI NUMAflex обеспечивает наилучшие (по проведенным тестированиям) значения полосы пропускания и латентности. Шина взаимодействия SGI NUMALink обеспечивает высокоскоростное взаимодействие между процессорами системы. На текущий момент Вычислитель логически делится на партии/узлы (13 узлов): 1 партия = 1 вычислительная стойка. В каждой партии 32 виртуальных вычислительных узла (ноды): 4 ядра + 16GB оперативной памяти. Две виртуальные ноды зарезервированы для системных процессов (8 ядер + 32GB памяти). Каждая аппаратная партия имеет системные жесткие диски SAS с полезным объемом 146 GB с зеркалированием и высокопроизводительный доступ к Дисковой системе хранения данных через параллельную файловую систему SGI CXFS.

Кластер (Вычислитель #2) SGI Altix ICE8200 пиковой производительностью 16 TFlops построен на 352 4-х ядерных процессорах Intel Quad Core Xeon e5440 с оперативной памятью 2.8TB (1408 процессорных ядер, 2 GB на ядро). Вычислитель представляет собой широко распространенный тип блейд-систем, имеет 64-разрядную архитектуру EM64T/AMD64. Вычислитель состоит из трех вычислительных стоек, каждая из которых представляет собой: 4 IRU (Individual Rack Unit — блейд шасси), 15 вычислительных блейдов (лезвий), 8 ядер и 16GB оперативной памяти в каждом блейде. В качестве шины взаимодействия используется технология Infiniband. Кластер использует бездисковый принцип работы в - образ операционной системы разворачивается в оперативной памяти. Общая файловая система строится на базе технологии NFS over Infiniband. Таким образом, узлы кластера имеют только сетевой доступ к данным Дисковой системы хранения.

Дисковая подсистема общим объемом 180 TB имеет иерархическую структуру: 60TB SGI InfiniteStorage 4000 system и 120TB SGI InfiniteStorage 10000. Решение построено на сети SAN и файловой системе SGI CXFS, которая является разделяемой файловой системой, направляющей поток данных через SAN. CXFS обеспечивает соединение всех необходимых технологических серверов и узлов Вычислителя #1 с Дисковой системой хранения данных. Файловая система работает совместно с SGI DMF – системой иерархического управления хранением SGI Hierarchical Storage Management, которая обеспечивает миграцию данных между дисковыми подсистемами.

Для обеспечения единой точки входа для пользователей, организации среды трансляции организована система FRONT-END, состоящая из машин двух архитектур Intel Itanium и Intel Xeon соответственно. На вычислительных средствах установлено программное обеспечение, включая компиляторы Intel для языков Fortran и C, научные

библиотеки SGI SCSL, Intel MKL, библиотеки передачи сообщений MPI и SHMEM, отладчик Totalview.

Для обеспечения контролируемого запуска задач на ресурсах вычислительного комплекса организована система очереди задач на базе программного обеспечения Altair PBS Pro. (рис. 3). С любой из систем FRONT-END допускается запуск задач на любом из кластеров в соответствии с имеющимися разрешениями. Рассматриваемая система имеет достаточно гибкую структуру и на настоящий момент организован запуск задач по приоритетам (задачи, имеющие статус оперативных, запускаются вне очереди и имеют возможность снимать с исполнения другие задачи меньшего приоритета), по размерности (небольшие задачи запускаются на ресурсах системы, которые обеспечивают их выполнение без останова) и т.д.

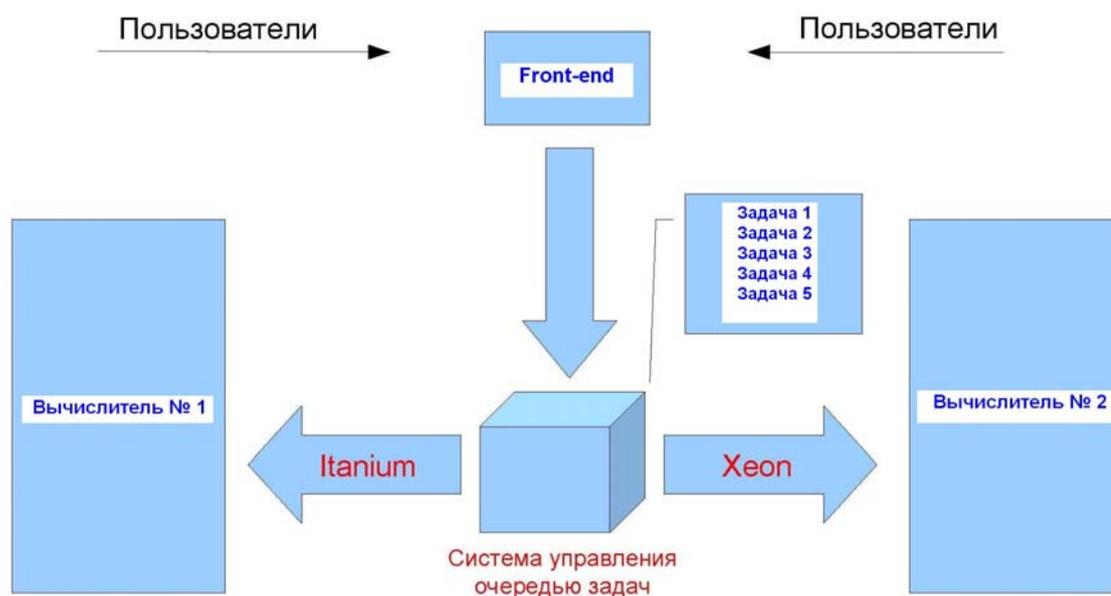


Рис. 3. Взаимодействие пользователей с системой.

Задачи модернизации и технического перевооружения, реализуемые Проектом Росгидромета, не завершаются поставкой конкретных программно-аппаратных комплексов. Большой объем работ по реализации прогностических алгоритмов и их развитию в среде с высокой степенью параллелизации был выполнен специалистами Гидрометцентра России и ГВЦ Росгидромета в период 2003–2010 гг. К настоящему времени на вычислительном комплексе организовано выполнение прогностических расчетов на базе глобальных моделей атмосферы ПЛАВ-2008 (SLM), спектральной модели. Большим достижением стала организация оперативного счета по мезомасштабным моделям атмосферы COSMO-RU, WRF-ARW, требующим значительных ресурсов (800 процессоров для COSMO-RU, 700

процессоров для WRF). Идет интенсивный научно-исследовательский счет. Ресурсы комплекса существенным образом загружены. Особенно актуальным является задача дальнейшего развития вычислительной базы и увеличения производительности вычислительных комплексов с целью реализации на них новых оперативных прогностических технологий.

Опыт построения высокопроизводительных вычислительных комплексов и их системы жизнеобеспечения в вычислительных подразделениях Росгидромета показал, что центр сложности комплексного решения сейчас находится не в вычислительном комплексе, а в системе термовлажностной стабилизации, автоматический режим которой в экстремальных погодных условиях не совсем справляется с заданным функционалом.

При проектировании следующего этапа модернизации высокопроизводительных комплексов приходится учитывать, что на современном этапе развития мощностей каждые 2-3 года появляются решения, превышающие по производительности предыдущее в 20–25 раз и находящиеся примерно в том же самом энергопакете. Это означает, что через 2-3 года эксплуатация предыдущего комплекса становится невыгодной по параметру стоимости затрат на потребленное электричество. В свою очередь это означает, что невыгодно проектировать комплекс с «запасом» по мощности на длительный период времени, а следует ориентироваться на наращивание вычислительной мощности путем установки нового решения. Т.к. высокопроизводительные комплексы относятся к особо ценному имуществу с периодом эксплуатации не менее 10 лет, то в этой части также существует проблема в одновременном выполнении данного положения и законодательно предусмотренных мероприятий по энергосбережению.

При проектировании следующего этапа модернизации высокопроизводительных вычислительных комплексов Росгидромета, помимо задач портации существующих технологий, перед специалистами Росгидромета стоит задача анализа тренда развития вычислительных структур в ближайшие 3–5 лет и оценка эффективности реализации на них оперативных прогностических технологий. В апреле 2008 года руководство Росгидромета и компании Intel подписали протокол о создании Центра компетенции по высокопроизводительным вычислениям в области метеорологии. Центр компетенции призван объединить усилия ученых в области гидродинамического моделирования и специалистов информационных технологий для решения задач дальнейшего развития алгоритмов усвоения данных об окружающей среде и прогнозирования атмосферных процессов. В рамках Центра компетенции открываются возможности по исследованию будущих решений в области вычислительной техники.

Поступила в редакцию 15.07.2011 г.

АНСАМБЛЕВЫЙ СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ: РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ НА СОВРЕМЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ БАЗЕ

Е.Д. Астахова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
helen@mecom.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 2 суперкомпьютера: Altix ICE 8200, который находится на 22-ом 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-ом 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 в 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.

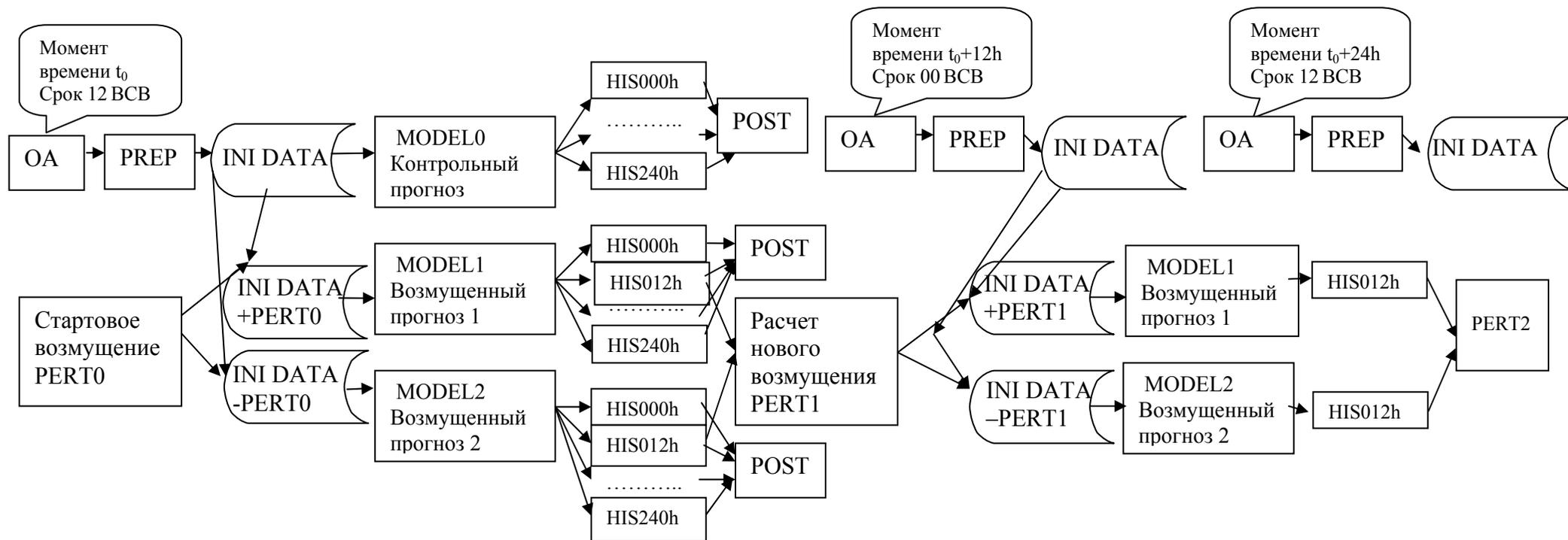


Рис. 1. Схема реализации бридинг-метода в Гидрометцентре России.

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.

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]:

$$E = \iiint \left\{ u'^2 + v'^2 + \frac{C_p T'^2}{T_{ref}} \right\} dp ds + \iint \frac{RT_{ref}}{p_{ref}} p_s'^2 ds, \quad (1)$$

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 внетропические области Южного и Северного полушарий. Соответственно, интегрирование в формуле (1) выполняется по этим регионам.

(2) **Объективный анализ (ОА)** – 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 ч. 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 ПЛАВ2008 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 Талагрana (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 -тый интервал. В случае правильного формирования ансамбля, все столбики диаграммы Талагрana должны быть одинаковой высоты.

На рис. 2 представлены диаграммы Талагрana 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 Талагрana 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.

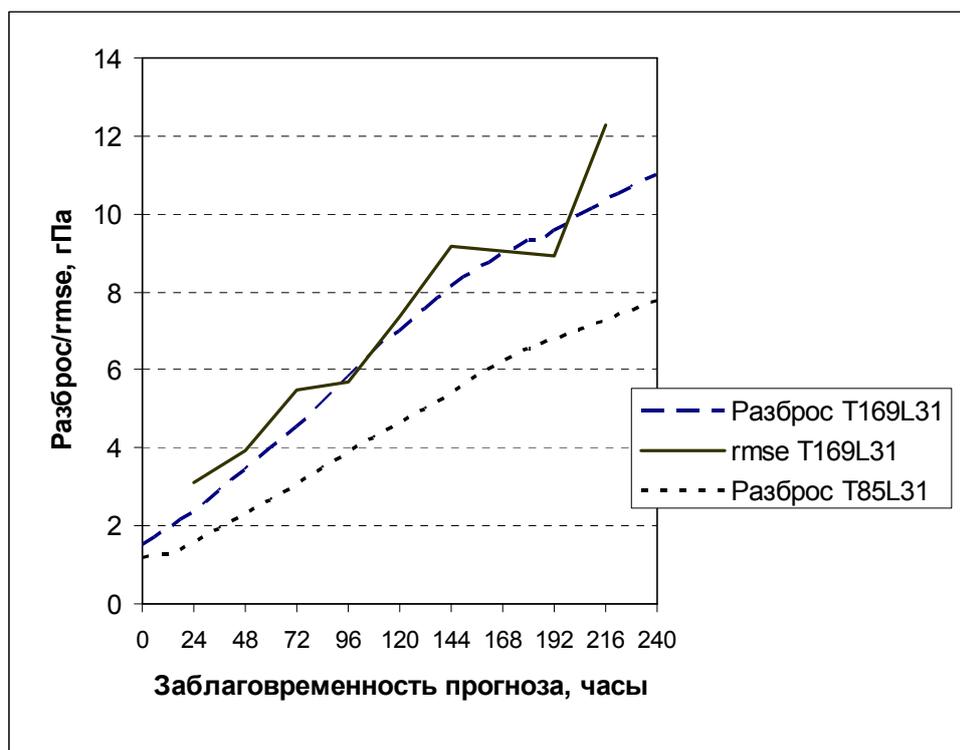


Рис. 3. Разброс в ансамблях, основанных на модели T169L31 и T85L31, и среднеквадратическая ошибка контрольного прогноза.

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 сроки 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 ПЛАВ2008 – по невозмущенным исходным данным. Ежесуточно 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., Семенов А.Е., Алферов Д.Ю. 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 / В сб. «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 Т85L31 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 PLAV / В сб.: «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. – No. 39. – P. 6-03–6-04.
10. Bougeault P., Toth Z., Bishop C., Brown B., Burridge D., Chen D., Ebert B., 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. – Issue 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* – 2010. – N. 123, 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 pp

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.

СИСТЕМА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ COSMO-RU: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОГНОЗОВ

Д.В. Блинов, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
Denis_Blinov@mecom.ru, Gdaly.Rivin@mecom.ru, Inna@mecom.ru*

Осенью 2009 года прошли два взаимосвязанных события, которые позволили использовать в оперативном режиме систему мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU: Росгидромет вошел как полноправный член в состав консорциума COSMO [сайт консорциума COSMO] и в ФГБУ «Главный вычислительный центр Росгидромета» начал свою работу суперкомпьютер SGI ALTIX 4700 [2].

Основная цель метеорологического сообщества COSMO – развитие и применение в оперативной практике негидростатической мезомасштабной модели атмосферы COSMO. В [3, 4] приведена информация о первом этапе подготовительной работы, проводившейся в ФГБУ «Гидрометцентр России» по реализации и развитию системы негидростатической мезомасштабной прогноза погоды COSMO-RU (по правилам консорциума каждая страна-участник к имени модели COSMO должна добавить две буквы из имени страны, тем самым указывая на область интегрирования и локальный вариант).

По решению Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 13 апреля 2011 года эта система внедрена в оперативную практику в качестве базовой для численного прогнозирования следующих метеорологических величин (полей и метеограмм): осадки, температура и влажность воздуха, фоновый приземный ветер.

В состав системы прогноза, как это принято в мировой практике, наряду с моделью атмосферы, входят блоки препроцессинга и постпроцессинга. В данной статье описана часть работы, выполняемой на стадии постпроцессинга по визуализации полученных прогнозов в виде метеограмм и карт изолиний и изополос и организации работы по “доставке” в удобном для пользователей виде.

Обычно результаты прогноза погоды предоставляют пользователям в файлах в коде GRIB и в виде текстовых метеограмм. Такая форма представления, вообще говоря, неудобна для конечных пользователей, так как в этом случае пользователю необходимо самому провести визуализацию. Учитывая, что эту процедуру необходимо проделывать каждый раз, то становится очевидным, что необходимо избавить конечного пользователя (особенно

синоптиков, связанных с подготовкой оперативных официальных прогнозов к требуемому времени) от этой не только не свойственной им работы, но и на которую зачастую просто нет времени и возможности выполнения.

Система COSMO-RU работает на суперкомпьютере SGI ALTIX 4700, поэтому результаты прогнозов хранятся на дисковой системе, связанной с суперкомпьютером. По понятным причинам доступ к суперкомпьютеру и его дисковой системе имеет ограниченное количество пользователей. Таким образом, необходимо не только визуализировать, но и организовать эффективную доставку пользователям результатов прогноза и его визуализации.

Для решения этих двух задач в Лаборатории численного прогноза погоды по ограниченной территории (ЧППОТ) ФГБУ «Гидрометцентр России» были разработаны соответствующие модули постпроцессинга. Блок-схема постпроцессинга, связанная с этими модулями, приведена на рисунке. Блок «Запись в базу данных» подготовлен в Отделе систем информационного обеспечения ФГБУ «Гидрометцентр России» А.Ю. Недачиной [5].

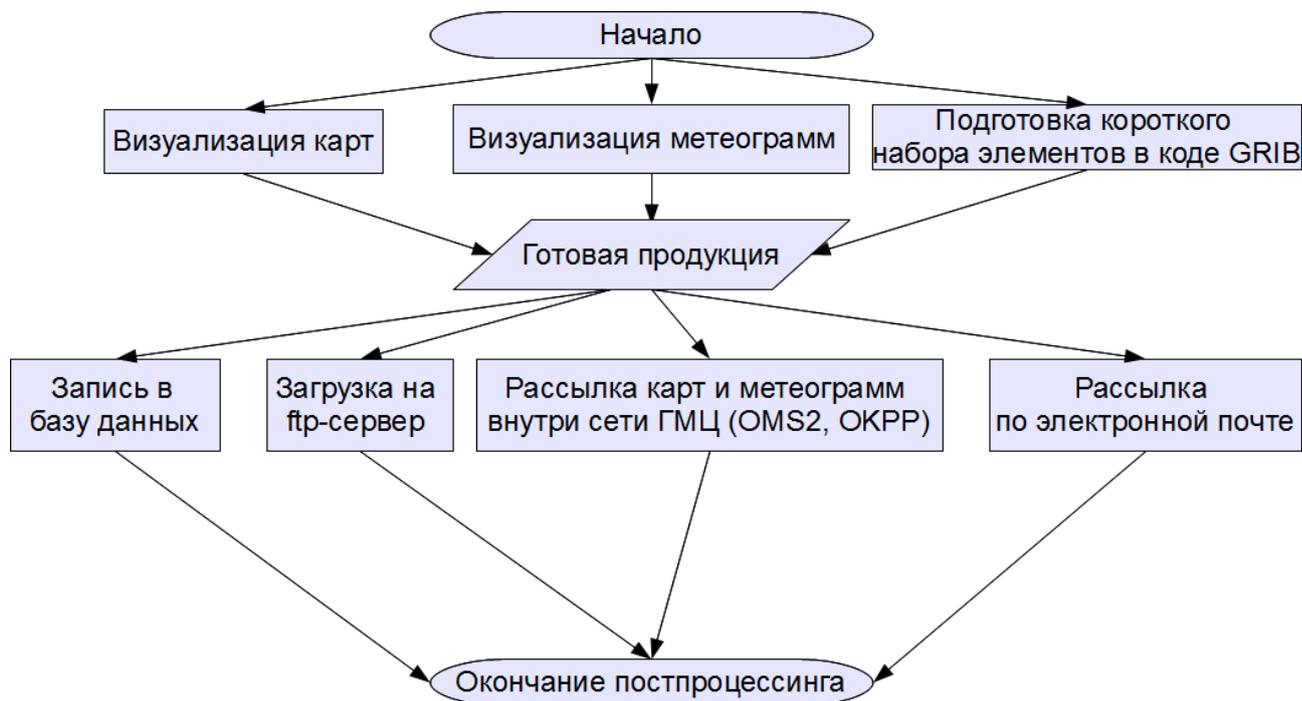


Рисунок. Схема постпроцессинга системы COSMO-RU.

Как принято в консорциуме COSMO, для постпроцессинга в системе COSMO-RU использованы утилиты fieldextra [8], wgrib [7] и grads [6]. Соответствующие инструменты приведены в табл. 1. Отметим, что эта работа постпроцессинга по

визуализации и рассылке результатов прогноза по системе COSMO-RU не превышает 20 минут, так как все блоки постпроцессинга работают в параллельном режиме.

Таблица 1

Инструменты, использованные для постпроцессинга

SGI ALTIX 4700 (GNU/Linux)	Локальные компьютеры в ГМЦ (Windows)
Linux-shell, стандартные программы unix	Robotask lite
Ifort	командная строка
grads	psftp.exe
wgrib	blat.exe

Визуализация прогностических метеоэлементов

Как уже отмечалось выше, значения метеорологических элементов во время работы системы прогноза погоды COSMO-RU записываются в специальные файлы в виде множества полей для заданного времени прогноза в международном коде GRIB или в виде таблицы в коде ASCII. Основные результаты счёта по модели записываются в коде GRIB в основном с периодичностью 3 часа, начиная с момента прогноза (некоторые поля с периодичностью 1 час). Данные представляются как на уровнях модели (40 уровней для версий модели с шагами сетки 7 и 14 км и 50 уровней для версии с шагом сетки 2,2 км), так и на задаваемых по просьбе пользователей стандартных изобарических и изометрических поверхностях.

Выше было указано, что для визуализации была выбрана система анализа и визуализации сеточных функций GrADS [8]. Следует отметить, что начиная с версии 2.0, в системе GrADS поддерживаются сдвинутые сферические координаты, используемые в модели COSMO-RU.

Система GrADS разработана Брайаном Доти (США) в Центре исследований атмосферы-суши-океана (The Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA), штат Мериленд, США) и развивается под эгидой Института Глобальной окружающей среды и

общества (Institute of Global Environment and Society). Система GrADS локализована только под английский язык. Ее положительным свойством является открытость исходных кодов, развитая документация и большие возможности по расширению и необходимой пользователю модернизации.

Одной из важных модернизаций, необходимых для применения системы GrADS в России для подготовки оперативных погодных карт, является оформление на русском языке всех пояснений на карте. В стандартной поставке системы имеется 5 латинских шрифтов. Используя приведенные в документации правила создания шрифтов, в ноябре-декабре 2009 года для решения этой важной проблемы Д.В. Блинов подготовил кириллический шрифт типа Arial.

В настоящее время разработаны специальные модули для подготовки следующих метеорологических карт (этот список постоянно изменяется в связи с предложениями УГМС и другими пользователями), в частности:

1. давление на уровне моря, облачность среднего яруса, осадки (территория COSMO-RU, Центральный Федеральный округ (ЦФО), Сочи-2014, Урало-Сибирский регион);
2. давление на уровне моря, температура воздуха на высоте 2 м (территория COSMO-RU, ЦФО, Сочи-2014, Сибирь);
3. приземный и максимальный ветер на высоте 10 м (территория COSMO-RU, ЦФО, Сочи-2014, Сибирь);
4. геопотенциал и линии тока на высотах 300, 500, 700 гПа (территория COSMO-RU);
5. порывы, направление и скорость ветра на высоте 10 м (Баренцево, Белое, Каспийское и Чёрное моря).

Для того, чтобы можно было быстро просматривать изменение по времени метеорологических значений в заданных узлах сетки, система COSMO-RU подготавливает прогноз в виде текстовых метеограмм. Эти метеограммы содержат данные за весь период прогноза с периодичностью 1 час (см. табл. 2). Период прогноза равен 78 час по данным за сроки наблюдений 00 и 12 ч ВСВ и 48 час – для 06 и 12 ч ВСВ для версий с шагом сетки 7 и 14 км. Для версии с шагом сетки 2,2 км период прогноза равен 24 час, результат выдаётся в кодировке ASCII, поэтому для этой версии любой пользователь может просмотреть результаты численных экспериментов, используя обычный текстовый редактор.

В таком виде метеограммы доступны для анализа пользователям, но для того, чтобы синоптик мог анализировать, необходимо было изобразить табличные данные в графическом (более наглядном) виде. Система GrADS считывает данные или в бинарном, или в

специальном виде, но не считывает текстовые данные. Поэтому для визуализации метеограмм требуется предварительный перевод текстовых данных в бинарный вид. Для этого во время работы по визуализации на языке Fortran90 была подготовлена программа convert2bin.exe, которая предварительно переводит тестовые данные метеограмм в бинарный файл, который затем уже может быть прочтён системой GrADS.

Для представления метеограмм в графическом виде для GrADS летом 2009 года был разработан специальный сценарий (скрипт, состоящий из набора внутренних команд операционной системы LINUX).

Таблица 2

Список переменных, приводимых в метеограмме

Переменная	Уровни	Единицы измерения
Температура воздуха	Поверхность Земли, 2 м, 30 м, 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа	°С
Точка росы	2 м	°С
Скорость и направление ветра	10 м, 500 м, 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа	м/с, азимут
Облачность	Верхний, средний и нижний ярусы	балл
Туман	Уровень земли	балл
Высота конвективной облачности	Верхняя и нижняя граница	м
Давление	Уровень моря	гПа
Твёрдые и жидкие осадки	Поверхность земли	мм
Водный эквивалент снега	Поверхность земли	м

Подготовка сокращённых наборов метеоэлементов для пользователей

Итоговые файлы прогноза содержат большое количество метеоэлементов и, соответственно, занимают много дискового пространства (один прогноз на 78 часов для территории COSMO-RU занимает примерно 16 Гб). Конкретному пользователю не всегда нужно столь большое количество информации, поэтому был написан скрипт "eject_fields.sh", который согласно задаваемому специальному списку подготавливал для каждого пользователя необходимые только для него файлы в коде GRIB. Работа этого скрипта основана на работе утилиты wgrib, которая предоставляет возможность для извлечения необходимых записей из большого файла. Пользователями такой продукции, например, являются: ФГБУ «Научно-производственное объединение Росгидромета «Тайфун» (г. Обнинск), Автономная некоммерческая организация (АНО) «Гидрометеорологическое бюро Москвы и Московской области» и Северо-Западное УГМС (г. Санкт-Петербург).

Рассылка данных по FTP протоколу

После того, как подготовлена вся прогностическая продукция, необходимо доставить эту информацию пользователям. В настоящее время рассылка осуществляется тремя различными способами: по протоколу FTP, внутри сети ФБГУ «Гидрометцентр России» и по электронной почте.

Для рассылки по ftp-протоколу на языке оболочки bash был разработан скрипт ftp_upload.sh, который рассылает пользователям необходимую продукцию на специально выделенный сервер FTPCLNT5.

Рассылка внутри сети Гидрометцентра России

Непосредственными пользователями такой продукции в Гидрометцентре России являются оперативные отделы. Специально для них была подготовлена система, которая оперативно доставляет на компьютеры отделов согласованные с сотрудниками этих отделов карты и метеограммы. Для этого был подготовлен скрипт download_CMforecast.bat, который запускается планировщиком задач. В качестве планировщика задач на персональном компьютере использовались штатный планировщик операционной системы Windows и пакет RoboTask Lite. Для считывания файлов с дисковой системы суперкомпьютера применяется утилита psftp.exe.

Рассылка карт и метеограмм по электронной почте

Необходимость пересылки карт и метеограмм пользователям обусловлена тем, что после счёта модели информация остаётся на вычислителе SGI ALTIX 4700, к которому обычный пользователь не имеет доступа, не говоря уже о наборе навыков и программного обеспечения, необходимого для удалённой работы с суперкомпьютером.

В марте 2010 года была подготовлена специальная база данных, в которой хранятся прогнозы в течение 10 дней. Но и она не решает всех проблем, поскольку, во-первых, она доступна только из сети Гидрометцентра России, во-вторых, она требует специального программного обеспечения, и, наконец, в-третьих, она содержит только стандартный набор метеорологических параметров.

По этой причине было решено рассылать карты и метеограммы пользователям по электронной почте. Кроме того, данный вид передачи обусловлен следующими полезными свойствами:

- доступность – электронный ящик, находящийся на популярных доменах, доступен из любого места, где имеется Интернет;

- простота – электронной почтой в нынешнее время умеет пользоваться большая масса людей, к тому же необязательно устанавливать какое-то специальное программное обеспечение, так как в любой современной операционной системе есть удобные и простые средства для работы с электронной почтой.

До 13 апреля 2011 года в качестве сервера, рассылающего почту, использовался локальный компьютер под управлением Windows. На этот сервер были установлены и настроены 2 приложения:

1. blat.exe - консольная программа под Windows для массовой рассылки писем. Вся работа с ней производится в режиме набора команд, что подразумевает возможность использования скриптов.

2. Robo Task Lite – система для автоматизации действий операционных систем Windows (в Linux все действия автоматизируются через командную оболочку). В нашем случае потребовалось автоматизировать запуск скачивания прогностической продукции два раза в сутки и подготовку архивов для пересылки данных и запуск программы blat.exe, отвечающей за итоговую рассылку писем.

После 13 апреля 2011 г. письма стали формироваться на суперкомпьютере с помощью утилиты mail.

Заключение

В статье изложены технологические аспекты работы постпроцессинга по организации эффективных визуализации (только для одного срока 00 или 12 ч ВСВ подготавливается более 600 метеорологических карт и 400 метеограмм) и доставки пользователям прогнозов, рассчитанных с помощью системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы» по составной части темы «МЕГАПОЛИС – интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

Список использованных источников

1. *Алферов Ю.В.* Автоматизированная графическая система для визуализации результатов численных прогнозов // Труды Гидрометцентра России. – 2003. – Вып. 338. – С. 119–124.
2. *Анцыпович В.А., Лубов С.В.* Модернизация центров обработки оперативной гидрометеорологической информации Росгидромета // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С.
3. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 1. – С. 5–17.
4. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.
5. *Недачина А.Ю.* Удаленный доступ к базам данных суперЭВМ CRAY Y-MP8E с рабочих станций и ПЭВМ локальной сети // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 334. – С. 148–153.
6. *Сайты* системы визуализации GrADS: www.grads.iges.org/grads, www.opengrads.org
7. *Сайт* утилиты wgrib для работы с данными, записанными в формате GRIB: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2>
8. *Сайт* консорциума COSMO: www.cosmo-model.org

Поступила в редакцию 10.10.2011 г.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОЛИНИЙ ПО НЕРЕГУЛЯРНОЙ СЕТИ ТОЧЕК В РАМКАХ ГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ISOGRAPH

В.В. Копейкин, Ю.В. Алферов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
help@tushino.com, alferov@mecom.ru*

Метеорологам при работе над краткосрочным прогнозом погоды необходимо оценивать складывающуюся синоптическую ситуацию. Помощь в этом оказывают карты текущей погоды. Такие карты, собственно, могли бы расчерчиваться по данным объективного анализа. Однако в процедуре объективного анализа имеется ряд задержек, связанных со сбором всех или, по крайней мере, большей части поступающих в реальном времени данных до некоторого срока отсечения, обычно два-три часа после срока наблюдения, их декодированием, выполнением процедур интерполяции разнородных, часто довольно сложных в интерпретации данных и т.п. Однако метеорологам важно иметь экспресс-анализ данных наблюдений как можно раньше, пусть даже не все данные еще поступили. Эта потребность обуславливает необходимость разработки программы для расчета изолиний по данным, расположенным в нерегулярной сети точек.

Эту задачу можно решать двумя способами. Во-первых, можно провести интерполяцию в узлы некоторой регулярной сетки и затем расчертить карты по полученным данным. А во-вторых, можно, как это принято в геодезии, построить триангуляцию, то есть планарный граф, все внутренние области которого являются треугольниками, и рассчитать изолинии по полученной триангуляции. Для реализации в графической системе Isograph [1] был избран второй способ.

Задача построения триангуляции по исходному набору точек является неоднозначной. Существует множество видов триангуляций и методов их построения. Наиболее приемлемой для задач картографии считается триангуляция Делоне [4].

Напомним несколько определений [4]. Триангуляция удовлетворяет условию Делоне, если внутри окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не попадает ни одна из заданных точек триангуляции. Триангуляция называется выпуклой, если минимальный многоугольник, охватывающий все её треугольники, является выпуклым. Такой многоугольник называется выпуклой оболочкой данной триангуляции. Триангуляция называется триангуляцией Делоне, если она является выпуклой и удовлетворяет условию Делоне.

При построении триангуляции Делоне важнейшей операцией является проверка выполнения условия Делоне для пар треугольников. Условие Делоне заключается в том, что внутри окружности, описанной вокруг некоторого треугольника, не должна попасть ни одна точка исходного набора. Если такая точка обнаружена, то она обязательно является вершиной смежного треугольника. В этом случае производится операция перестроения двух рассматриваемых треугольников, после чего треугольники уже удовлетворяют условию Делоне. Операция перестроения заключается в смене диагонали четырехугольника, состоящего из этих двух рассматриваемых смежных треугольников.

Проверка условия Делоне для пары треугольников заключается, собственно, в проверке, не попадает ли вершина смежного треугольника в окружность, описанную вокруг данного треугольника. Пусть P_1, P_2, P_3 – вершины треугольника, вокруг которого описывается окружность; P_0 – вершина смежного треугольника, подлежащая проверке; $x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i}$ – координаты точки P_i . Тогда

$$k = x_{P_1}^2 + y_{P_1}^2,$$

$$m = x_{P_2}^2 + y_{P_2}^2,$$

$$n = x_{P_3}^2 + y_{P_3}^2,$$

$$a = x_{P_1} \cdot (y_{P_2} - y_{P_3}) + x_{P_2} \cdot (y_{P_3} - y_{P_1}) + x_{P_3} \cdot (y_{P_1} - y_{P_2}),$$

$$b = k \cdot (y_{P_2} - y_{P_3}) + m \cdot (y_{P_3} - y_{P_1}) + n \cdot (y_{P_1} - y_{P_2}),$$

$$c = k \cdot (x_{P_2} - x_{P_3}) + m \cdot (x_{P_3} - x_{P_1}) + n \cdot (x_{P_1} - x_{P_2}),$$

$$d = k \cdot (x_{P_2} \cdot y_{P_3} - x_{P_3} \cdot y_{P_2}) + m \cdot (x_{P_3} \cdot y_{P_1} - x_{P_1} \cdot y_{P_3}) + n \cdot (x_{P_1} \cdot y_{P_2} - x_{P_2} \cdot y_{P_1}).$$

Условие Делоне не выполняется при выполнении соотношения

$$a \cdot (x_{P_0}^2 + y_{P_0}^2) - b \cdot x_{P_0} + c \cdot y_{P_0} < d,$$

и требуется перестроение двух рассматриваемых треугольников.

Говорят, что треугольник триангуляции удовлетворяет условию Делоне, если этому условию удовлетворяет триангуляция, составленная только из этого треугольника и трех его соседей (если они существуют, т.е. рассматриваемый треугольник не примыкает к границе области) [4].

Следовательно, проверив рассматриваемый треугольник на выполнение условия Делоне по отношению к трем смежным треугольникам, и, при необходимости, проведя перестроения, мы можем утверждать, что треугольник удовлетворяет условию Делоне.

Таким образом, важнейшим свойством триангуляции Делоне является то, что она может быть получена из любой другой выпуклой триангуляции последовательным перестроением пар соседних треугольников, не удовлетворяющих условию Делоне.

Алгоритм построения триангуляции Делоне

Существует несколько способов построения триангуляции Делоне. Все они сводятся к последовательному добавлению точек в частично построенную триангуляцию Делоне и проверке условия Делоне для вновь образовавшихся треугольников. В случае невыполнения этого условия производятся необходимые перестроения до тех пор, пока триангуляция снова не будет полностью удовлетворять условию Делоне [4].

Изначально триангуляция строится на минимальном наборе точек. При добавлении каждой новой точки определяется её местоположение в триангуляции (локализация), и происходит построение новых треугольников. При этом возможны две ситуации: добавляемая точка попадает внутрь или вне триангуляции. В первом случае делению на несколько новых треугольников подлежит треугольник, внутри которого оказалась добавляемая точка. Во втором случае необходимо построение дополнительных, внешних к текущей триангуляции, треугольников, причем их количество заранее не определено, а процедура построения довольно сложна. Для упрощения алгоритма добавления новой точки в триангуляцию необходимо гарантировать, что все точки, добавляемые в триангуляцию, будут расположены внутри неё. Для этого в качестве первоначального набора точек необходимо взять только точки, принадлежащие выпуклой оболочке исходного множества точек, и построить на этом наборе триангуляцию Делоне. После добавления каждой новой точки производится проверка условия Делоне для всех вновь образованных пар треугольников. Если для какой-либо пары условие не выполняется, происходит перестроение этой пары.

Рассмотрим построение триангуляции более подробно.

Исходные данные заданы в виде списка точек (узлов будущей триангуляции). Каждая точка представляет собой набор трех значений: координат точки на плоскости и некоторого значения в этой точке (далее именуемого высотой).

Подготовительный этап: построение выпуклой оболочки

На первом этапе построения определяется точка, явно принадлежащая выпуклой оболочке. Она должна иметь максимальное значение по оси ординат. Если таких точек несколько, то из их числа выбирается та, которая имеет минимальное значение по оси абсцисс (рис. 1, точка 1). Найденная точка добавляется в выпуклую оболочку.

Далее происходит процесс, именуемый «заворачиванием». Сравниваются углы между базовым вектором, соединяющим предпоследнюю и последнюю точки выпуклой оболочки,

и всеми возможными векторами, соединяющими последнюю точку выпуклой оболочки со всеми существующими точками (рис. 1а). Надо заметить, что на первом шаге выпуклая оболочка содержит только одну точку, поэтому в качестве базового вектора берется горизонтальный вектор произвольной длины, направленный влево и приходящий в точку 1. Та точка, при рассмотрении которой угол между векторами оказался минимален, и будет следующей точкой выпуклой оболочки. Процесс повторяется до тех пор, пока вновь найденная точка не будет являться первой точкой выпуклой оболочки (рис. 1б). Все точки, не попавшие в состав выпуклой оболочки, будут внутренними для этой оболочки.

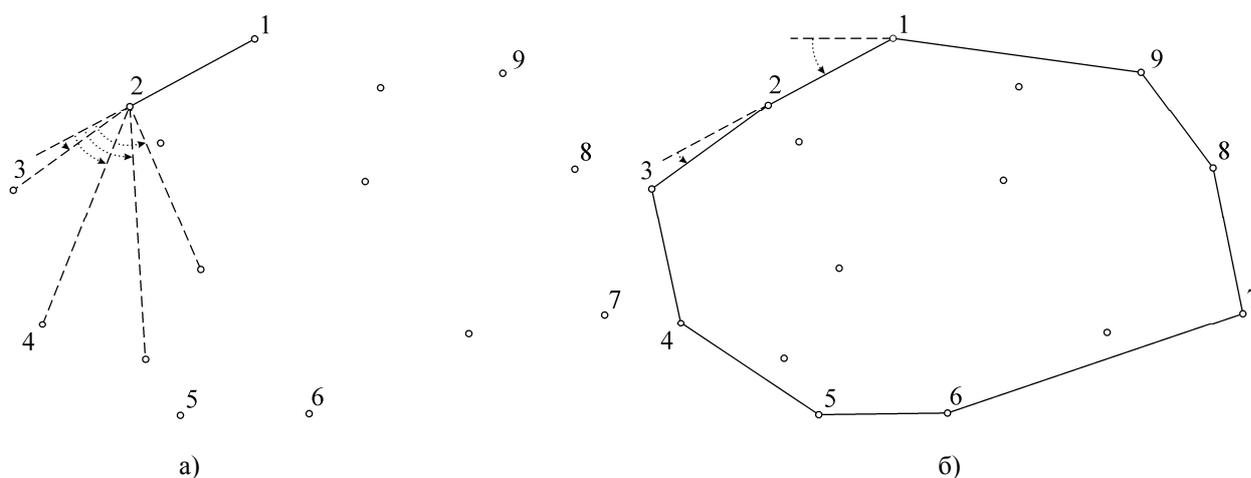


Рис. 1. Построение выпуклой оболочки.

Построение триангуляции Делоне

Начальная триангуляция Делоне строится на основе только тех точек, которые принадлежат выпуклой оболочке. Создаются треугольники, одной из вершин которых является первая точка выпуклой оболочки, а двумя остальными – все возможные пары соседних точек выпуклой оболочки. Далее выполняется проверка выполнения условия Делоне для всех пар треугольников. Пары треугольников, не удовлетворяющие условию, перестраиваются.

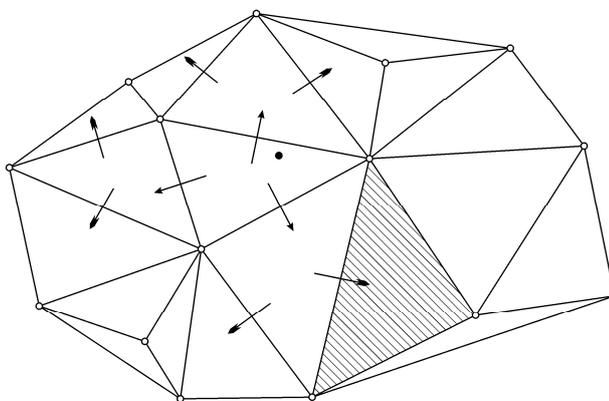
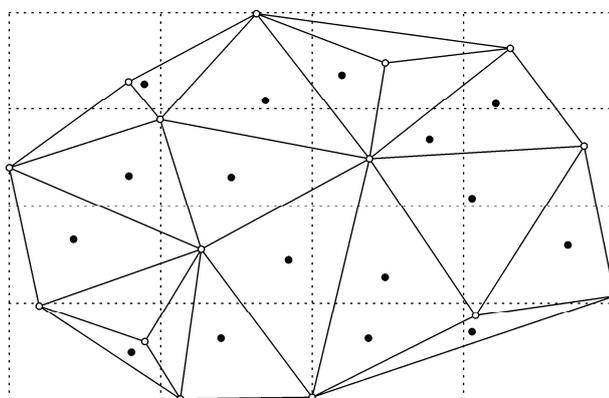
После того, как первоначальная триангуляция построена, производится последовательное добавление точек, еще не включенных в триангуляцию. Каждая новая точка локализуется, и происходит добавление новых треугольников. После чего выполняется процесс проверки условия Делоне для всех вновь образованных пар треугольников и делаются необходимые перестроения.

Следует заметить, что самым трудоемким шагом этого этапа является локализация точки. Нелинейность зависимости времени локализации точки от количества точек, уже включенных в триангуляцию при последовательном переборе треугольников, очень сильно

выражена. Для сокращения времени перебора применяется метод динамического кэширования поиска.

Строится кэш – специальная структура, позволяющая за короткое время найти некоторый треугольник, близкий к искомому. Кэш представляет собой сетку (рис. 2а), в каждой ячейке которой находится ссылка на некоторый треугольник триангуляции. Ссылка ячейки обновляется в момент добавления нового или при перестроении уже существующего треугольника, центр масс которого расположен в пределах этой ячейки. В результате перестроений на какие-то треугольники могут ссылаться несколько ячеек, а на другие может не быть ни одной ссылки.

Далее в окрестности найденного треугольника производится поиск искомого треугольника (рис. 2б). Алгоритм поиска выглядит следующим образом. Проверке подлежат треугольники, смежные треугольнику, найденному при помощи кэша. Если среди них нет искомого треугольника, в очередь поиска добавляются треугольники, смежные с только что проверенными треугольниками, за исключением тех, по ссылке с которых мы перешли на данные треугольники. Процесс продолжается до тех пор, пока искомым треугольником не будет обнаружен.



а)

б)

Рис. 2. Локализация точки: а) кэш. Черная точка обозначает ссылку ячейки кэша на треугольник, с которого начинается локализация точки, б) процесс локализации.

Закрашенный треугольник – искомый.

Для увеличения скорости работы кэша используется метод динамического кэширования. Суть этого метода заключается в создании кэша динамически изменяемого размера. Размер кэша зависит от количества точек триангуляции. При добавлении в триангуляцию новых точек, при достижении некоторого их порогового количества, разбиение кэша увеличивается в два раза по обеим осям координат. При этом информация из старого кэша переписывается в новый. Для большинства случайных распределений этот алгоритм работает значительно быстрее многих других алгоритмов [4].

В качестве начального размера кэша берем сетку $m \times m$, где m кратно 2, причем m – максимальное возможное число, меньшее, чем $2 \cdot \sqrt{\frac{n}{R}}$, где n – количество точек, заносимых в кэш первоначально, $R = 3$ – константа, задающая скорость роста кэша. Её оптимальное значение определяется опытным путем.

Так же определяется очередное пороговое значение, при достижении которого произойдет увеличение кэша: $R \cdot m^2$

В большинстве случаев рассматриваемая точка локализуется довольно быстро. Алгоритм динамического кэширования обеспечивает теоретически минимальное время работы, порядка $O(N \cdot \log N)$, где N – количество точек сетки. Но, в случае неудачного задания параметров кэша, возможна ситуация, когда поиск указанным методом окажется неэффективен. Это может произойти, если искомый треугольник будет расположен довольно далеко от треугольника, на который ссылается кэш. Поиск при динамическом кэшировании устроен так, что каждая новая итерация поиска задействует в два раза больше направлений, чем предыдущая. Причем, чем больше прошло итераций, тем больше происходит проверок треугольников, проверенных ранее. Для того, чтобы избежать такого эффекта, следует ввести ограничение на количество итераций. При достижении заданного предельного значения количества итераций перейти к поиску треугольника последовательным перебором. В целом задачу построения триангуляции удалось решить достаточно эффективно (рис. 3).

Зависимость времени обработки от количества точек

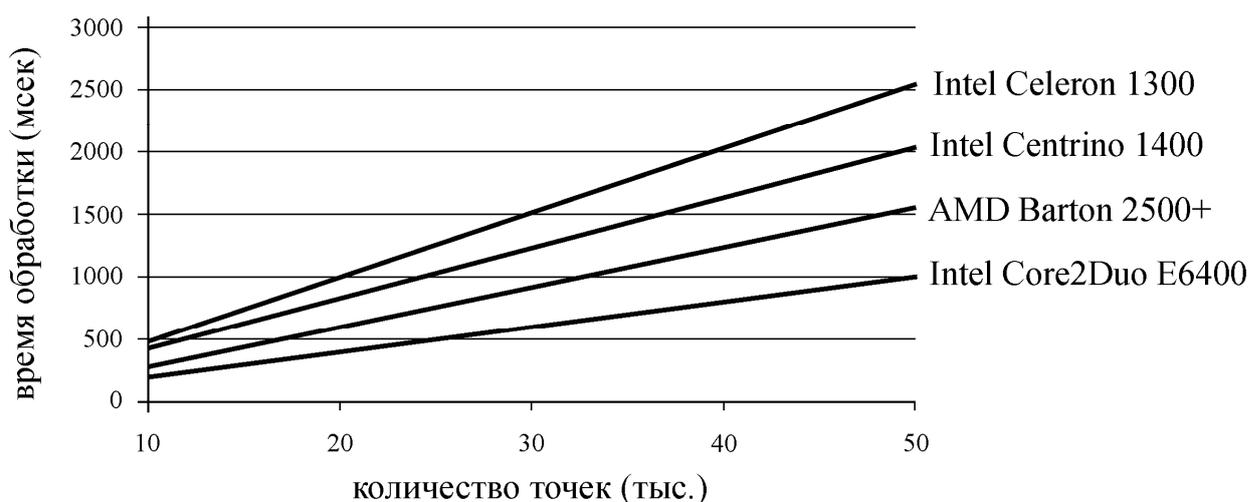


Рис. 3. Затраты времени на построение триангуляции Делоне на разных компьютерах.

Повышение детализации

Часто детализации триангуляции, построенной на исходных данных, не достаточно для полноценного построения изолиний. Необходимо искусственное повышение детализации путем более мелкого разбиения треугольников. Степень детализации зависит от заданного параметра разбиения ε , т.е. разбиению подлежат все стороны треугольников, длина которых больше этого параметра.

Для уменьшения количества искажений процесс разбиения проводится в несколько этапов. В качестве начального параметра разбиения берется значение, равное половине длины самого длинного ребра триангуляции. На каждом новом этапе текущий параметр разбиения уменьшается вдвое до тех пор, пока не станет равным параметру разбиения ε .

Разбиение заканчивается, когда после очередного этапа не осталось ни одного ребра, подлежащего разбиению.

При разбиении ребра триангуляции происходит добавления нового узла. Возникает задача определения его высоты. Простая линейная интерполяция по высотам смежных узлов практически не имеет смысла, поэтому используется метод кубической интерполяции [3].

Для начала необходимо найти векторы нормалей $N1$ и $N2$ к искомой поверхности в узлах 1 и 2 соответственно (рис. 4). Под вектором нормали в узле будем понимать среднее значение нормалей всех смежных с узлом треугольников с учетом их веса. В качестве веса треугольника будем использовать величину $\frac{2 \cdot S}{a} \cdot \ln \frac{p}{p-a}$, где S – площадь треугольника;

p – его полупериметр; a – длина стороны, противоположающей рассматриваемому узлу.

Опытным путем получено, что такой вес позволяет адекватно учесть конфигурацию треугольника.

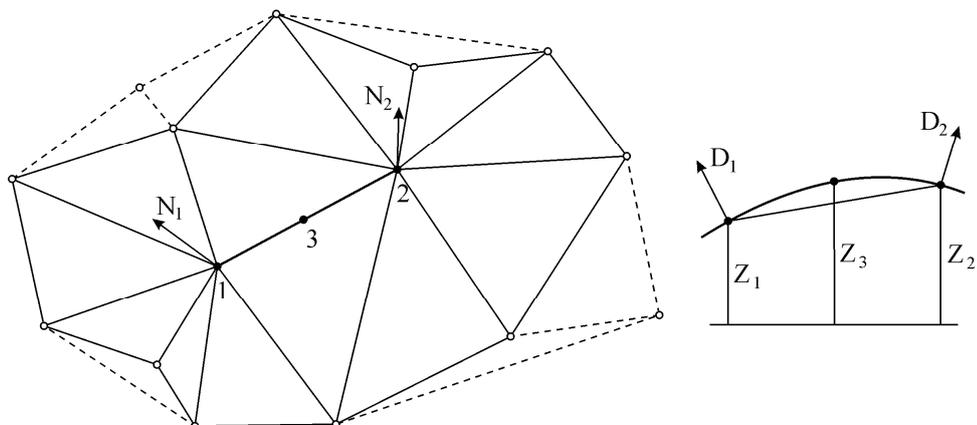


Рис. 4. Вычисление высоты в добавляемом узле триангуляции (точка 3).

Слева – вид сверху, справа – вертикальный разрез.

Обозначим: P_1 , P_2 – точки 1 и 2 соответственно, а отрезок, соединяющий точки P_1 и P_2 – отрезок 1-2.

Находим N_{12} – нормаль к вертикальной плоскости, в которой лежит отрезок 1-2, соединяющий точки 1 и 2:

$$x_{N_{12}} = y_{P_2} - y_{P_1},$$

$$y_{N_{12}} = -x_{P_2} - x_{P_1},$$

$$z_{N_{12}} = 0.$$

Находим D_1 и D_2 – проекции векторов N_1 и N_2 на вертикальную плоскость, проходящую через отрезок 1-2 (рис. 4). Для этого вычислим векторное произведение:

$$D_1 = N_1 \times N_{12},$$

$$D_2 = N_2 \times N_{12},$$

Определяем длину проекции отрезка 1-2 на горизонтальную плоскость:

$$l = \sqrt{(x_{P_2} - x_{P_1})^2 + (y_{P_2} - y_{P_1})^2}.$$

Определяем производные на концах отрезка 1-2 :

$$z_{P_1}' = \frac{z_{D_1}}{\sqrt{x_{D_1}^2 + y_{D_1}^2}},$$

$$z_{P_2}' = \frac{z_{D_2}}{\sqrt{x_{D_2}^2 + y_{D_2}^2}}.$$

Значение кубического сплайна в центре отрезка 1-2 задается формулой [2, 3]:

$$z_{P3} = \frac{(z_{P1}' + z_{P2}') \cdot l - 2 \cdot z_{P2} - z_{P1}}{8} + \frac{3 \cdot (z_{P2} - z_{P1}) - (2 \cdot z_{P1}' + z_{P2}') \cdot l}{4} + \frac{z_{P1}' \cdot l}{2} + z_{P1},$$

где z_{P3} – искомая высота в центре отрезка 1-2.

На краях триангуляции возможно существование сильно вытянутых треугольников. Вызвано это тем, что при построении выпуклой оболочки расстояние между ближайшими точками этой оболочки может значительно превосходить среднюю длину дуг триангуляции. Такие треугольники не всегда корректно описывают поверхность, заданную исходными данными, тем самым, при участии в математических расчетах, искажая общую картину. Для устранения этого эффекта необходимо отслеживать такие треугольники и исключать их из расчетов.

Одним из способов выявления таких треугольников является проверка косинусов его углов. Если косинус хотя бы одного угла проверяемого треугольника больше заданного значения (например 0,99), треугольник считается некорректным и исключается.

Процесс повышения детализации для исходной триангуляции показан на рис. 5. Для большей наглядности на рисунке показаны также изолинии, которые можно рассчитать при соответствующем уровне детализации.

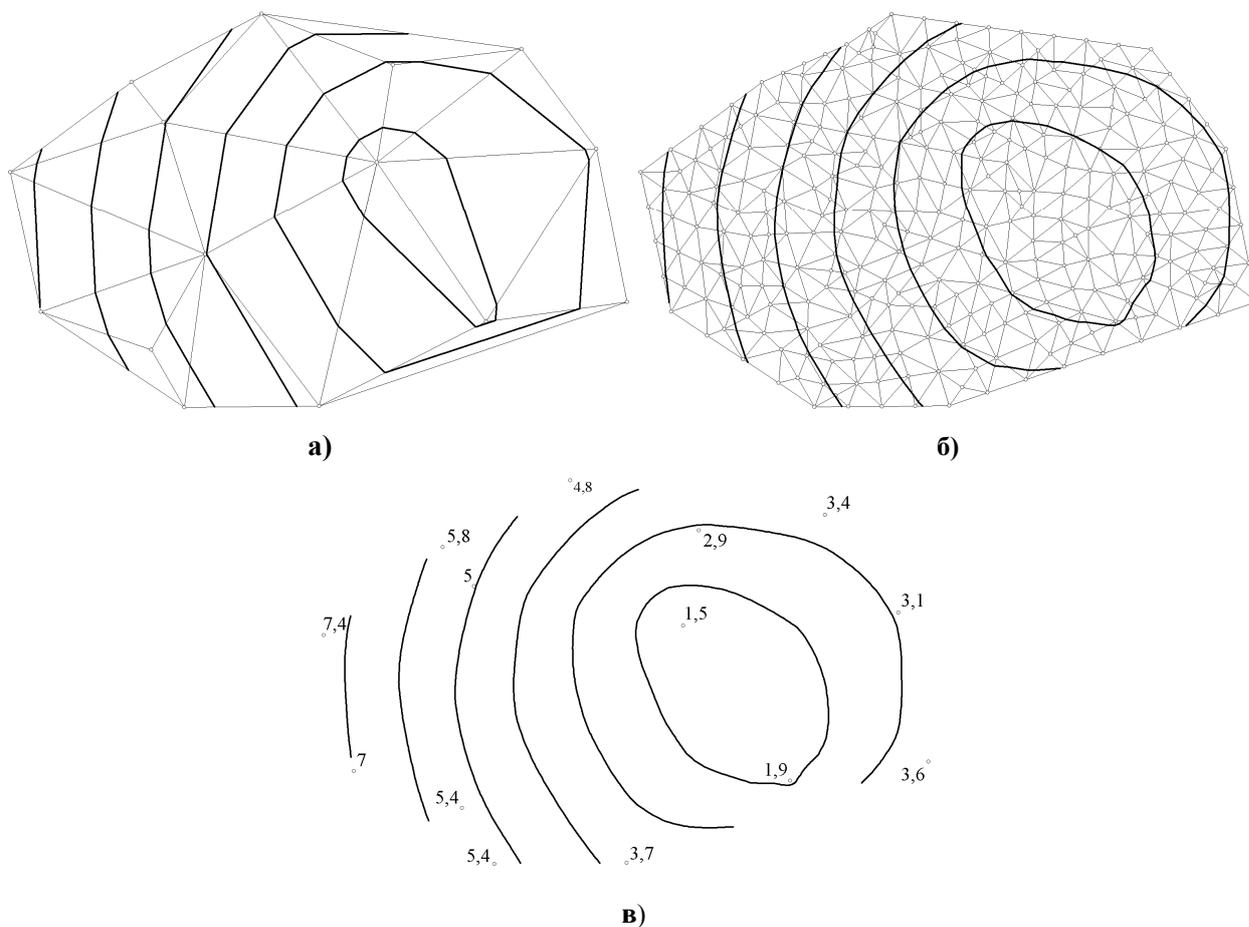


Рис. 5. Повышение детализации исходной триангуляции Делоне:

- а) триангуляция по исходным точкам, б) один из промежуточных этапов,
в) изолинии при окончательном уровне детализации.

Построение изолиний

Алгоритм построения изолинии следующий:

- 1) Выбираем определенное значение изолинии h .
 - 2) Проводим проверку, присутствует ли в триангуляции хотя бы один узел, у которого значение высоты совпадает со значением изолинии h . В случае существования такого узла, значение изолинии уменьшается на некоторое маленькое значение dh и п. 2 повторяется.
 - 3) Все треугольники, через которые проходит изолиния со значением h , помечаются.
 - 4) Происходит поиск первого отмеченного треугольника. Заводится массив для хранения узлов изолинии.
 - 5) Отслеживается путь изолинии в обе стороны от текущего треугольника. Найденные узлы добавляются в массив. Процесс идет до тех пор, пока изолиния не замкнется или не выйдет на границу триангуляции. Со всех треугольников, участвующих в обходе, отметка снимается.
 - 6) Пункты 4 и 5 повторяются до тех пор, пока не закончатся помеченные треугольники.
- На рис. 6 приведен пример карты с изолиниями, рассчитанными по описанному алгоритму, и наноской наблюдений соответствующего метеоэлемента.

Построение изоконтуров

Изоконтуром между уровнями высот h_1 и h_2 называют замыкание геометрического места точек на поверхности, имеющих высоту $h \in [h_1, h_2)$ [4]. Изоконтуры строятся на основе изолиний. Замкнутые изолинии уже являются изоконтурами, и сразу добавляются в список изоконтуров.

Формируется граф, в качестве узлов которого выступают точки выхода незамкнутых изолиний на границу триангуляции, а в качестве ребер – сами незамкнутые изолинии (ребра первого типа) и кусочки граничной оболочки (ребра второго типа), на которые граничная оболочка была разделена точками выхода. Причем каждая незамкнутая изолиния входит в граф два раза – в виде двух одинаковых ребер, но ориентированных в разные стороны. А ребра, полученные из кусочков граничной оболочки, ориентируется так, чтобы внутренность триангуляции находилась справа по ходу движения при обходе триангуляции по граничной оболочке. В результате в каждом узле графа сходятся два ребра первого типа и два ребра второго типа.

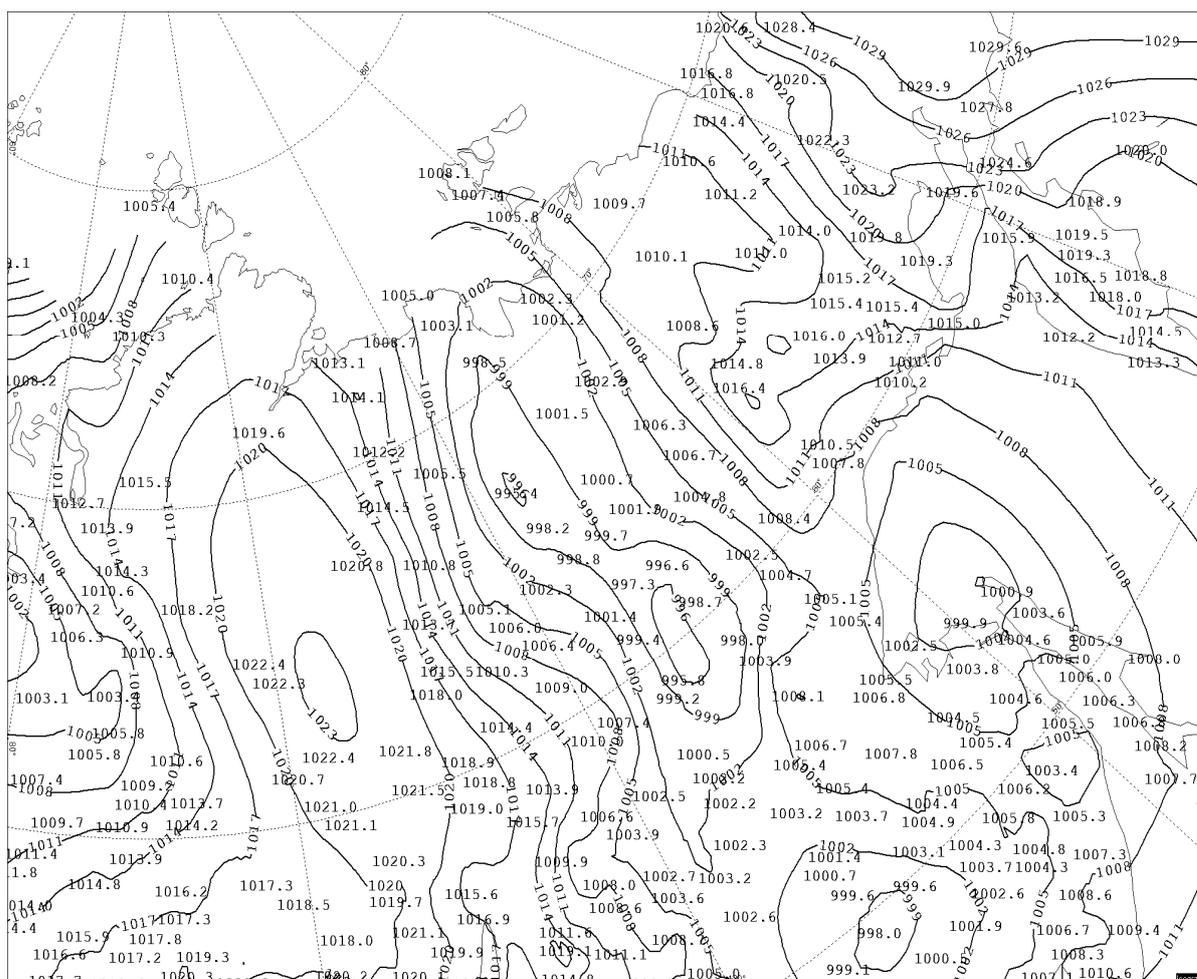


Рис. 6. Пример расчета изолиний по наблюдениям на нерегулярной сети наземных метеостанций. Приземное давление 12 апреля 2011 г. При нанеске данные прорезаны.

Сборка каждого очередного изоконтура начинается из любого узла, имеющего ребра, и заключается в последовательном обходе ребер графа с учетом их ориентации, и с обязательным чередованием типа ребер. При попадании в узел графа, с которого начинался обход, изоконтур считается собранным, а ребра, использованные в обходе, удаляются из дальнейшего рассмотрения.

Для каждого собранного контура определяется, какому диапазону высот он принадлежит. Для этого используем любое ребро триангуляции, принадлежащие выпуклой оболочке и использованное для построения рассматриваемого изоконтура.

Для того чтобы при графическом отображении набора изоконтуров все они были видны, вначале необходимо рисовать изоконтур, полученные из незамкнутых изолиний. Остальные изоконтур перед рисованием следует подвергнуть сортировке по их площади в направлении убывания.

Площадь изоконтур может быть вычислена по формуле $S = 0.5 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot (y_{i-1} - y_{i+1})$ с учетом знака получающихся разностей. Здесь S – вычисляемая площадь изоконтур; n – количество точек, задающих изоконтур; x_i – абсцисса i -ой точки; y_i – ордината i -ой точки.

Таким образом, в системе визуализации гидрометеорологических данных Isograph реализован алгоритм расчета изолиний и изоконтуров по данным в нерегулярной сети точек.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.» по составной части темы «МЕГАПОЛИС – интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

Список использованных источников

1. *Алферов Ю.В.* Автоматизированная графическая система для визуализации результатов численных прогнозов. // Труды Гидрометцентра России. – 2003. – Вып. 338. – С. 119–124.
2. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.* Алгоритмы: построение и анализ, 2-е издание. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2005. – 1296 с.
3. *Костюк Ю.Л., Фукс А.Л.* Визуально гладкая аппроксимация однозначной поверхности, заданной нерегулярным набором точек // Труды международной научно-практической конференции. Геоинформатика. – 2000. – Томск: Изд-во Томского университета, 2000. С. 41–45.
4. *Скворцов А.В.* Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Томского университета, 2002. – 128 с.

Поступила в редакцию 20.05.2011 г.

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНОГО МАСШТАБА ДЛИНЫ, ОСНОВАННОГО НА МЕТОДЕ СМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦ ВОЗДУХА ПОД ВЛИЯНИЕМ СИЛ ПЛАВУЧЕСТИ, В МОДУЛЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ МОДЕЛИ COSMO-RU ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ

В.Л. Перов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
perov@mecom.ru*

Введение

Для расчета турбулентности ряд современных численных моделей прогноза погоды (включая COSMO-RU) использует схему расчета турбулентности “порядка один и одна вторая” [1, 4]. В этой схеме используется уравнение кинетической энергии турбулентности (E) и турбулентный масштаб длины (путь смещения) l . Вертикальные коэффициенты турбулентного переноса для момента количества движения, тепла и влаги находятся как произведение $l \cdot E^{1/2}$. Это произведение затем умножается на специально подобранные безразмерные функции, величина которых зависит от устойчивости (числа Ричардсона). Для вычисления E решается нестационарное нелинейное уравнение, выведенное для вторых моментов и имеющее ясную физическую интерпретацию его слагаемых, а именно[^] генерация E за счет сдвига ветра, генерация (затухание) за счет сил плавучести, затухание E за счет диффузии и за счет диссипации. Вычисление физически обоснованного турбулентного масштаба длины, являющегося физической характеристикой размера энергонесущих атмосферных турбулентных вихрей, важно для расчета коэффициентов турбулентного переноса. Однако в ряде моделей, в том числе в COSMO-RU, для вычисления l используется простая локальная диагностическая формула, полученная Блэкадаром для нейтральной стратификации над ровной подстилающей поверхностью [3]. Формула дает асимптотику $l \sim kz$ вблизи подстилающей поверхности и $l \sim l_0$ на верхней границе пограничного слоя. Величина l_0 в разных моделях изменяется от 200 до 500 м. Если нижняя асимптотика выполняется достаточно хорошо и подтверждается многочисленными экспериментальными данными, то в верхней части пограничного слоя появляются проблемы. Так, пограничный слой атмосферы в верхней части часто имеет слой инверсии температуры т.е. устойчивый слой, в котором турбулентные вихри должны затухать и,

следовательно, l стремится к своему минимальному значению. Однако формула Блэкадара дает максимальные значения для l в верхней части пограничного слоя и над ним. Кроме того, в формулу для диссипации кинетической энергии турбулентности путь смешения l входит в знаменателе. Получается совершенно нефизическая картина в верхней части пограничного слоя при применении формулы Блэкадара. Следуя формуле, в устойчивом слое l увеличивается, а диссипация падает, увеличивая турбулентную кинетическую энергию E . Хотя, с физической точки зрения, в устойчивом слое должно быть наоборот: l должен уменьшаться, а диссипация увеличиваться, уменьшая величину E . Другой областью, где формула Блэкадара дает нефизические результаты, является конвекция. Во время конвекции нагретые частицы воздуха могут подниматься из пограничного слоя на значительную высоту, при этом высота подъема зависит от E на уровне, с которого начинается подъем и от стратификации на различных уровнях расположенных выше (ниже) исходного уровня, т.е. формула для вычисления l должна быть нелокальной. Однако формула Блэкадара дает только локальную зависимость l от высоты. Приведенные и другие соображения приводят к необходимости рассмотреть другие алгоритмы расчета l в турбулентном блоке модели COSMO-RU [6].

В настоящей работе используется алгоритм вычисления турбулентного масштаба длины, основанный на методе смещения частиц воздуха с уровня z вверх (вниз) под действием силы плавучести и имеющих на этом уровне определенную кинетическую энергию турбулентности E [2]. При таком подходе l зависит не только от стратификации в слое, где находится уровень z , но и от стратификации в других слоях, расположенных выше (ниже) рассматриваемого слоя (нелокальный l). В настоящей работе проводится сравнение расчетов с двумя различными турбулентными масштабами длины, локальным и нелокальным, по 3-х мерной модели COSMO-RU, версия 4.13. По результатам расчетов сделаны выводы о преимуществе нелокального масштаба длины по сравнению с локальным, в частности для конвективных случаев.

Описание алгоритма

В настоящее время во всех версиях модели COSMO-RU для вычисления пути смешения l используется формула Блэкадара [3], основанная на хорошо известном и широко используемом факте, что путь смешения в пограничном слое над горизонтальной твердой поверхностью пропорционален расстоянию от поверхности

$$l(z) = l_0 [kz / (kz + l_0)] . \quad (1)$$

В качестве коэффициента пропорциональности используется константа Кармана ($k = 0,4$). Асимптотическое значение величины пути смешения на верхней границе пограничного слоя l_0 задается постоянным (200 м) для всего времени счета прогноза, хотя можно вычислять l_0 по формуле, которая использует кинетическую энергию турбулентности [5]

$$l_0 = \alpha \int_0^{\infty} (2E)^{1/2} z dz / \int_0^{\infty} (2E)^{1/2} dz \quad (2)$$

где α – константа. Вычисление $l(z)$ по формуле (1) дает хорошие результаты вблизи подстилающей поверхности, однако с удалением от нее возникают проблемы. Так, на верхней границе пограничного слоя, где часто наблюдается температурная инверсия, $l(z)$ должен убывать с высотой, но, согласно (1), $l(z)$ продолжает монотонно расти, показывая локальную зависимость от z . Этот пример показывает, что $l(z)$ в пограничном слое атмосферы является нелокальной функцией z . Отметим, что в варианте 4.13 модели COSMO влияние температурной инверсии на путь смешения вводится через дополнительное слагаемое в интерполяционной формуле для l :

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{kz} + \frac{1}{l_0} + \frac{N}{c E^{1/2}}, \quad (3)$$

где N – слагаемое, описывающее вертикальный градиент температуры; c – константа. Это слагаемое улучшает поведение l в слое инверсии, однако как будет показано ниже, переход от роста пути смешения с высотой к его затуханию в инверсионном слое происходит очень резко, создавая проблемы для аппроксимации некоторых функций по вертикали.

Альтернативой подходу, основанному на формуле Блэкадара, является метод расчета смешения частиц воздуха под действием силы плавучести [2]. Идея метода состоит в том, что группа частиц воздуха, находящихся на уровне z и имеющих при этом турбулентную кинетическую энергию $E(z)$ может максимально подняться (опуститься) до уровня, где их начальная $E(z)$ уравновесится действием сил плавучести. Математически это выражается формулами:

$$\int_0^{z+z_{\text{верх}}} \frac{g}{\theta_v \rho_{\text{атм}}} [\theta_v(z') - \theta_v(z)] dz' = E(z)$$

$$\int_{z-l_{\text{ниж}}}^z \frac{g}{\theta_v \rho_{\text{атм}}} [\theta_v(z) - \theta_v(z')] dz' = E(z)$$

$$z - l_{\text{ниж}} \geq 0, \quad (4)$$

где θ_v – виртуальная потенциальная температура; $\theta_{v \text{ фон}}$ – фоновое значение θ_v ; g – ускорение свободного падения; $l_{\text{вверх}}$ и $l_{\text{вниз}}$ – максимальные расстояния, на которые частицы воздуха, имеющие на уровне z кинетическую энергию турбулентности $E(z)$, поднимаются или опускаются под действием сил плавучести. $l_{\text{вверх}}$ и $l_{\text{вниз}}$ рассматриваются как размеры вихрей в направлении вверх и вниз (рис. 1)

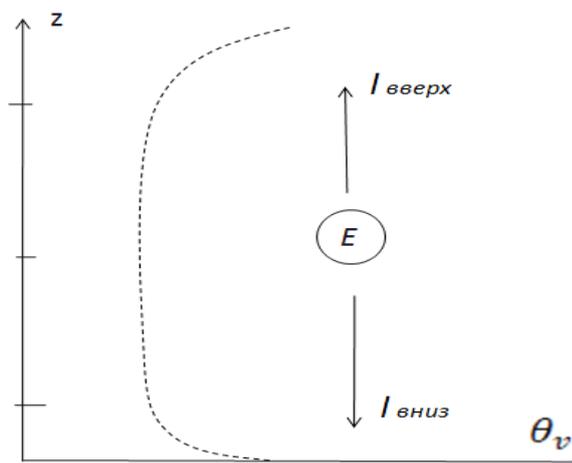


Рис. 1. Схематический вид вычисления турбулентного масштаба длины (пути смешения) L , основанного на методе максимального смещения частиц воздуха по-вертикали под действием сил плавучести.

Метод позволяет вычислять турбулентный масштаб длины на любом уровне в зависимости от стратификации не только на этом уровне, но и на уровнях, удаленных от рассматриваемого, т.е. вычислять нелокальный путь смешения.

Очевидно, что вблизи поверхности выполняется формула Блэкадара $l_{\text{вниз}} \sim z$. Окончательно для пути смешения выбираем осреднение :

$$L = c_1 (l_{\text{вверх}} \cdot l_{\text{вниз}})^{1/2}, \quad (5)$$

где c_1 – коэффициент, равный 0,5. Основное преимущество новой формулировки – это возможность определения размера вихрей в зависимости от величины турбулентной кинетической энергии на уровне z , температурной стратификации на каждом уровне модели и от расстояния до подстилающей поверхности. Отметим, что при таком подходе путь смешения на высоте z оказывается *нелокальным* т.к. он зависит от стратификации на уровнях, расположенных выше и ниже этой высоты.

Результаты расчетов

На рис. 2 изображены рассчитанные по модели COSMO-RU турбулентные масштабы длины для локального l , локального с коррекцией l_k и нелокального L для начала конвекции, 12 ч (время московское) для г. Москвы 17.07.2009 г. Видно, что локальный l монотонно растет с высотой, что физически неоправданно в верхней части пограничного слоя. Инверсионная поправка дает уменьшение локального l_k в инверсионном слое, но это происходит резко. Наиболее правильно с физической точки зрения поведение нелокального L , который имеет максимум в слое 200–300 м и затем плавно убывает с высотой к верхней границе пограничного слоя.

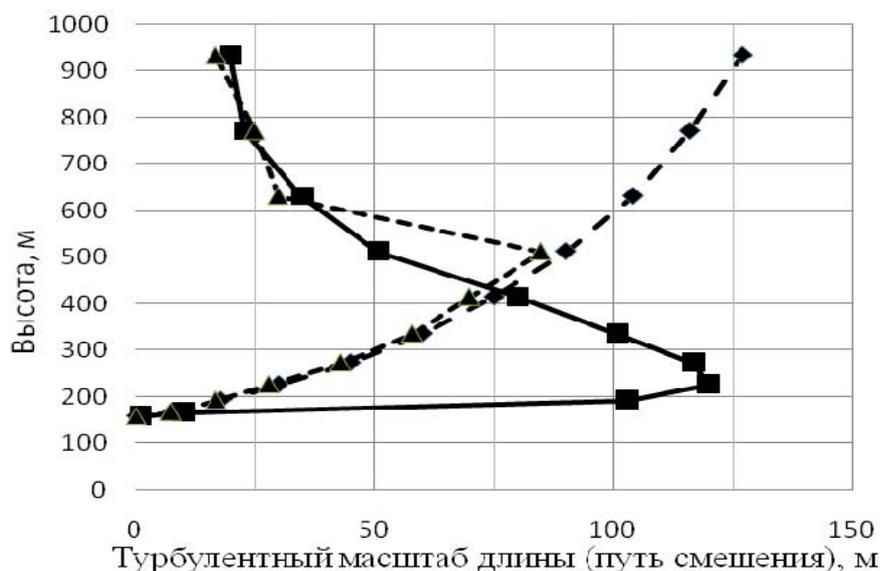


Рис. 2. Рассчитанные в модели COSMO-RU турбулентные масштабы длины: для локального l (длинный штрих), локального с коррекцией для температурной инверсии l_k (короткий штрих) и нелокального (сплошная линия) L , г. Москва, 12 ч 17.07.2009 г.

На рис. 3 приведены турбулентные масштабы длины для времени развитой конвекции (15 ч). Видим, что сохраняются те же закономерности, что и на рис. 2, только значение нелокального L выросло по величине (до 400 м) и его максимум передвинулся на уровень 1250 м, что характерно для развитой конвекции. На рис. 4 показаны рассчитанные по модели COSMO-RU с разными турбулентными масштабами длины вертикальные профили температуры в сравнении с данными профилемера МПТ-5 (только до высоты 600 м) для г. Москвы (Гидрометцентр России), 12 ч 17.07.2009. Видно, что температура в варианте с локальным l_k ниже, чем в варианте с нелокальным L , которая ближе к данным профилемера. На рис. 5 показаны рассчитанные по двум вариантам профили потенциальной температуры до высоты 2200 м в сравнении с данными радиозондирования в г. Долгопрудный для 15 ч

(развитая конвекция). Снова видно, что в варианте с нелокальным L температура теплее и ближе к данным радиозондирования, чем в варианте с локальным L_k .

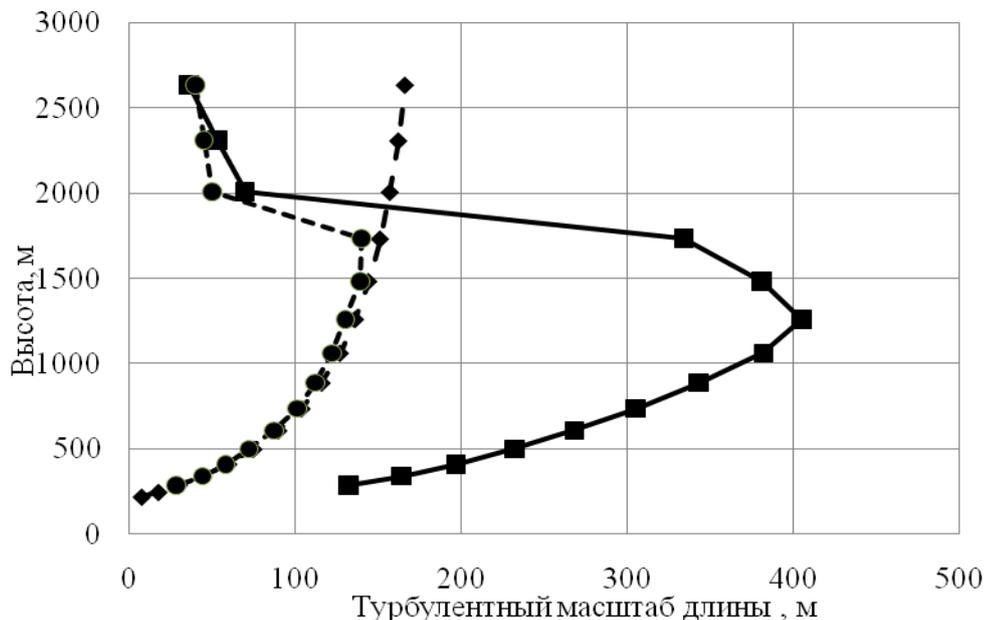


Рис. 3. Рассчитанные в модели COSMO-RU турбулентные масштабы длины: локальный (длинный штрих), локальный с коррекцией для инверсии (короткий штрих) и нелокальный (сплошная линия)) для времени развитой конвекции. г. Москва, 15 ч 17.07.2009 г.

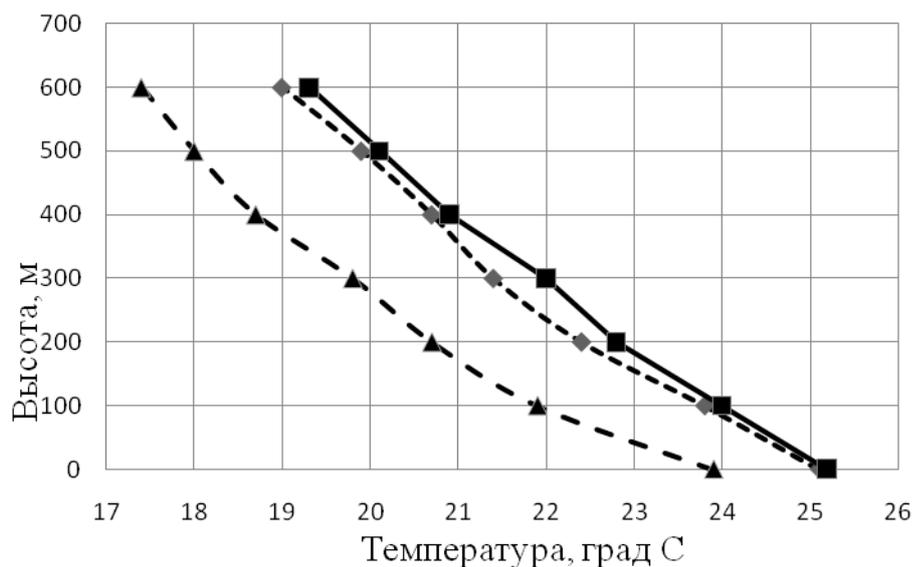


Рис. 4. Рассчитанные в модели профили температуры с локальным L_k (длинный штрих) и нелокальным L (короткий штрих). Сплошная линия – данные профилемера МПТ-5. г. Москва, 12 ч 17.07.2009 г.

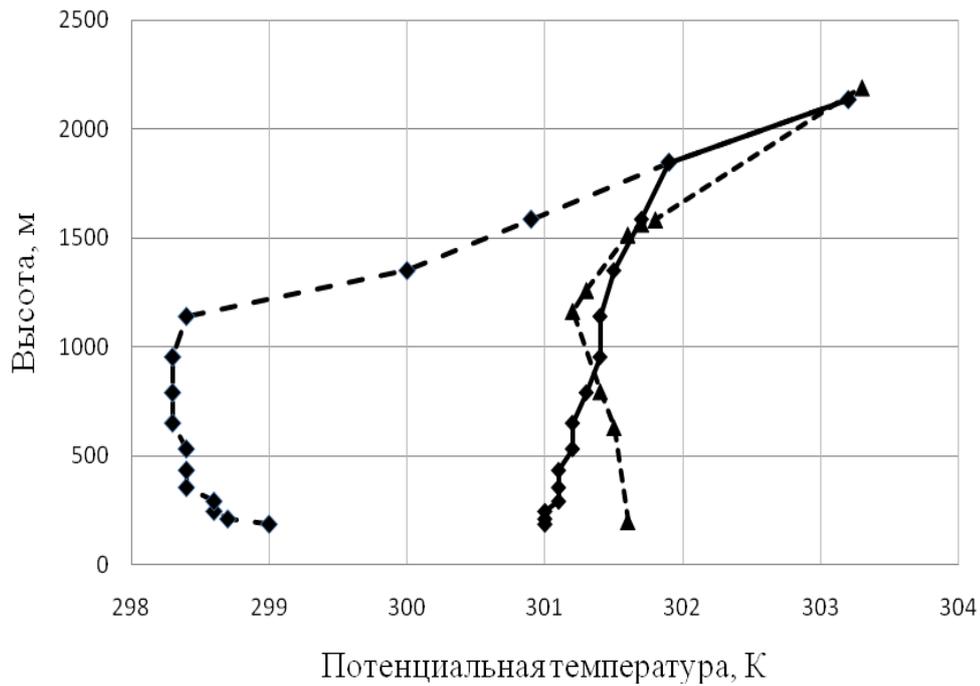


Рис. 5. Рассчитанные в модели вертикальные профили потенциальной температуры с локальным l_x (длинный штрих) и нелокальным L (сплошная линия). Короткий штрих – данные радиозондирования. г. Долгопрудный, 15 ч 17.07.2009 г.

На рис. 6 представлены рассчитанные вертикальные профили коэффициентов турбулентности для температуры, для модели с локальным и нелокальным турбулентными масштабами длины. Видно, что в случае с локальным l_x коэффициент вертикального турбулентного обмена (штриховая линия) имеет максимум вблизи верхней границы пограничного слоя величиной $800 \text{ м}^2/\text{с}$. Максимум расположен очень высоко, а его величина очень большая для начального периода конвекции. Нелокальный L дает максимум коэффициента вертикальных турбулентного обмена (сплошная линия) вблизи подстилающей поверхности, что характерно для начального периода конвекции.

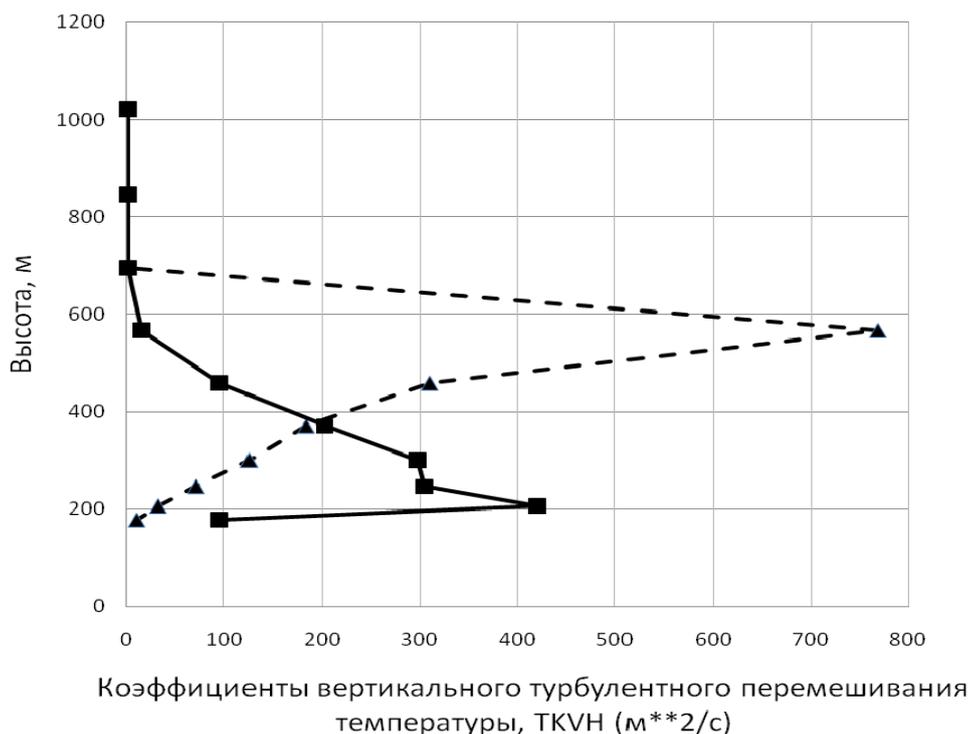


Рис. 6. Рассчитанные вертикальные коэффициенты турбулентности $TKVH(m^2/c)$ для температуры в модели с локальным (штрих) и нелокальным (сплошная линия) турбулентными масштабами длины, г. Москва, 12 ч 17.07.2009 г.

На рис. 7 приведены поля разности рассчитанных температур (вариант с нелокальным L минус вариант с локальным l_c) на уровне ~ 500 метров для двух областей, 15 ч, 17.07. 2009 года. Левый рисунок – область охватывающая северную часть Каспийского моря и регион, лежащий к северу. Эта область выбрана по причине отсутствия здесь облачности. Правый рисунок – область охватывающая центральный регион европейской территории вокруг г. Москва. Здесь наблюдалась значительная облачность в рассматриваемый период. Видно, что в Каспийском регионе разность температур в основном положительная и достигает $2,5$ °C. Только над морем наблюдаются небольшая область отрицательной разности температур (заштрихованная часть). На правом рисунке картина не так однозначна. Здесь, наряду с положительными значениями разности температур ($2-4$ °C), встречаются и отрицательные ($1-2$ °C) (заштрихованные области). Такая ситуация, по нашему мнению, связана с прямыми обратными связями поля температуры и поля облачности и требует дальнейшего изучения.

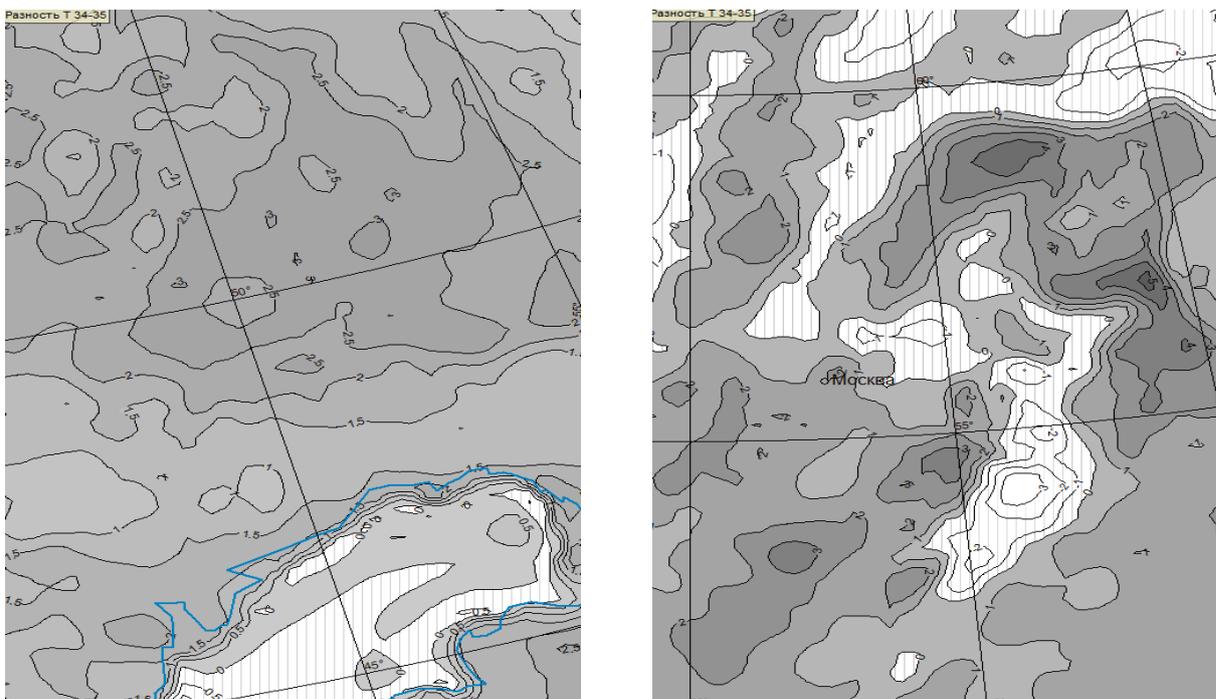


Рис. 7. Поля разности температур (вариант с нелокальным L минус вариант с локальным L_x) на уровне ~ 500 метров для двух областей. 15 ч 17.07.2009 г.

Заключение

Для модели COSMO-RU Гидрометцентра России развит алгоритм вычисления турбулентного масштаба длины (пути смешения), основанный на методе смещения частиц воздуха в поле силы плавучести. В новом алгоритме турбулентный масштаб длины на высоте z зависит не только от стратификации на этой высоте, но и от стратификации на других высотах (нелокальность). Нелокальный алгоритм лучше обоснован физически по сравнению с локальным алгоритмом турбулентного масштаба длины, который используется в модели в настоящее время. Новый алгоритм адаптирован в модуль TURBDIFF модели COSMO-RU, вариант 4.13. Проведенные расчеты показали преимущество варианта модели с нелокальным турбулентным масштабом длины при расчете полей температуры, влажности и давления для конвективных ситуаций.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 гг.» по составной части темы «МЕГАПОЛИС – интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе

аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий”.

Список использованных источников

1. Вильфанд П.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный региональный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 1. – С. 5–17.
2. Bougeault P., Lacarrere P. Parametrization of orography-induced turbulence in a meso-scale model // Monthly Weather Review. – 1989. – Vol. 117. – P. 1872–1890.
3. Blackadar A.K. The vertical distribution of wind and turbulence exchange in a neutral atmosphere // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105. – P. 6453–6468.
4. Doms G., Shättler U., Schraff C. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model, User’s Guide, 2008. . – www.cosmo-model.org.
5. Mellor G.L., Durbin P.A. The structure and dynamics of the ocean surface mixed layer // J. Phys. Oceanogr. – 1975. – Vol. 5. – P. 718–728.
6. Perov V. Development of vertical diffusion models on the base of the spectral theory of turbulence // HIRLAM Newsletter. – 2007. – 34, P. 36–41.

Поступила в редакцию 24.06.2011 г..

РАСЧЕТ НА МЕЗОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЯХ АТМОСФЕРЫ ETA И WRF(NMM) ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ С ПОЛЯРНЫМИ ФРОНТАМИ И СТРУЙНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

А.Э. Похил, Е.С. Глебова, А.В. Смирнов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
AEPokhil@yandex.ru, ek.glebova@gmail.com, alexandrvs@mail.ru*

Введение

В работах авторов [5–7] был исследован механизм взаимодействия пары тропических циклонов (ТЦ), имеющих различные интенсивности; рассматривались случаи тройственного взаимодействия пары ТЦ и полярного фронта; трансформации и регенерации ТЦ вследствие вхождения в область холодного фронта. Были предложены варианты объяснения исчезновения и появления вихрей, а также петель, зигзагов и крутых поворотов при их перемещении.

Известно, что главный дирижер атмосферных движений – это циркуляция на изобарических поверхностях 500–700 гПа. Однако верхние слои атмосферы также оказывают существенное влияние на эволюцию и перемещение атмосферных вихрей, таких как тропические циклоны.

Впервые отметил связь между возникновением ТЦ и восточным струйным течением (СТ) и высказал предположение об аналогичности роли струйных течений в циклогенезе внетропических и тропических широт Р.Ф. Бурлуцкий [1]. В работах В.Д. Бохана, А.К. Виприцкой, З.И. Черновой [2, 3] сделано предположение о том, что фактором, обуславливающим возникновение струйного течения, является ТЦ. В результате проведенного анализа было выяснено, что любой ТЦ сопровождается возникновением струйного течения и что каждый тропический циклон в северо-западной части тропической зоны Тихого океана генерирует СТ в ней. После исчезновения вихря уменьшается и скорость струйного течения.

В данной статье исследуются случаи необычного поведения тропических циклонов и взаимодействия их с ближайшей окружающей их областью атмосферы. Обсуждаются результаты исследования эволюции серии тропических циклонов Тихого океана: Парма, Мелор, Лупит, развивавшихся в октябре 2009 года, при взаимодействии их с полярными фронтами и струйными течениями. Результатом стало понимание процессов, происходящих при взаимодействии вихрей с окружающими атмосферными структурами. Траектории исследуемых ТЦ представлены на рис.1.

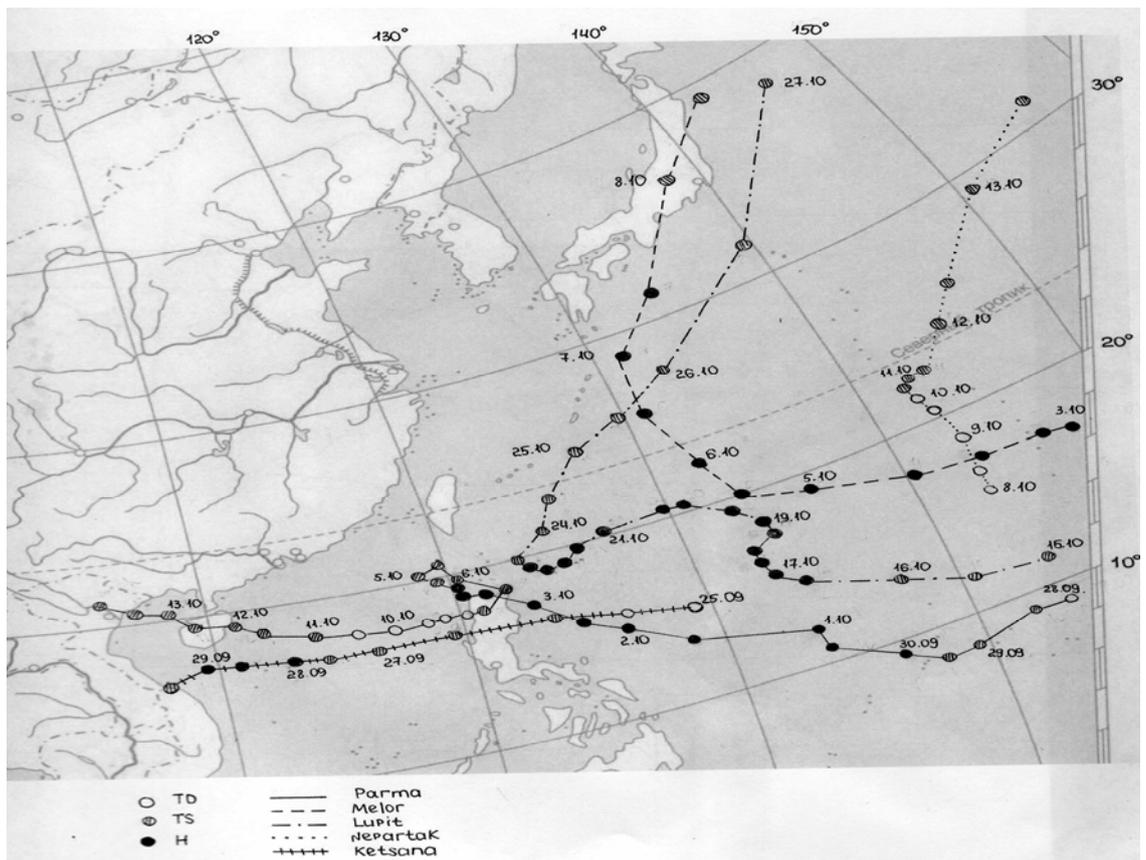


Рис. 1. Траектории тропических циклонов Парма, Мелор, Лупит.

Описание мезомасштабных моделей атмосферы ETA и WRF (NMM)

Расчеты проводились на мезомасштабных численных моделях атмосферы ETA [8] и WRF (NMM) [10], которые были адаптированы к северо-западной части Тихого океана. Размер расчетных областей составлял $40^\circ \times 40^\circ$. Модель ETA, описанная в [7, 8] интегрировалась с пространственным шагом 22 км и шагом по времени 90 секунд. В качестве начальных данных и граничных условий использовались поля анализа NCEP с пространственным разрешением 1° . Для визуализации рассчитанных полей метеорологических величин и анализа их изменения использовался графический пакет GrADS.

WRF (Weather Research and Forecasting Model) – численная модель предсказания погоды, которая подходит как для прогнозирования состояния атмосферы, так и для научных исследований. Модель дает прогнозы с разрешением сетки от 13 до 3 км; позволяет получать прогнозы погоды с заблаговременностью до 7 суток с точностью до одного часа. В работе используется новое негидростатическое ядро WRF (NMM) версии 3.3 [10]. В качестве вертикальных координат используется смешанная сигма-изобарическая система, то есть до

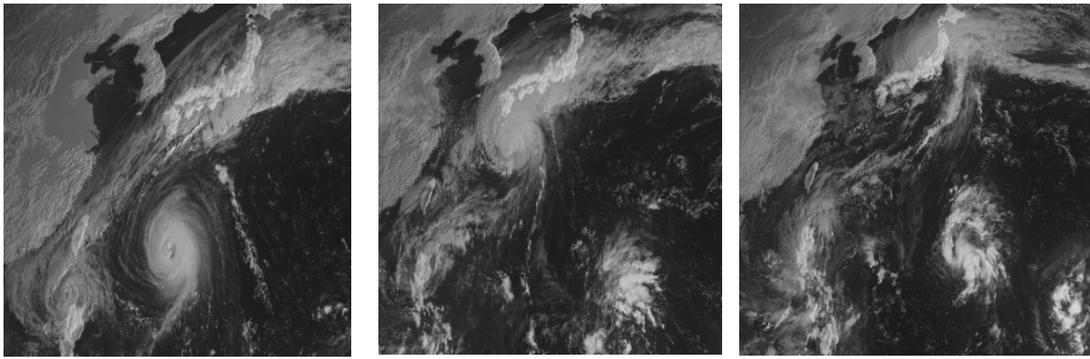
уровня 400 гПа используются сигма-координаты, выше – изобарические уровни (всего 27). Количество рассчитываемых узлов WE=296, SN=444. Применены более совершенные модели адвекции динамических элементов и силы Кориолиса. Модель WRF (NMM) способна реалистично прогнозировать как мезомасштабные явления (тропические шторма), так и работать в глобальном режиме. В системе вывода обеспечивается возможность интерполяции переменных с модельных уровней на изобарические поверхности или геометрические высоты. Предусмотрена также возможность представления выходной продукции в коде ГРИБ для ее распространения по линиям связи. Главный недостаток – модель потребляет огромное количество процессорного времени и спроектирована для запуска на суперкомпьютерах, что мешает ее использованию в региональных отделениях метеослужбы.

Анализ результатов расчетов траекторий и эволюции тропических циклонов Парма, Мелор

Рассмотрим случай поворота ТЦ Мелор (рис. 1). Циклон начал поворот 15 октября в 12 ч ВСВ на 20° с. ш. вначале на северо-запад, затем на север и далее круто на северо-восток (параболическая траектория). Попытаемся проследить причины и этапы этого поворота.

Известно, что полярно-фронтальное струйное течение связано с полярным фронтом и вместе с ним меняет свое положение. Высокие скорости ветра в верхней тропосфере обусловлены при этом температурным контрастом на фронте и связанным с ним увеличением барических градиентов и усилением ветра с высотой. Расчеты показали, что в период развития ТЦ Мелор над опустившимся довольно низко в южные широты полярным фронтом, располагается мощное струйное течение (рис. 6). Наблюдая динамику струйного течения, авторы обнаружили хорошую корреляцию поведения струйного течения и ТЦ.

Интересно было проследить, каким образом происходит взаимодействие ТЦ с этими структурами. Трансформация облачных структур при эволюции и перемещении ТЦ показана на рис. 2. Эволюция полей температуры и ветра на 850 гПа представлена на рис. 3; полей кинетической энергии на уровне 850гПа – на рис. 4.

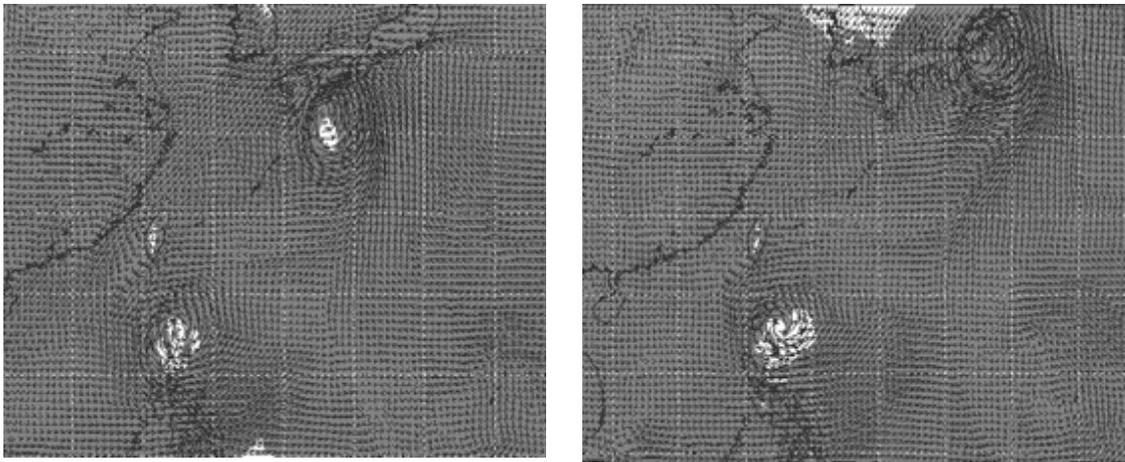


а) 6 октября

б) 7 октября

в) 8 октября

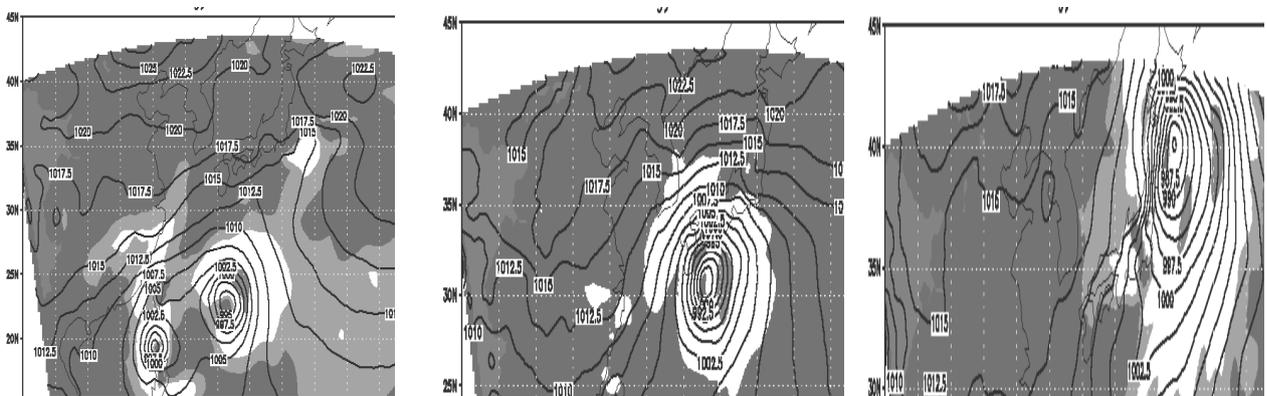
Рис. 2. Спутниковые снимки (в ИК-диапазоне частот) ТЦ Парма (западнее), Мелор (восточнее) и полярного фронта 6–8 октября.



а) 7 октября

б) 8 октября

Рис. 3. Поля температуры (°С) и ветра (м/с) на уровне 850 гПа при эволюции ТЦ Парма и Мелор 7–8 октября.



а) 6 октября 00ч

б) 7 октября 12ч

в) 8 октября 12ч

Рис. 4. Поля кинетической энергии ТЦ на уровне 850 гПа при эволюции ТЦ Парма и Мелор 6–8 октября.

По фактическим данным и расчетам моделей, 1 октября 2009 года наблюдалось выраженное СТ на уровне 150–250 гПа. Струйное течение располагалось квазиширотно, и его ось находилась над 37–40° с. ш., соответствуя зоне максимальных градиентов температуры на поверхности 850 гПа. Кинетическая энергия в СТ превышала 3000 м²/с². Скорость ветра на высоте около 10,5 км по расчетам WRF достигала 70 м/с, по ETA – на 20 % меньше – 55 м/с. При сравнении с фактической скоростью оказалось, что модель WRF дает более близкие к фактическим значения скорости ветра.

В результате опускания тропосферной ложбины в более южные широты и увеличения меридиональной компоненты циркуляции, в этой области произошло сближение полярного фронта и струйного течения с тропическими циклонами (рис. 2а). Одновременно наблюдалось сближение и циклоническое вращение относительно друг друга пары ТЦ Парма и Мелор (рис. 5а). 3 октября южная периферия струйного течения на 250 гПа опустилась довольно низко к югу (до 35° с. ш.), и на струйном течении начала образовываться волна. 4 октября в 12 ч ВСВ давление в Мелоре опустилось до 910 гПа и такая величина сохранялась в течение суток. 5 октября в 12 ч ВСВ произошел разрыв струйного течения, и одна из его восточных ветвей опустилась до 28° с. ш. на долготе о. Ксюю. Западная его ветвь располагалась над восточным побережьем Китая (28° с. ш., 120° в.д.). Центр ТЦ Парма находился на расстоянии 800–900 км от южной границы СТ, а центр Мелора – на расстоянии около 1000 км от южной части восточного рукава СТ (рис. 2а). В этот интервал времени более слабый ТЦ Парма являлся вихрем, ведомым более сильным Мелором. Наблюдалось взаимодействие двух ТЦ (расстояние между их центрами уменьшилось до 1200 км (рис. 5а), что привело к образованию петли на траектории Пармы (рис. 1) и удалению Пармы от СТ.

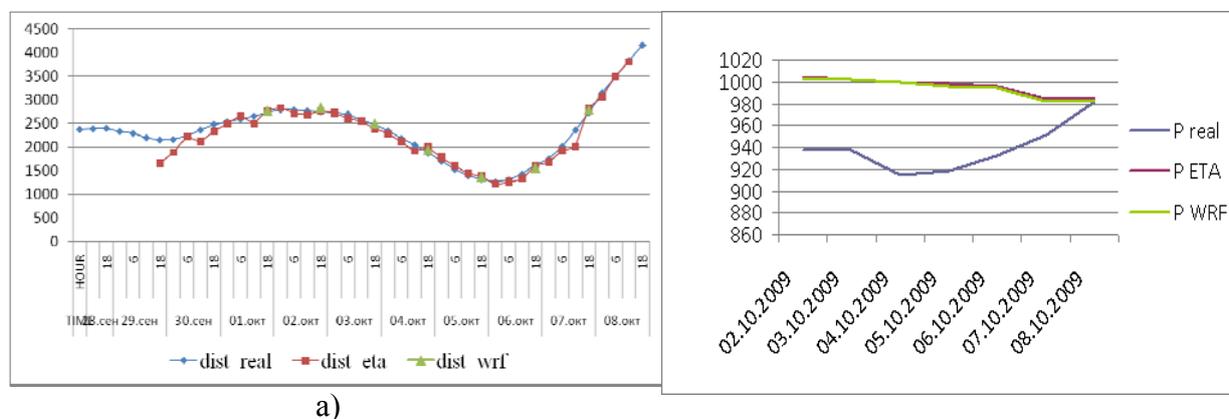


Рис. 5. Расстояние между центрами ТЦ Парма и Мелор (а); фактическое и расчетные давления в центре ТЦ Мелор (б).

Рассмотрим более подробно результаты расчета обеих моделей.

Эволюция полей кинетической энергии с 6 по 8 октября на уровне 850 гПа представлена на рис. 4. 6 октября в 18 ч ВСВ Мелор приближается к СТ и, соответственно, к полярному фронту (рис. 2а), давление в его центре в это время повышается до 930гПа .

7 октября вихрь походит вплотную к фронтальной зоне и 7 октября в 6 ч ВСВ «садится» на полярный фронт (рис. 2б). При этом ТЦ достигает высоты 11–12 км и объединяется с областью струйного течения (это четко прослеживается по полям кинетической энергии на уровне 200–250 гПа). При этом изменяется форма СТ и наблюдается общая изолиния энергии ТЦ и СТ. С этого момента ТЦ Мелор начинает перемещаться с большой скоростью параллельно и южнее оси СТ и вдоль полярного фронта. Отток по его северной периферии совпадает с направлением СТ. В результате потоки складываются и интенсивность СТ несколько увеличивается. К этому моменту, за счет быстрого перемещения Мелора, расстояние между парой ТЦ увеличивается (рис. 5а), и прекращается их взаимодействие (петля на траектории Пармы заканчивается) (рис. 1). Парма начинает перемещаться на запад.

8 октября в 12 ч ВСВ у Мелора появляется вторая область максимума кинетической энергии (по расчетам на двух моделях), центр которой расположен на расстоянии 800 км от центра ТЦ, другая область максимума кинетической энергии находится на расстоянии 300 км. (рис. 4в). Этот момент соответствует превращению ТЦ в среднеширотный и образованию фронтальной области в нем (рис. 2в).

Интересна динамика полей кинетической энергии струйного течения при подходе ТЦ (рис. 6). Как уже упоминалось выше, в определенный момент на СТ образуется волна с прогибом на юг. Далее южная часть струйного течения разрывается, вытягивается двумя рукавами в направлении приближающихся тропических циклонов Парма и Мелор (рис. 6а). На рис. 6б хорошо прорисовывается замкнутая изолиния, соответствующая энергии Мелора на уровне 250гПа. На рис. 6в-д видно продвижение этой области вдоль СТ. После ухода Мелора 9 октября южная часть волны струйного течения, прежде разорванная, «срастается», прогиб ее к югу уменьшается, «струя» выравнивается и стремится расположиться опять по широте (рис. 6д-з).

Поле температур на 850гПа (рис. 3) также реагирует на приближение ТЦ: начинается искажение первоначально прямой границы температурного фронтального раздела при приближении ТЦ и когда он «садится» на полярный фронт. 8 октября вихрь, «проникнув» во фронтальную зону, «закручивает» ее температурное поле в свою структуру. На рисунке можно видеть, каким образом при подходе вихря к зоне температурного раздела полярного

фронта искажается его структура: появляется асимметрия (рис. 3а), сопровождающаяся наклоном оси максимума температур и увеличением пространства, захваченного вихрем.

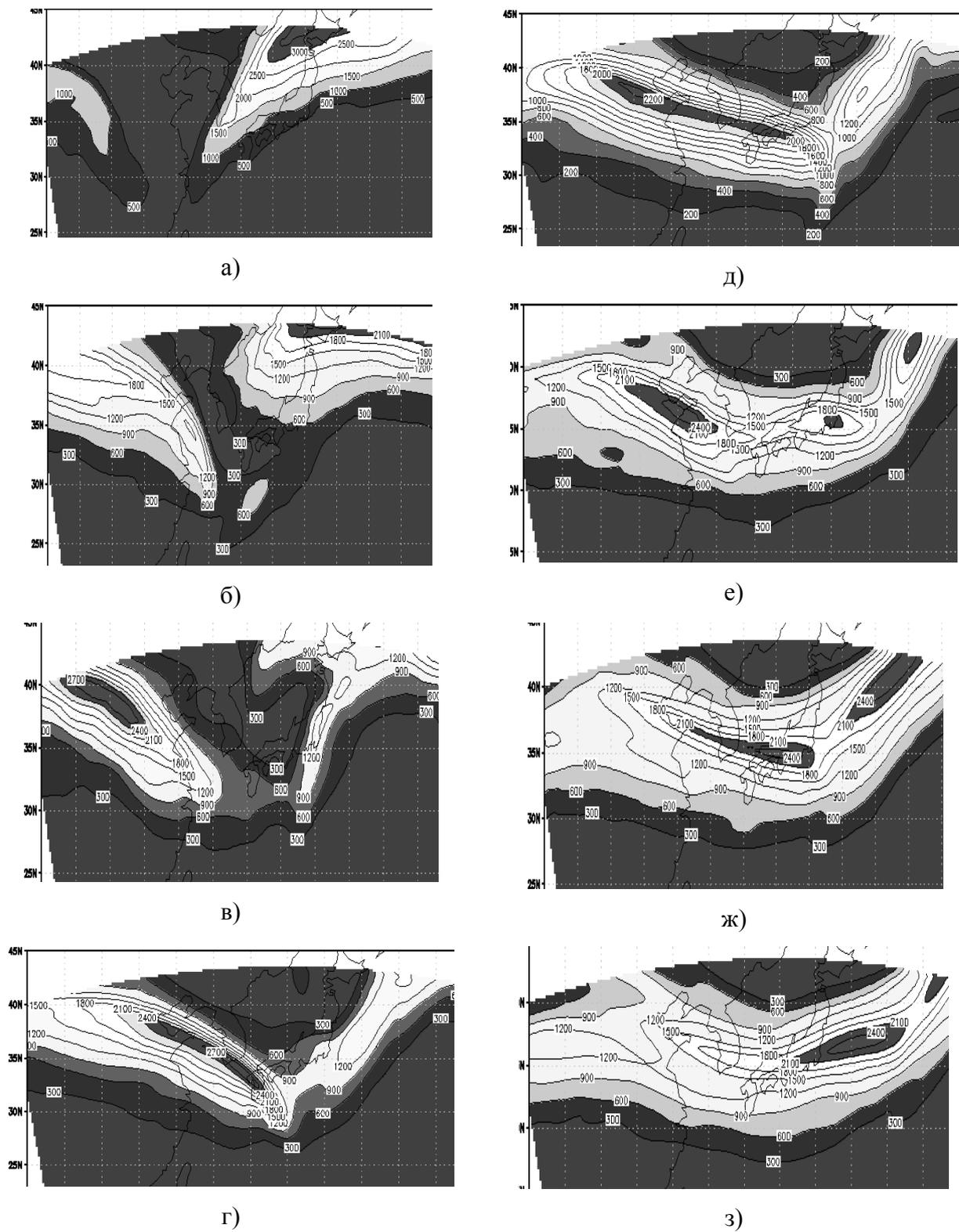


Рис. 6. Поля кинетической энергии струйного течения на 250 гПа при прохождении ТЦ Мелор 6–9 октября.

После выхода ТЦ за расчетную область (ухода на северо-восток) зона максимального температурного градиента СТ также стремится выровняться. Атмосферный процесс в данной области восстанавливает широтную направленность.

Надо сказать, что в рассмотренном случае мощное струйное течение имело место до появления ТЦ и вступило с ним в «связь» при сближении с ТЦ на определенное расстояние (менее 1000 км).

Посмотрим, как рассчитывается положение центра ТЦ на моделях. Изменение расстояния между центрами Пармы и Мелора (фактическое и по расчетам моделей) представлено на рис. 5а.

Расстояние между центрами ТЦ обе модели дают практически одинаково хорошо, за исключением стадии TS, когда центры вихрей определяются не достаточно точно (рис. 5а). Давление в центре ТЦ рассчитывается обеими моделями примерно одинаково: завышается и определяется с точностью до 5–10 % в зависимости от стадии вихря. Расчеты на обеих моделях достаточно хорошо описали странную петлю на траектории Пармы. Поворот на траектории Мелора обеими моделями также хорошо рассчитан. (Результаты исследования причин появления этой петли подробно рассмотрены в [5]). Ошибка в положении центра ТЦ Пармы при расчете по ETA на сутки составляет 100–120 км, на двое суток – 200–280 км. При расчете по WRF на сутки ошибка приблизительно на 15–20 % меньше. Для Мелора (более простая параболическая траектория) ошибки по WRF несколько меньше и составляют максимально до 85 км на первые сутки и до 210 км на вторые сутки; по ETA ошибки больше на 10–20 % и Наибольшие ошибки определения положения центра циклона отмечаются на стадии тропической депрессии, когда циклон недостаточно хорошо выражен.

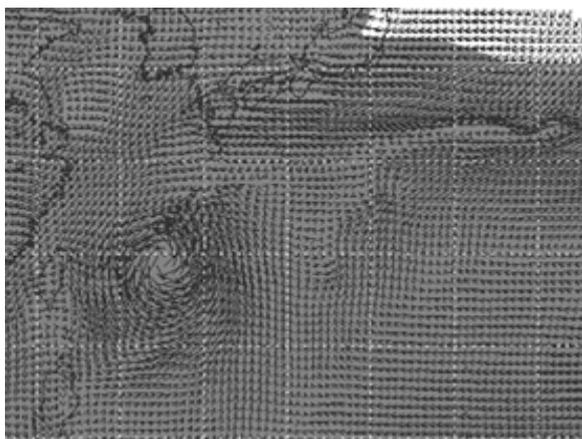
Анализ результатов расчетов траекторий и эволюции тропического циклона

Лупит

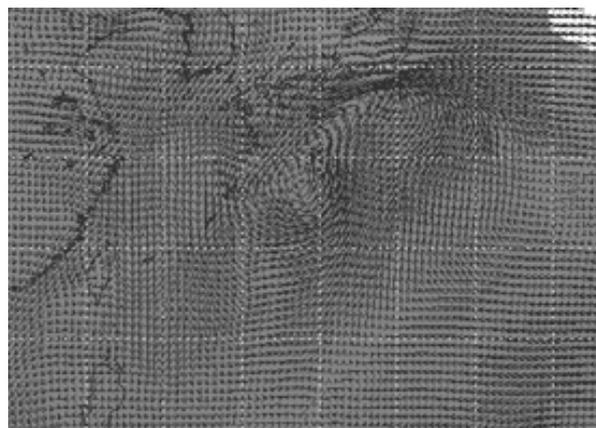
Проследим, как взаимодействует, и взаимодействует ли, Лупит со струйным течением. 15 октября образовалась тропическая депрессия – будущий Лупит. Причины «неправильности» его траектории до 12 ч ВСВ 23 октября проанализированы в [5].

Рассмотрим причины крутого поворота (почти на 110–120°) вихря на северо-восток 23 октября в 12 ч ВСВ (рис. 1).

Эволюция полей температуры и ветра на уровне 850гПа представлена на рис 7, полей скорости и кинетической энергии СТ на уровне 250 гПа – на рис. 8 и 9 соответственно.

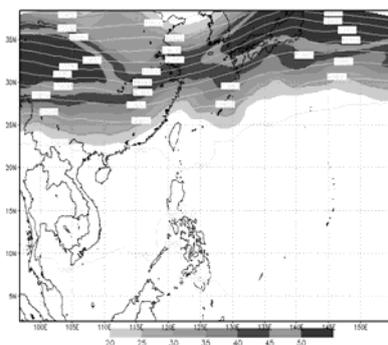


а) 25 октября

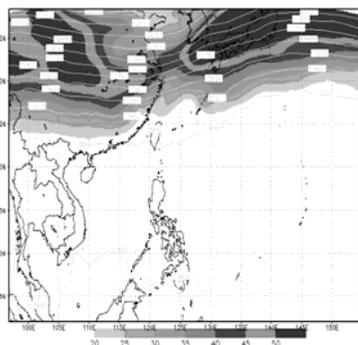


б) 26 октября

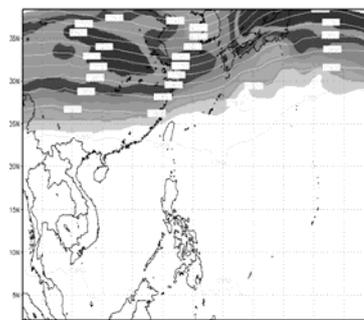
Рис. 7. Поля температуры (°C) и ветра (м/с) на уровне 850 гПа при эволюции ТЦ Лупит 25–26 октября.



а) 24 октября

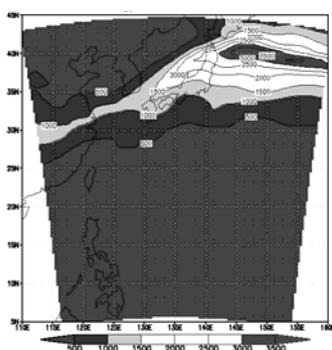


б) 25 октября

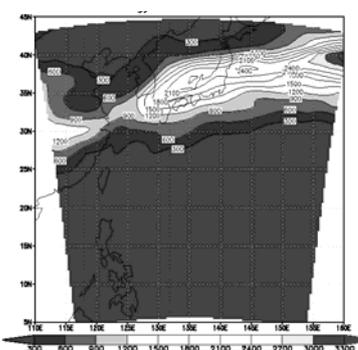


в) 26 октября

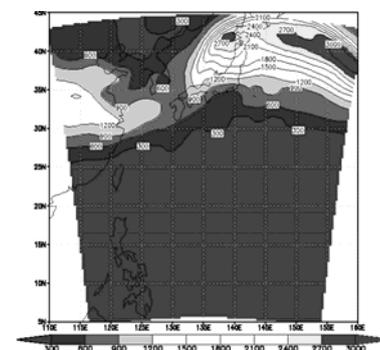
Рис. 8. Поля скорости струйного течения (м/с) на уровне 250 гПа при эволюции ТЦ Лупит 24–26 октября.



а) 24 октября



б) 25 октября



в) 26 октября

Рис. 9. Поля кинетической энергии струйного течения на уровне 250 гПа при прохождении ТЦ Лупит 24–26 октября.

В момент образования ТЦ ось СТ в рассматриваемой области располагалась параллельно кругу широты (31–35° с. ш.).

23 октября ТЦ находился на расстоянии 800 км от южной части СТ, которое в это время, также как это произошло в случае с рассмотренными выше ТЦ Парма и Мелор, прогнувшись к югу, стало образовывать волну. Часть южной ветви СТ опустилась до 23° с. ш., где в этот момент находился ТЦ Лупит. Началось взаимодействие этих двух систем. На уровне 250 гПа организовалась общая изолиния кинетической энергии. ТЦ «садится» на полярный фронт. Струйное течение подхватывает вихрь, и далее он перемещается вдоль южной границы СТ и, соответственно, вдоль полярного фронта. Именно в этот момент Лупит начал круто поворачивать на северо-восток и 24 октября с большой скоростью двинулся вдоль оси СТ. По динамике полей скорости (рис. 8) и кинетической энергии (рис. 9) струйного течения хорошо наблюдается перемещение вихря вдоль СТ. Структура этих полей изменяется и закручивается в вихрь. В поле температур на уровне 850 гПа (рис. 7) хорошо просматривается граница полярного фронта и его динамика при приближении вихря. Можно наблюдать, как вихрь «накручивает» на себя фронтальную зону и область струйного течения, образуя на них волну (рис. 7б, 8в, 9в).

Далее, вслед уходящему Лупиту, небольшой рукав, видный в полях скорости и кинетической энергии СТ, постепенно втягивается в основное «русло» струйного течения, восточный и западный рукава СТ стремятся объединиться, ось – расположиться по широте. Скорость на оси СТ в этот момент превышала 55 м/с.

Расчеты продемонстрировали, что модель ETA успешно воспроизвела необычную траекторию циклона Лупит, причем наибольшие ошибки (до 200 км) отмечались не в период отклонения циклона от параболической траектории, а после поворота вихря, когда скорость его движения начала стремительно расти при приближении к внетропическим широтам. Аналогичная ситуация наблюдалась в модели WRF.

Выводы

1. На основании расчетов на мезомасштабных численных моделях атмосферы ETA и WRF (NMM) траекторий и полей метеорологических величин (давления, скорости и направления ветра, температуры, кинетической энергии) был проведен анализ перемещения и эволюции ТЦ Парма, Мелор, Лупит и их взаимодействие со струйными течениями и полярными фронтами. Показано, что взаимодействие ТЦ со струйным течением начинается с расстояния несколько менее 1000 км в зависимости от интенсивности этих структур и приводит к трансформации всех сопутствующих полей метеорологических величин; к

усилению или ослаблению энергии СТ, но не к его образованию, как было указано в работах [2, 3].

2. Обнаружен интересный эффект образования второй зоны максимальных скоростей и, соответственно, энергии в ТЦ Мелор при преобразовании его во внетропический среднеширотный циклон.

3. Сравнивая качество воспроизведения траекторий тропических циклонов в двух моделях можно заметить, что в случае правильной параболической траектории (Мелор) обе модели дают похожие результаты, хорошо согласующиеся с фактическими. При наличии петли (Парма) модель WRF показывает лучшие результаты, в то время как модель ETA дает ошибку прогноза примерно 100 км. В то же время, обе модели хорошо описали крутой поворот на траектории ТЦ Лупита с точностью 50–100 км.

4. Если говорить о качестве воспроизведения метеорологических полей обеими моделями в период взаимодействия циклонов, следует отметить:

– обе модели существенно завышают атмосферное давление в центре вихрей, в среднем на 30-40 гПа;

– скорости ветра в струйном течении в модели ETA оказываются на 10-15 м/с ниже, чем в WRF;

– кинетическая энергия струйного течения в модели ETA оказывается на 100–250 м²/с² ниже, чем в WRF, однако, учитывая величину значений энергии (3000–3500 м²/с²), погрешность можно считать незначительной (менее 1 %).

Список использованных источников

1. Бурлуцкий Р.Ф. О структуре тропической атмосферы при возникновении тайфунов // Метеорология и гидрология. – 1964. – № 3. – С. 27–30.

2. Бохан В.Д., Виприцкая А.К. Восточное тропосферное струйное течение в зоне деятельности тайфунов // Труды ДВНИГМИ. – 1984. – Вып. 115. – С. 51–59.

3. Виприцкая А.К., Чернова З.И. К вопросу о причинах зарождения (незарождения) тропических циклонов над северо-западной частью Тихого океана в июле-сентябре 1988 года // Труды ДВНИГМИ. – 1993. – Вып. 146. – С. 3–21.

4. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 615 с.

5. Похил А.Э. Об интересных случаях взаимодействия пары тропических циклонов и полярного фронта // Метеорология и гидрология. – 2012 (в печати).

6. Похил А.Э. О нескольких случаях взаимодействия тропических циклонов в Тихом океане в сезон 1988 г. // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 6. – С. 60–67.

7. Похил А.Э., Глебова Е. С. О взаимодействии тропических циклонов между собой и с другими атмосферными структурами // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 9. – С. 5–16.

8. Mesinger F. Eta Model at NCEP: Challenges overcome and lessons learned // Lecture notes, Workshop on "Design and Use of Regional Weather Prediction Models". – The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Miramare, Trieste, Italy, 11-19 April 2005.

9. Rossby C.-G. Collaborators. Relation between the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and displacements of the semipermanent centers of action // J. Marine Res. – 1939. – V. 2. – P. 38–55.

10. <http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/>

Поступила в редакцию 06.10.2011 г.

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ И ДОВЕДЕНИЯ КОНЕЧНОЙ
АГРОМЕТИНФОРМАЦИИ ДО ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
В ГИДРОМЕТЦЕНТРЕ РОССИИ
И ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ
РОСГИДРОМЕТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ PROMETEI**

И.Э. Пурина, А.И. Страшная, Т.С. Чекулаева, Н.С. Игнатова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
purina@mecom.ru, ais@mecom.ru, chekulaeva@mecom.ru, ignatova@mecom.ru*

С созданием и внедрением в оперативную практику Гидрометцентра России программно-технологического комплекса обработки гидрометеорологической информации PROMETEI [1], разработанного Отделом систем информационного обеспечения, были созданы механизмы и инструменты, позволяющие получать, активно усваивать и доводить до конечных пользователей в ЛВС все виды наблюдений и прогностической продукции. На PROMETEI-сервере система приёма, полного поэлементного раскодирования и хранения комплекса создает три основных информационных массива данных: базы постанционных наблюдений, базы общего назначения и текстовые архивы. Потребителями этой информации являются специализированные рабочие места в локальной вычислительной сети – PROMETEI-клиент. Большинство подразделений Гидрометцентра России активно участвовали в разработке приложений, обеспечивающих сервис рабочих мест своих специалистов. В последние годы в работу включился и Отдел агрометеорологических прогнозов. До 2009 года большинство агронаблюдений поступало в отдел электронной почтой, просматривалось и обрабатывалось по большей части вручную. Таким же образом дело обстоит в большинстве оперативно-производственных учреждений Росгидромета.

В течение нескольких лет Отдел агрометеорологических прогнозов проводил большую исследовательскую, организационную и методическую работу, целью которой была разработка нового кода передачи данных наблюдений с агрометеорологических станций и постов. Код призван был улучшить систему обеспечения данными межрегиональных территориальных управлений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды для агрометеорологического обеспечения отраслей экономики агропромышленного комплекса. Было обработано более 250 предложений и замечаний с мест, переработаны основные таблицы кодирования и проведено обучение специалистов. В рамках программы перехода на новый код в 2008 году были выполнены три экспериментальных передачи данных в квазиоперативном режиме. После регистрации код

был запущен в оперативную практику и заменил его старую версию. Введение нового кода обусловило необходимость разработки нового комплекса программ по автоматизированному декодированию декадной и ежедневной агрометеорологической информации по земледельческой зоне РФ и районам пастбищного животноводства, который позволял бы не только расшифровывать в автоматизированном режиме всю поступающую информацию, но и обобщать информацию в удобном для анализа виде, формировать необходимые таблицы и журналы, где агрометеорологические параметры представляются не в виде буквенных символов, как было ранее, а в явном виде. В 2009-2010 гг. в Отделе агрометпрогнозов Гидрометцентра России на рабочих местах специалистов-агрометеорологов был установлен автоматизированный комплекс программ, разработанный в Отделе систем информационного обеспечения Гидрометцентра России.

Этап обработки сообщений

Чтобы обеспечить новый уровень представления агрометданных, специалистам Отдела систем информационного обеспечения потребовалось создать технологию, обеспечивающую полный цикл обработки поступающей информации, включая многоуровневую обработку и формирование архивов. Формат данной статьи не позволяет дать подробное описание произведенных разработок, постараемся перечислить лишь наиболее крупные и значимые, отметим основные этапы внедрения и организации функционирования всей системы.

Наряду с другими метеонаблюдениями, Гидрометцентр России обеспечивается агрометданными через систему связи Росгидромета. Сводки публикуются Центром Коммутации Сообщений непосредственно в домашние директории технологии приёма комплекса PROMETEI. В 2008-2009 гг. в блок модулей раскодирования PROMETEI-сервера были добавлены процессы полного поэлементного раскодирования нового кода КН-21. Тогда же были разработаны форматы и структуры хранения раскодированных данных в специализированной базе данных. Стоит отметить, что код включает четыре независимых раздела: декадную и ежедневную информацию по земледельческой зоне и, аналогично, районам пастбищного животноводства и более 180 видов элементов наблюдений. Исходя из потребностей в единовременном доступе к значительному объёму данных, цикл хранения в базе данных составил 36 месяцев поступления, или 108 декад. На текущий момент в оперативную практику Гидрометцентра России включены данные только по земледельческой зоне; наблюдения на пастбищах в Отделе агрометпрогнозов оперативно не обрабатываются, а сообщения поступают только фрагментарно. Однако в обработке этих наблюдений крайне заинтересованы регионы.

Включение агрометеорологической информации в оперативные базы PROMETEI-сервера позволило использовать её всеми заинтересованными подразделениями Гидрометцентра России. С другой стороны, данные других кодовых форм стали доступны Отделу агрометпрогнозов. Так, по Московской области разработаны программные средства, позволяющие дополнять синоптическими наблюдениями ежедневные агрометданные и производить ряд статистических уточнений декадных наблюдений, что обеспечивает полноту поступающей информации.

Поддерживая сложившуюся оперативную практику и стиль работы Отдела агрометпрогнозов, была выполнена дополнительная настройка системы приёма PROMETEI-сервера, и в текстовые архивы были включены файлы с текстами декадных и ежедневных агросообщений с циклом хранения 7–9 дней. На все компьютеры в Отделе агрометпрогнозов были установлены и настроены стандартные рабочие места специалистов типа “Телетайп” для просмотра отдельно декадных сообщений по России и ежедневных и декадных сообщений по Московской области. Рабочие места автоматически формируют архивы поступившей информации. Электронные архивы - это ценнейший материал для анализа. Общий вид главного окна РМ “Телетайп” представлен на рис. 1.

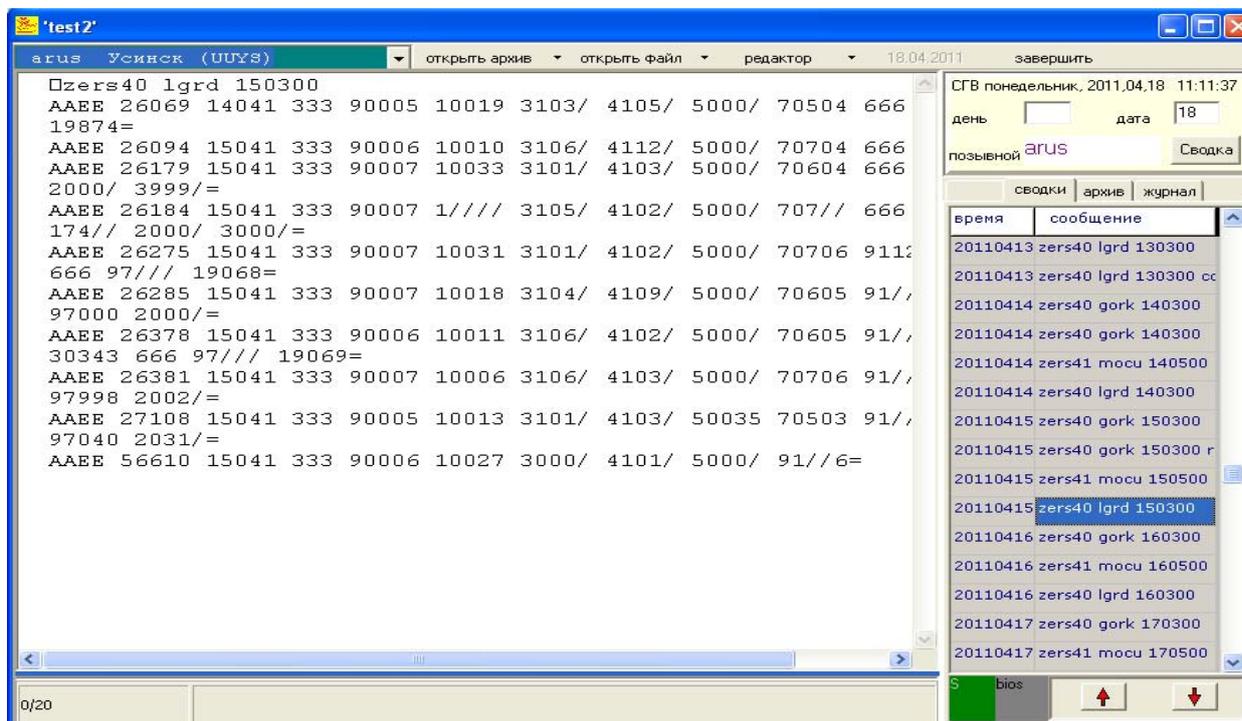


Рис. 1. Главное окно РМ “Телетайп” под OS Windows.

Важнейшим этапом разработки стали два рабочих места, обеспечивающие визуализацию поступивших наблюдений в виде сводных журналов синоптических и фенологических наблюдений. Рабочее место по России включает 43 декадных журнала, по Московской области – два сводных журнала ежедневных наблюдений и 16 декадных. Общий

вид рабочего места по России (фрагмент) приведен на рис. 2, по Московской области – на рис. 3.

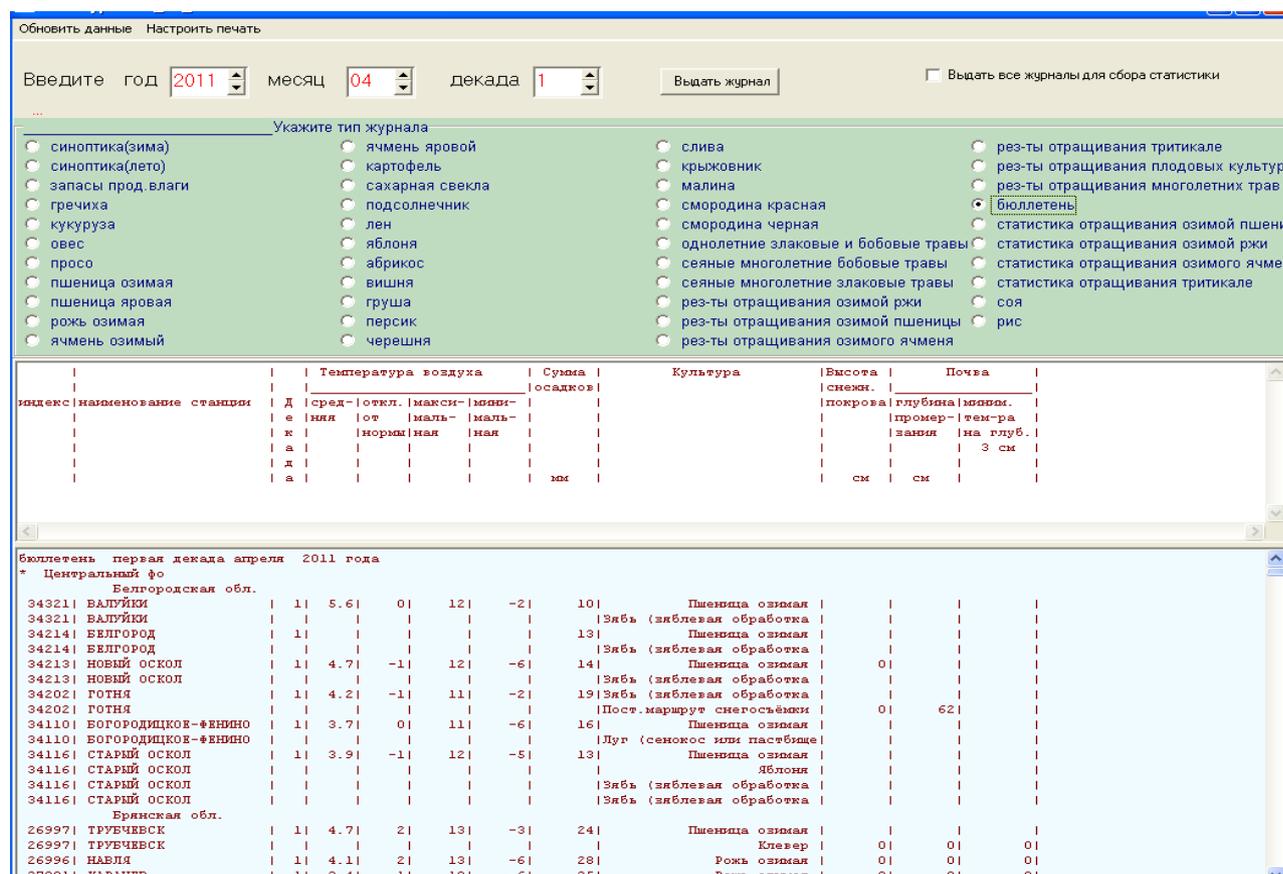


Рис. 2. Общий вид рабочего места для визуализации поступивших наблюдений в виде сводных журналов синоптических и фенологических наблюдений по России.

Оба рабочих места снабжены стандартным инструментальным набором, обеспечивающим получение данных, автоматическую архивацию наблюдений и журналов, возможности альтернативного хранения и распечатки журналов в формате книги. Этап архивации является здесь крайне важным, т.к. на основе этого архива разрабатывался и в настоящее время оперативно функционирует блок расчета статистик. В Отделе агрометеорологических прогнозов рабочие места были установлены на каждом компьютере. Наладка рабочих мест велась при самом активном участии сотрудников Отдела, учитывая крайнюю сложность кодирования, при которой одним и тем же параметром для разных культур передаются разные по характеристикам (и таблицам соответствия) данные, что нехарактерно для подавляющего большинства кодов наблюдений. Процесс ввода таблиц в практику сопровождался неоднократными дополнениями, исправлениями и модификациями отображения, что обычно и бывает при процессах формирования абсолютно нового материала.

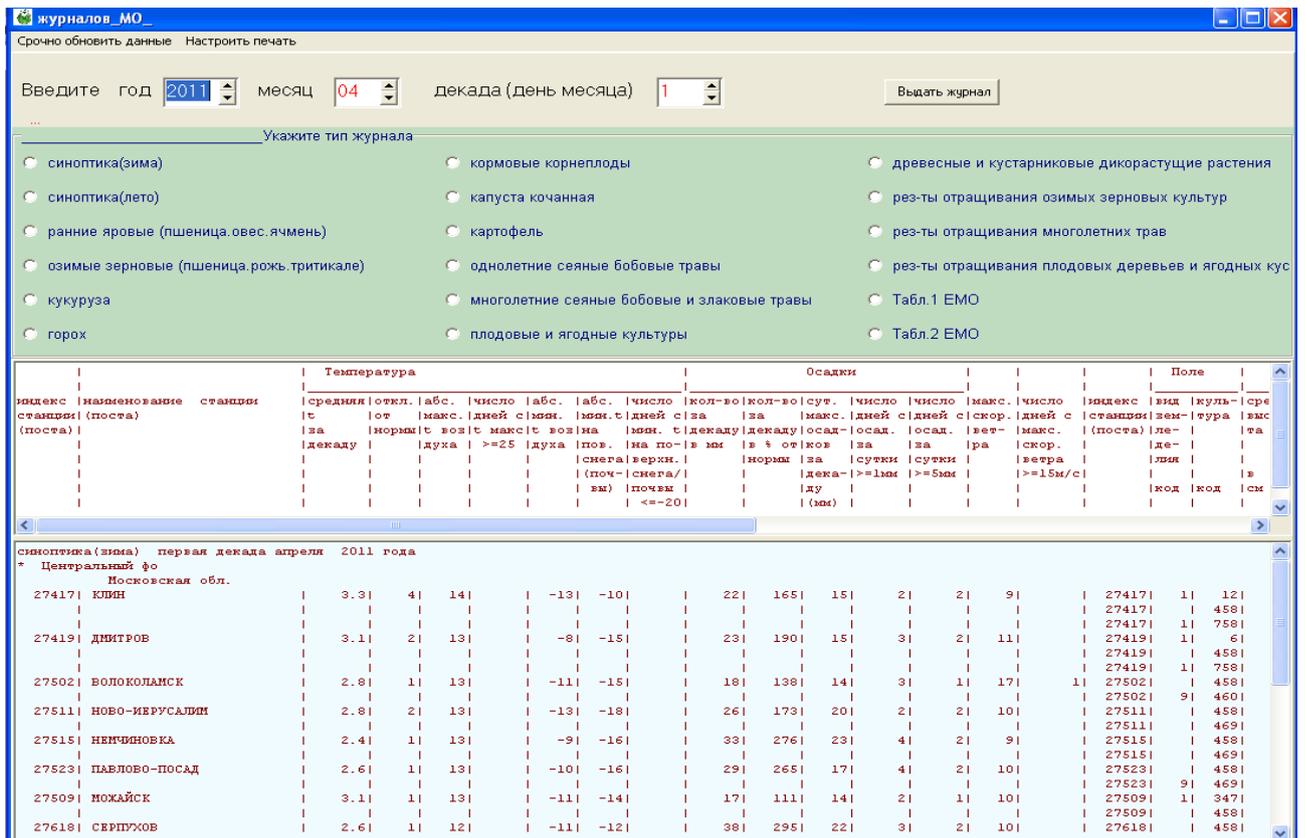


Рис. 3. Общий вид рабочего места для визуализации поступивших наблюдений в виде сводных журналов синоптических и фенологических наблюдений по Московской области.

Как только этап был завершен, Гидрометцентр России получил большое число обращений от региональных центров на установку программного обеспечения построения журналов, т.к. большинство всё еще продолжало обрабатывать данные вручную. Чтобы обеспечить регионы данными, пришлось проделать значительную совместную работу. Здесь следует вновь обратиться к системе связи Росгидромета. Согласно соглашениям, в настоящее время Гидрометцентр России получает наблюдения не со всех станций, а только с тех из них, которые являются корреспондентами Гидрометцентра. Потребовалось в первую очередь наладить получение от региональных подразделений данных со всех наблюдательных пунктов в зоне их деятельности. Этот процесс мог бы растянуться на достаточно долгое время, если бы пришлось использовать устоявшуюся процедуру добавления станций в существующие сводки или формирования новых для передачи в каналы связи. Учитывая огромную срочность и важность этой работы, процедуры были ускорены Главным радиометеорологическим центром, и все заявки регионов выполнялись вне очереди.

Поток данных от заинтересованных регионов существенно вырос. Возникла необходимость в модификации рабочих мест, чтобы обеспечить получение данных вне системы клиент-сервер, используемой в технологии PROMETEI. Встал вопрос, какими оперативными средствами передавать агрометданные на места. Срочно были разработаны и, учитывая сжатые сроки до начала сельскохозяйственных работ на местах, внедрены на выделенных оперативных машинах под Windows процедуры получения от сервера и “раскладывания” поступивших данных по территориальным подразделениям и федеральным округам для последующей автоматической отправки данных абонентам по электронной почте. Этот вид доставки данных был выбран единственно по той причине, что далеко не все агрометеорологические подразделения в регионах обеспечены доступом к оперативным FTP-серверам Гидрометцентра России.

Все процедуры оперативной передачи данных в регионы были установлены в Гидрометцентре России на два резервируемых компьютера под OS Windows в Группе контроля оперативных технологий. Программное обеспечение рабочих мест на основе локальных данных было отправлено в регионы и снабжено подробными инструкциями по установке и эксплуатации. Настройка проводилась удалённо на основе консультаций по электронной почте и ICQ. Заметных затруднений процесс не вызвал. На текущий момент в 11 областей передано и эксплуатируется программное обеспечение визуализации журналов, Группой контроля оперативных технологий Гидрометцентра России регионы стабильно обеспечиваются данными.

Крайне важным этапом стала разработка и внедрение собственных процедур формирования агрокарт по территории России. Частично карты выдавались и в предшествующих разработках. Процесс их формирования был довольно сложным. Карты выдавались в Главном вычислительном центре Росгидромета более часа в единственном экземпляре, передавались дежурному сотруднику, который отвечал за копирование карт в копировальном центре, что было сопряжено не только с длительной по времени процедурой, но и с необходимостью оформления документов. Выдаваемые ГВЦ Росгидромета карты по отдельным агрометеорологическим параметрам по территории России представлялись двумя частями (листами), что было весьма неудобным в использовании. Разработана и внедрена карта-схема с наноской различных элементов наблюдений в автоматизированном режиме по Московской области (ранее делалась вручную коррект-редактором).

Сотрудниками Отдела агрометпрогнозов были разработаны новые требования по комплектованию и номенклатуре карт. В Отделе систем информационного обеспечения были сконструированы новые бланки карт в меркаторской проекции; рисуется часть территории России от 20° в.д. до 90° в.д., а внизу карты, справа, делается вставка восточной

части от 87° в.д. до 140° в.д. На карте рисуется один или два штампа с условными обозначениями. Значение наблюдаемого агрометеорологического параметра наносится в цветном квадрате, цвет заливки которого выбирается в зависимости от наносимого значения. На рис. 4 приведен пример формируемой карты минимальной температуры воздуха.

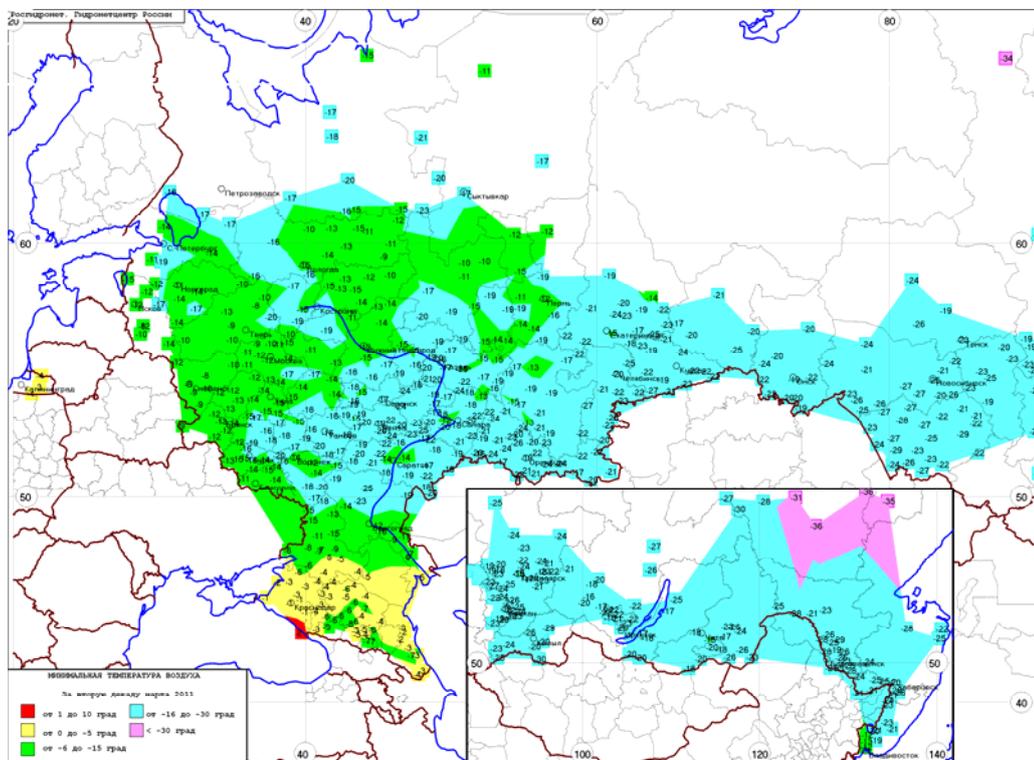


Рис. 4. Минимальная температура воздуха по территории России за вторую декаду марта 2011 года.

На картах с метеорологическими декадными наблюдениями выполняются наноска и заливка цветами, соответствующими выбранным градациям. На каждую карту наносится картографическая основа: широтно-долготная сетка, береговая линия; внешняя граница, внутренние границы (края, области и т.п.), крупные города по заданному списку, контуры крупных водных объектов (река Волга, озеро Байкал и т.п.), значения агрометеорологических наблюдений в цветном квадрате или цветной заливке. Карты готовятся в векторном графическом формате, что позволяет без существенной потери четкости изображения переносить графические образы в различные форматы хранения и отображения, включая цветную и черно-белую печать. Процесс постоянно развивается, и на данный момент внедрено построение карт 69 видов по территории России. Их количество по декадам меняется в зависимости от сезона. Перечень расчерчиваемых карт приведён в табл. 1.

Комплекс программ подготовки и рисования декадных карт включает три графических модуля: наноска в цветном квадрате значений элементов наблюдений по сельскохозяйственным культурам, возделываемым только по западной части

земледельческой зоны России, включая Новосибирскую, Томскую и Кемеровскую области; наноска в цветном квадрате значений наблюдений по сельскохозяйственным культурам, возделываемым по всей земледельческой зоне России; заливка и наноска метеорологической информации по земледельческой зоне России.

Таблица 1

Перечень расчерчиваемых карт

Номер карты	Наименование карты	Номер карты	Наименование карты	Номер карты	Наименование карты
204	Аномалия t воздуха	1	Фазы развития и оценки состояния подсолнечника	101	Средняя за декаду t почвы на глубине 10 см
2031	Средняя t воздуха – холодный период			102	Запасы продуктивной влаги под яровыми зерновыми культурами в слое почвы 0-100 см
2032	Средняя t воздуха – теплый период	3	Запасы продуктивной влаги под подсолнечником в слое почвы 0-20 см	103	Запасы продуктивной влаги под яровыми зерновыми культурами в слое почвы 0-20 см
2021	Максимальная t воздуха – холодный период				
2022	Максимальная t воздуха – теплый период	4	Запасы продуктивной влаги под подсолнечником в слое почвы 0-100 см	104	Высота ярового ячменя
2011	Минимальная t воздуха – холодный период	5	Фазы развития и оценки состояния сахарной свеклы	105	Фазы развития и оценки состояния ярового ячменя
2012	Минимальная t воздуха – теплый период	6	Запасы продуктивной влаги под сахарной свеклой в слое почвы 0-20 см	106	Высота яровой пшеницы
206	Число дней с осадками 1 мм и более			107	Фазы развития и оценки состояния яровой пшеницы
207	Кол-во осадков за декаду в % от декадной нормы	7	Запасы продуктивной влаги под сахарной свеклой в слое почвы 0-100 см	108	Фазы развития и оценки состояния картофеля
208	Сумма осадков за декаду			109	Запасы продуктивной влаги под картофелем в слое почвы 0-20 см
209	Высота снежного покрова на полях с озимыми культурами	9	Высота озимой ржи	110	Запасы продуктивной влаги под картофелем в слое почвы 0-50 см
210	Глубина промерзания почвы				
211	Толщина и площадь распространения притертой к почве ледяной корки	10	Фазы развития и оценки состояния озимой пшеницы	111	Высота картофеля
212	Средняя относительная влажность воздуха	11	Высота озимой пшеницы	112	Фазы развития и оценки состояния клевера
		12	Запасы продуктивной влаги под озимыми зерновыми культурами в слое почвы 0-100 см	113	Запасы продуктивной влаги под сеянными травами в слое почвы 0-20 см
213	Число дней с относительной влажностью воздуха 30% и менее	13	Запасы продуктивной влаги под озимыми зерновыми культурами в слое почвы 0-20 см		
214	Средний дефицит влажности воздуха	14	Фазы развития и оценки состояния кукурузы		
216	Минимальная t почвы на глубине узла кушения озимых культур (выборки из минимальных показаний прибора)	15	Высота кукурузы	115	Высота клевера
		16	Запасы продуктивной влаги под кукурузой в слое почвы 0-20 см	116	Фазы развития и оценки состояния злаковых трав
217	Минимальная t почвы на глубине узла кушения озимых культур (выборки из срочных показаний прибора)	17	Запасы продуктивной влаги под кукурузой в слое почвы 0-50 см	119	Высота злаковых трав
				18	Фазы развития и оценки состояния яблони
2051	Минимальная t на поверхности почвы (снега) – холодный период	19	Фазы развития и оценки состояния вишни	123	Высота люцерны
				20	Фазы развития и оценки состояния проса
2052	Минимальная t на поверхности почвы (снега) – теплый период	21	Фазы развития и оценки состояния гречихи	122	Высота овса
				22	Фазы развития и оценки состояния абрикоса
24	Максимальный % изреженности озимой пшеницы в пробах, взятых с полей	23	Максимальный % изреженности озимой ржи в пробах, взятых с полей	26	Средний % изреженности озимой пшеницы в пробах, взятых с полей
25	Средний % изреженности озимой ржи в пробах, взятых с полей			215	Высота снежного покрова по рейке у датчика термометра

Рабочее место установлено на все компьютеры Отдела агрометеорологических прогнозов и на два резервируемых компьютера Группы контроля оперативных технологий для выдачи цветных карт формата А3. Изменилась и технология получения карт. До дня выдачи карт, еженедельно, дежурный сотрудник Отдела по электронной почте отправляет в Группу контроля оперативных технологий стандартный бланк-заявку на рисование карт, указывая число копий каждой карты. В день декады Группа готовит полный набор необходимых в конкретную декаду карт, на формирование которого тратится не более 15 минут. На рабочих местах в Отделе агрометпрогнозов каждый сотрудник самостоятельно может получить и просмотреть все возможные виды карт или их увеличенные фрагменты, напечатать карты в форматах А4 или А3, если есть подходящий принтер. Таким образом, каждый специалист полностью обеспечен всем наглядным материалом.

Учитывая потребности в картах для регионов, для всех федеральных округов сконструированы бланки карт в стереографической или меркаторской проекциях. Для каждой карты проводится выборка входных данных, представляющая собой нерегулярную сетку, по которой выполняется триангуляция в замкнутой оболочке с последующей заливкой треугольников по заданным градациям [2]. Пример формируемой наноски данных фазы развития озимой пшеницы по территории Приволжского ФО приведён на рис. 5.

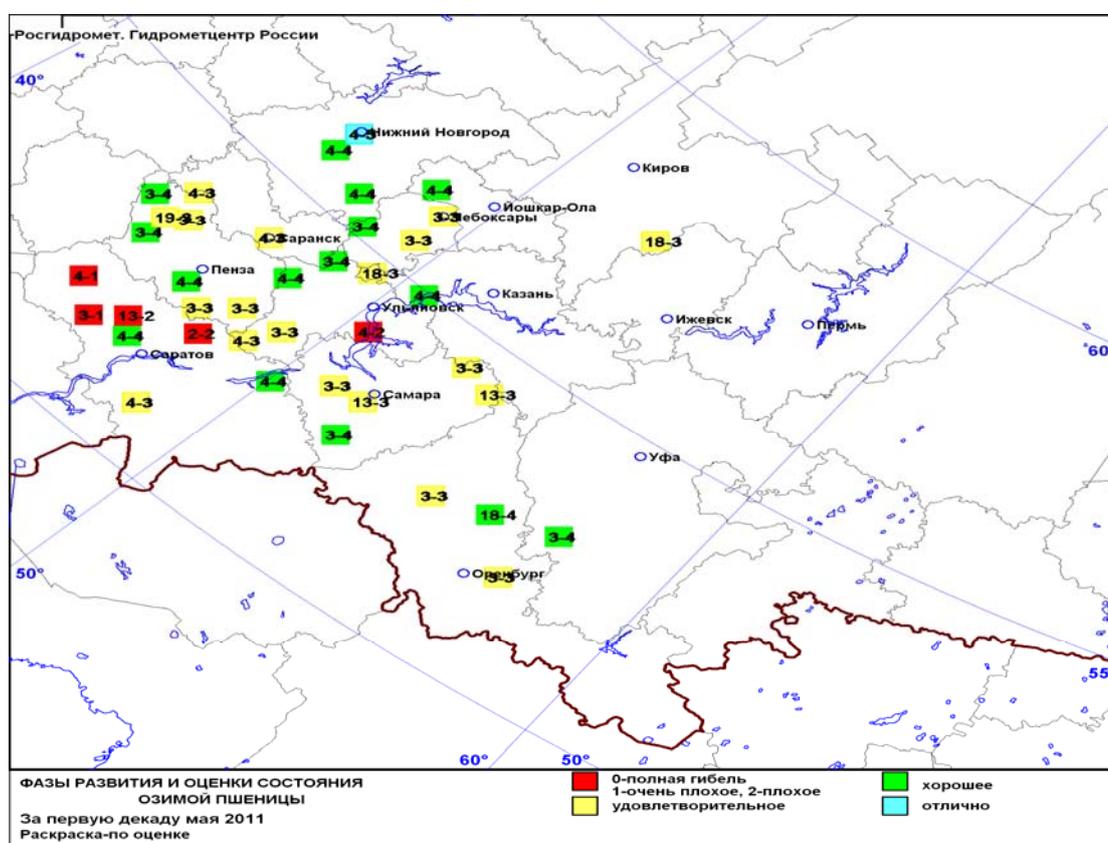


Рис. 5. Фазы развития и оценки состояния озимой пшеницы по Приволжскому федеральному округу за первую декаду мая 2011 года.

Карты готовятся по той же технологии, что и карты по России. Рабочее место формирования и выдачи карт настроено на карты по округам. Эти программные средства будут переданы в регионы, включенные в график обслуживания. Общий вид рабочего места приведен на рис. 6.

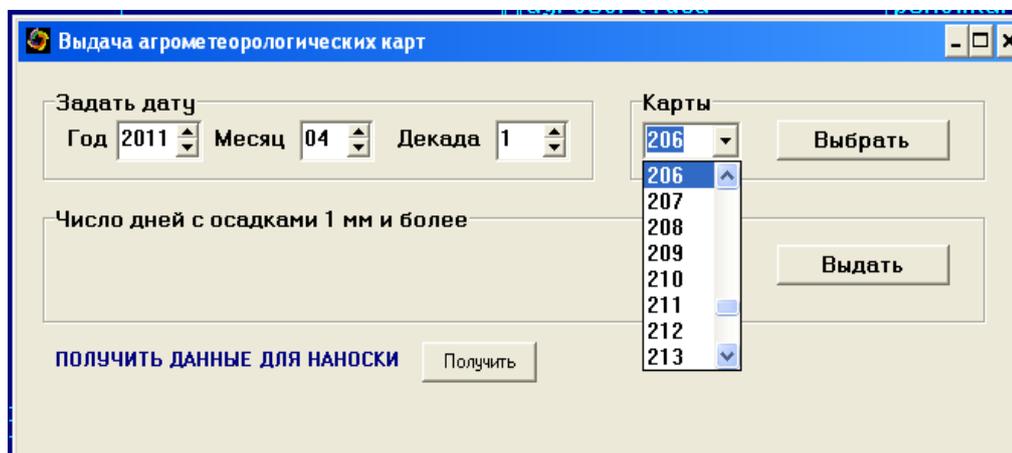


Рис. 6. Общий вид рабочего места формирования и выдачи карт.

Подведём некоторые итоги. На первом этапе обработки данные принимаются, раскодируются, хранятся 36 месяцев на сервере; каждую декаду или день на рабочих местах формируются журналы и выдаются карты. Регионы, выразившие желание подключиться к процессу, получают обработанные данные, и, используя переданное им программное обеспечение, визуализируют журналы (а в дальнейшем и карты) на местах. Во всех случаях формируются электронные архивы, на основе которых можно переходить к этапу выполнения статистических расчётов.

В 2008 году в рамках региональных работ комплекс PROMETEI был установлен в прогностических центрах в Хабаровске и Новосибирске. В 2009-2010 годах на серверы этих подразделений была перенесена технология приема, обработки и хранения агрометеорологических данных. Администраторам переданы все программные средства для работы как от локальных источников, так и в системе клиент-сервер. В 2011 году завершится переход на обеспечение всех рабочих мест в Хабаровске и Новосибирске непосредственно в рамках PROMETEI.

Этап обработки архивов

Накопление архивов наблюдений на рабочих местах позволяет рассчитывать и визуализировать целый ряд статистик. Процесс формирования такого рабочего места еще

полностью не завершён, однако уже сейчас внедрены 9 статистических таблиц и расчетов. Перечень таких таблиц приведён в табл. 2.

Таблица 2

Перечень статистических таблиц

Среднеобластные и постанционные метеоданные за декаду
Среднеобластные и постанционные метеоданные за месяц (сезон)
Постанционный мониторинг влагозапасов в слоях почвы под яровыми и озимыми зерновыми культурами с целью определения начала почвенной засухи и её распространения
Таблицы постанционных и среднеобластных влагозапасов (по сравнению с нормой) под отдельными культурами; подекадный мониторинг запасов продуктивной влаги по слоям почвы 0-20 и 0-100 см
Таблицы изреженности озимой ржи и пшеницы по результатам отращивания по субъектам РФ и федеральным округам, а также по России в целом
Расчет и формирование таблиц дат перехода температуры воздуха через 0, 5, 10, 15 °С, сумм активных температур выше 0, 5, 10 °С и эффективных температур воздуха выше 5 и 10 °С по станциям (ежедекадно)
Постанционный расчет гидротермического коэффициента (ГТК), характеризующего складывающиеся условия увлажнения по декадам и месяцам вегетационного периода, формирование среднеобластных таблиц и проведение мониторинга атмосферных засух по ГТК (ранее расчеты велись вручную).
Постанционный и среднеобластной мониторинг высоты снежного покрова, глубины промерзания почвы, минимальной температуры воздуха и минимальной температуры почвы на глубине узла кущения озимых культур для оценки условий перезимовки озимых культур
Бюллетень (зима)

Остановимся на статистических таблицах достаточно кратко. Следует отметить, что сотрудниками Отдела агрометеорологических прогнозов были выполнены объёмные работы по заведению в электронном виде большого числа словарей станций, таблиц декадных и месячных норм по температуре, осадкам, запасам продуктивной влаги в разных горизонтах, накопленных активных и эффективных температур как на станциях, так и в среднем по субъектам. Все эти рабочие материалы используются не только для анализа агрометусловий, но и при построении статистических отчетов. Общий вид рабочего места приведен на рис. 7.

Пока архив данных невелик (2 года), что не позволяет отладить и включить в процесс многие расчетные схемы, но работы не прекращаются. Принимая во внимание сложность процесса и вовлеченность в него большого числа дополнительных материалов, а также отсутствие на местах электронных архивов и малые силы сотрудников, трудно пока передать разработанное программное обеспечение на места.

Учитывая тот факт, что визуализация агроданных в виде журналов и карт может быть полезна и другим оперативно-производственным учреждениям Росгидромета, Гидрометцентр с 1 марта по 30 апреля 2011 года выкладывал фактическую декадную информацию в качестве наглядного примера на интернет-ресурс на сервере Методического кабинета Гидрометцентра России в разделе «Декадная агрометинформация». Раздел включал

все виды журналов по 71 субъекту Федерации, синоптические карты по России и сезонную номенклатуру карт по ряду Федеральных округов. Отметим, что построение карт и журналов выполняется с учетом графика поступления данных от регионов.

NAME	IDEN	NNNN	SLOY	апреля			мая			июня			июля			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
ВОЛОСОВО	26067		0-20				68	45	70	56	41					
			0-100							216						
Волгоградская обл.																
ПАЛАСОВКА	34373		0-20								5	1				
			0-100								9	3				
Башкортостан респ.																
ЯНАУЛ	28419		0-20					10	27	6	3					
			0-100					119	153	116	101					
АСКИНО	28522		0-20					30	57	26	17					
			0-100					163	255	156	96					
ЕМАШИ	28535		0-20					34	34	18	16					
			0-100					205	196	175	147					
ДУВАН	28537		0-20					22	6	18	6					
			0-100					125	32	142	34					
ВЕРХНЕЯРКЕЕВО	28613		0-20				41	30	23	38	28					
			0-100				162	142	125	145	133					
КУШНАРЕНКОВО	28624		0-20				17	28	34	13	10					
			0-100				146	168	186	130	103					
ТУЙМАЗЫ	28712		0-20				13	4	6	2	2					
			0-100				72	50	44	58	44					
ЧИШМЫ	28721		0-20					15	21	20	11					
			0-100					92	96	87	73					

Рис. 7. Общий вид рабочего места обработки архивов.

В заключение приводим общую схему обработки и распространения агрометданных в рамках программного комплекса PROMETEI Гидрометцентра России (рис. 8).

Установка данного комплекса позволила специалистам-агрометеорологам получать в более ранние сроки наиболее полную агрометеорологическую информацию, необходимую не только для повседневной оперативной работы, но и для подготовки аналитических материалов и докладов в аппарат Правительства и Президента РФ, в Министерство сельского хозяйства РФ, руководству Росгидромета, а также в органы власти Москвы и Московской области, качественно улучшить подготовку и выпуск всех аналитических агрометеорологических материалов, а также автоматизировать расчёты к прогнозам урожайности сельскохозяйственных культур, проводить подекадный мониторинг почвенных засух и условий перезимовки озимых культур в автоматизированном режиме.

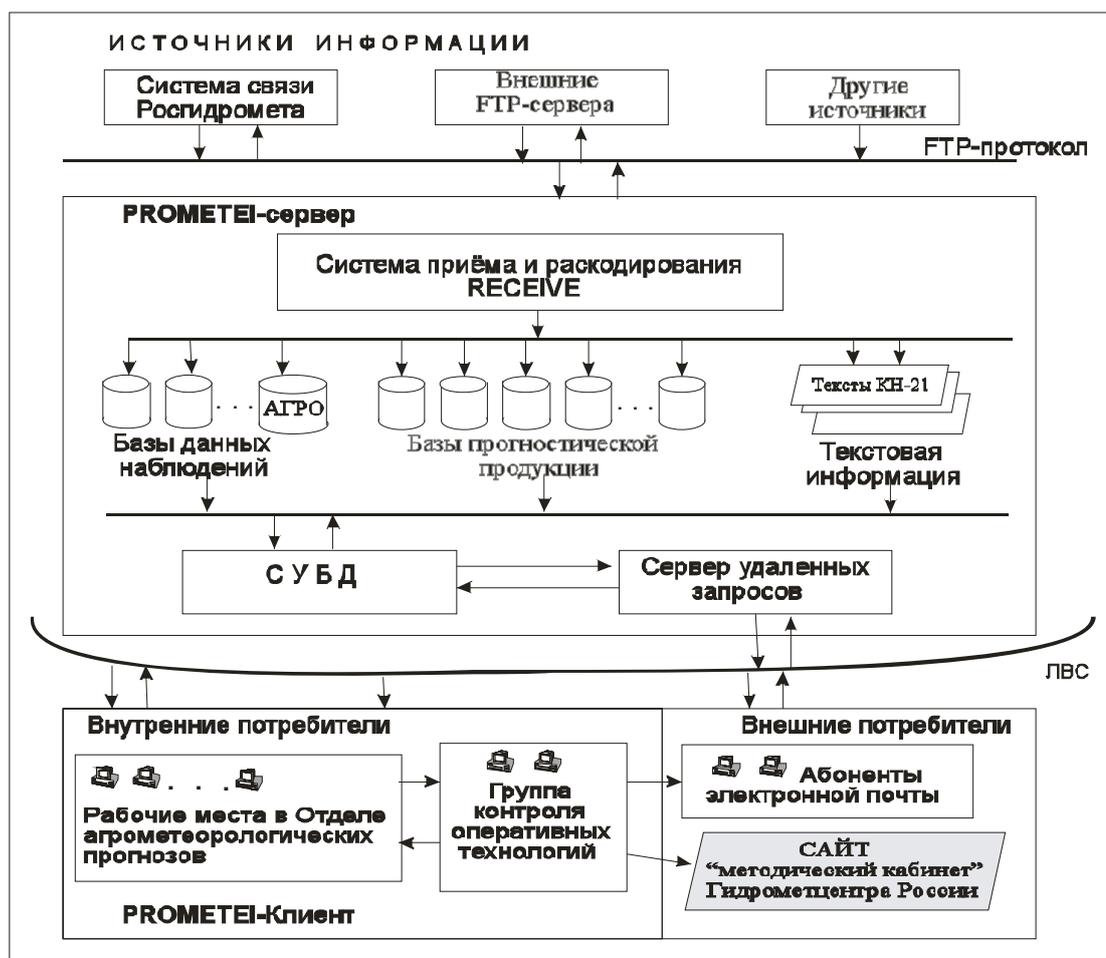


Рис. 8. Принципиальная схема комплекса обработки агрометинформации в технологии PROMETEI Гидрометцентра России.

Список использованных источников

1. Пурина И.Э., Жабина И.И., Недачина А.Ю., Дегтярёва Н.В., Маковская И.В. Развитие информационного обеспечения Гидрометцентра России на базе технологического комплекса PROMETEI // В сб.: «80 лет Гидрометцентру России». – 2010. – М., ТРИАДА лтд, 2010. – С. 423–434.
2. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение.– Томск: Издательство Томского университета. – 2002. – 124 с.
3. Страшная А.И. Состояние и проблемы оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства на федеральном уровне в условиях глобального изменения климата // Труды ВНИИСХМ. – 2007. – Вып. 36. – С. 78–91.
4. Страшная А.И., Русакова Т.И., Зоидзе Е.К. Развитие системы оперативного агрометеорологического обеспечения аграрного сектора экономики // В кн.: «Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России». – Обнинск, 2009. – С. 306–330.

Поступила в редакцию 20.05.2011 г.

ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО ВЫПУСКА ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОГНОЗОВ НА 1–10 СУТОК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ T169L31 (шаг сетки 60–70 км) НА НОВОЙ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКЕ ММЦ МОСКВА

*И.А. Розинкина, Е.Д. Астахова, Т.Я. Пономарева, В.И. Цветков,
Ю.В. Алферов, Д.В. Васькова*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
inna@mecom.ru, helen@mecom.ru, tsvetkov@mecom.ru, alferov@mecom.ru*

Введение

В период 2008–2010 гг. одним из наиболее ответственных участков деятельности в области развития технологий численного прогноза были работы по организации новой оперативной технологии глобального средне- (кратко-) срочного прогноза на основе модели атмосферы T169L31 (с шагом сетки для вычисления нелинейных и неадиабатических слагаемых 60–70 км по горизонтали), включающей разработанные ранее [1] приемы распараллеливания на новых вычислительных платформах ММЦ Москва, введенных в эксплуатацию в результате технической модернизации Росгидромета в 2007–2009 гг. Разработанная новая технология на основе модели T169L31 по функциям заменила предшествующую, построенную на основе эксплуатации версии спектральной модели T85L31 с шагом 120–140 км.

При реализации данной технологии была произведена «реконструкция» всего программного комплекса «Спектральная модель». Основными идеями построения обновленной технологии была реализация гибких настроек, возможности работы с различными источниками данных, включение в общую технологию обновленного распараллеленного модуля с облегченными процедурами настроек на различное пространственное разрешение, реализация технологических решений, обеспечивающих максимальную устойчивость работы программного комплекса (даже при сбоях вычислительной техники). Необходимость смены вычислительных платформ при создании новой технологии обусловило выполнение приемов по обеспечению портативности модулей, в настоящее время практически машинно-независимых.

Ниже приводится описание построенного обновленного программного комплекса.

Описание технологической цепочки

А. Структура технологии и назначение ее компонент

Реализованная на новой суперкомпьютерной технике технологическая цепочка программного комплекса (ПК) «Спектральная модель» «унаследовала» структуру предшествующих разработок предыдущих версий данного ПК (например, на основе модели T85L31, [5]). Общая схема ее функционирования показана на рис. 1. Технология состоит из следующих компонент:

– Компонента «Препроцессинг»: выбор и чтение информации объективного анализа метеорологических наблюдений из оперативных пользовательских баз данных (БД) Гидрометцентра России для дальнейшего преобразования в структурированную заданным образом информацию, необходимую для старта и работы модели атмосферы. При этом резервируется несколько источников входной информации (баз данных) для обеспечения возможности работы технологии в случае отсутствия основного источника данных из-за сбойных ситуаций.

– Компонента «Модель»: расчеты значений совокупности метеорологических характеристик путем интегрирования по времени уравнений модели атмосферы с записью результатов в выходные файлы каждые 6 часов модельного интегрирования для узлов вычислительной сетки модели (в сигма-системе вертикальных координат до высоты 10 гПа на 31 уровне с шагом $0,7^\circ \times 0,7^\circ$).

– Компонента «Постпроцессинг»:

а) преобразование рассчитанных моделью значений в характеристики, необходимые пользователям – перевод в другие системы вертикальных координат, интерполяция в узлы стандартных регулярных широтно-долготных сеток, расчеты по диагностическим соотношениям, статистическая коррекция результатов расчетов;

б) запись в оперативные пользовательские БД прогностической информации в узлах как модельной, так регулярной сеток. В результате в БД поступают численные прогнозы для Северного и Южного полушарий: полей геопотенциала, температуры, относительной влажности, скорости ветра на стандартных изобарических поверхностях, давления на уровне моря, осадков и облачности различного генезиса, приземной температуры и влажности воздуха, скорости ветра и т.д. На модельной сетке, помимо полей в свободной атмосфере и перечисленных элементов погоды, в БД записывается ряд дополнительных характеристик, важнейшими из которых являются поля компонент теплового и радиационного балансов на поверхности Земли и на верхней границе атмосферы.

– Компонента «Расчет оценок прогноза»: оценка успешности прогнозов, выпущенных за предшествующие сроки при работе технологии в оперативном режиме. При работе

технологии в исследовательском режиме расчет оценок осуществляется для прогноза за срок, по которому был осуществлен численный эксперимент. Запись результатов оперативных оценок в пользовательские БД.

Б. Общая схема функционирования

Для вычисления оперативных прогнозов по заданному исходному сроку в рамках ПК «Спектральная модель» требуется предшествующее выполнение целого ряда задач сеанса обработки информации за этот срок в рамках АСОИИ [2, 3] (поддержка оперативных баз данных ФГБУ «Гидрометцентр России», первичный контроль и размещение в БД информации метеорологических наблюдений, декодирование информации прогнозов полей метеоэлементов и объективных анализов зарубежных метеорологических центров, выполнение процедур объективного анализа (ОА) Гидрометцентра России, запись результатов ОА в БД). Эти задачи решаются в рамках других технологических процессов ФГБУ «Гидрометцентр России», и их итогом является оперативное размещение необходимой для расчетов по технологии глобального моделирования информации о метеорологических характеристиках на 16 стандартных изобарических поверхностях в узлах широтно-долготной сетки $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ в БД Гидрометцентра России.

Итогом технологической цепочки ПК «Спектральная модель» является поступление прогностических метеополей в оперативную БД Гидрометцентра России.

Технология ПК «Спектральная модель» функционирует на высокопроизводительных компьютерах в среде операционной системы Linux, в настоящее время – на суперкомпьютере SGI ALTIX4700.

С 2009 года управление последовательностью выполнения различных компонент Технологии («Препроцессинг», «Модель», «Постпроцессинг», «Расчет оценок прогноза») осуществляется с помощью команды `crontab`, создающей список таблиц для управления демоном `cron` [7]. Демон `cron` запускает соответствующие сценарии, управляющие выполнением отдельных компонент технологии. Программное обеспечение написано на языках FORTRAN и СИ. Технология обеспечивает возможность параметрической настройки на возможности вычислительной техники и информационного обеспечения: требуется ли распараллеливание по процессорам, как производить запуск задач, какие БД с начальной и выходной продукцией использовать и т.д. Настраиваемые параметры задаются во внешних файлах.

Основные характеристики и временные рамки функционирования компонент Технологии представлены в табл. 1.

Время старта компоненты «Препроцессинг» должно быть согласовано с временем готовности данных объективного анализа Гидрометцентра России за соответствующий стандартный метеорологический срок, а также временем, которое требуется для обеспечения расчетов по модели для того, чтобы «успеть» к моменту формирования продукции для распространения пользователям. Существуют сроки ограничения целесообразности оперативной численной продукции, установленные регламентами выпуска прогнозов и распространения численных прогнозов по каналам связи. Выпуск краткосрочных численных прогнозов после этих сроков, по сути говоря, мало полезен, поскольку информация расчетов не успеет попасть для анализа к синоптикам, составляющим прогнозы погоды. С другой стороны, поскольку данные наблюдений радиозондирования для верхних слоев атмосферы могут запаздывать от срока наблюдений до часа, более полные комплекты данных наблюдений анализируются по более поздним сеансам объективного анализа. Использовать более полную информацию объективного анализа и, следовательно, получать более высокую успешность численных прогнозов, оказывается возможным при сокращении времени расчетов модели (например, путем применения приемов оптимизации вычислений и распараллеливания алгоритмов).

В результате реализации таких алгоритмов и успешного размещения технологии на суперкомпьютере SGI ALTIX4700 удалось добиться сочетания достаточно «позднего» старта (3.10 ч ВСВ) с формированием продукции до 4.00 ч ВСВ (8.00 Московского времени), имея в запасе примерно 2 часа до срока ограничения целесообразности модельной продукции. Таким образом, поступление продукции вычислений по данной отечественной системе значительно опережает поступление продукции из зарубежных центров по тому же исходному сроку вычислений.

Базовой информацией для работы компоненты «Препроцессинг» являются результаты другой Технологии Гидрометцентра России – объективного анализа о текущем состоянии атмосферы. Работа этой Технологии осуществляется в рамках централизованной системы АСООИ Гидрометцентра России, и результаты ОА размещаются в оперативных базах данных Гидрометцентра России, поддерживаемые также средствами АСООИ на других компьютерах Гидрометцентра России. Предполагается, что к моменту старта модели эти данные в базах данных размещены.

В силу технологических особенностей состояния вычислительной техники Гидрометцентра России и Главного Вычислительного Центра, сложившихся к 2011 году, Технология «Спектральная модель» оказалась изолированной от системы АСООИ Гидрометцентра России, поэтому потребовалось включение в компоненту «Препроцессинг» ряда процедур, обеспечивающих контроль за наличием информации ОА в базах данных и

отмену всего сеанса в случае отсутствия информации из-за технологических сбоев. В таких ситуациях перезапуск задачи осуществляется операторами повторно вручную через один час.

Результатом работы компоненты «Препроцессинг» является стартовый набор данных `initial.dat` для последующего использования его компонентой «Модель» и набор полей высот геопотенциальных поверхностей в узлах расчетной гауссовой сетки `height.gau` для последующего использования компонентой «Постпроцессинг» в качестве первого приближения в алгоритмах вертикальной интерполяции результатов моделирования.

После завершения задачи «Препроцессинг» одновременно стартуют задачи «Модель» и «Постпроцессинг». Программное обеспечение задачи «Модель» распараллелено с помощью технологии MPI и с использованием библиотек SHMEM, задача выполняется на 32 процессорах, количество процессоров можно изменять внешними настроечными параметрами.

Задачи «Модель» и «Постпроцессинг» выполняются одновременно, т.е. обработка полученных прогнозов для более ранних заблаговременностей выполняется на фоне продолжающегося интегрирования модели атмосферы. Реализован механизм, обеспечивающий обмен информацией между процессами. (При этом в задаче «Модель» за этот межпроцессный обмен с задачей «Постпроцессинг» отвечает «нулевой» процесс MPI). Таким образом, по мере подготовки прогнозов происходит их немедленное поступление в базы данных, и пользователи имеют доступ к краткосрочным прогнозам, не дожидаясь окончания вычислений для более отдаленных заблаговременностей (до 10 суток). Такая организация счета и распространения продукции обусловлена требованиями высокой степени оперативности, предъявляемыми к информации, необходимой для выпуска синоптических прогнозов погоды, а также достаточно высокими вычислительными затратами, необходимыми для выполнения ПК.

Совокупность заблаговременностей прогнозов, которые требуется обрабатывать и записывать в базы данных, задаются параметрами во внешних файлах Технологии (задаются номера соответствующих модельных шагов по времени). Как только интегрирование задачи «Модель» достигает любого из параметрически заданных шагов по времени, происходит запись результатов счета, полученных на этом шаге интегрирования в так называемые архивные (History) файлы. Сразу же после окончания записи «Постпроцессинг» начинает обработку информации, содержащейся в текущем архивном файле. Таким образом, результаты работы задачи «Постпроцессинг» поступают в пользовательские базы данных по мере интегрирования модели.

Компонента «Расчет оценок прогноза» запускается по окончании счета постпроцессинга и оценивает качество прогнозов, стартовавших за 10 суток до текущего срока и содержащихся в соответствующих БД, по отношению к результатам ОА Гидрометцентра России.

Особенности реализации технологии

Остановимся на отдельных особенностях обновленной и адаптированной к расчетам на многопроцессорной технике технологии глобальной спектральной модели атмосферы.

А. Гибкость конфигурации

Настройка конфигурации и пространственного разрешения. В результате выполненной модернизации программного обеспечения комплекса «Спектральная модель» была достигнута и протестирована возможность изменения пространственного разрешения модели на уровне внешних параметров, без модификации кода. Достаточно только изменить используемое число гармоник и размеры сетки, задаваемые в качестве параметра во всех частях технологии, и перетранслировать все программы. Были подготовлены тестовые версии модели для конфигураций T339L31, T669L31. Информация о конфигурации, а именно параметр, определяющий область интегрирования (1 – глобус, 2 – полусфера), число сигма-уровней и спектральное усечение, должна быть записана в файл *mode.dat*, создаваемый компонентой «Препроцессинг». Кроме того, аналогичная информация размещается в инструкции *parameter*, вставляемой в тексты программ при их компиляции. Файл *mode.dat* используется только для диагностических целей, а именно для проверки идентичности конфигурации во всех частях технологии.

Настройка режима вычислений модели. Для работы технологии необходимо предварительно с помощью любого текстового редактора задать настроечные параметры в файле *sdslst*: логические переключатели, включающие или исключающие отдельные параметризации физических процессов и управляющие печатью; некоторые константы – номера шагов для выдачи результатов, продолжительность интегрирования по времени; коэффициент горизонтальной диффузии, частота вызова радиационного блока, и т.д. Этот файл используется компонентами «Модель» и «Постпроцессинг».

Б. Применение приемов распараллеливания в компоненте «Модель»

Программное обеспечение компоненты «Модель» включает в себя более 130 программ, написанных на языках Фортран и Си [5]. На рис. 2 приведена блок-схема программного

комплекса, демонстрирующая его структуру. Рис. 3 дает представление об организации шага по времени в модели.

Программное обеспечение глобальной спектральной модели (ПО) распараллелено с помощью технологий MPI и с использованием библиотек SHMEM. Так как одним из современных требований к ПО является его портбельность, в тексты программ модели внесены директивы препроцессора, позволяющие с помощью условной компиляции обеспечить функционирование компоненты «Модель» на вычислительных системах, на которых не установлен MPI и/или нет библиотек SHMEM. Ниже описано функционирование MPI версии. Версия с библиотеками SHMEM отличается только программами, используемыми для коллективных операций (например, вместо **mpi_allreduce** используется **shmem_real8_sum_to_all**). Разработанная версия программного кода основана на динамическом распределении памяти в зависимости от числа используемых процессоров, таким образом, не требуется перекомпиляция программ при изменении числа используемых процессоров.

Также в тексты программ модели внесены директивы препроцессора, позволяющие для ускорения вычислений использовать ряд программ из математической библиотеки Intel Math Kernel Library (например, программы быстрого преобразования Фурье или умножения матриц). В случае отсутствия соответствующей библиотеки используются авторские программы.

Головная программа задачи – **model**. В ней инициализируются программы MPI путем вызова подпрограммы (п/п) **mpi_init**, для всех MPI процессов открываются файлы, необходимые для работы модели, считывается дата исходных данных для прогноза и вызывается управляющая программа задачи «Модель» **monitr**. После окончания п/п **monitr** выполняется диагностическая печать и завершается работа MPI путем вызова п/п **mpi_finalize**. На этом работа компоненты «Модель» заканчивается.

Начиная с п/п **monitr**, далее идет несколько программ, выполняющих предварительные действия – считывание данных из настроечных файлов, инициализацию переменных в общих блоках, диагностические печати.

Подпрограмма **monitr** сохранена с предыдущих версий модели для поддержания «наследственности» в ПО. Она организует работу системного таймера для фиксации времени выполнения задания, вызывает программу **spectr** и осуществляет печать кодов завершения этой задачи.

П/п **spectr** производит печать заголовков; считывает файл **mode.dat**, содержащий информацию о версии задачи (область интегрирования, спектральное усечение модели, число уровней по вертикали) и проверяет ее соответствие с аналогичными параметрами,

использованными при подготовке исполняемого файла модели; из настроечного файла считывается информация о пути для записи архивных файлов. После этого вызывается п/п **master**.

П/п **master** вызывает п/п **daytim** для вывода текущей даты и времени, п/п **basic** для считывания некоторых настроечных файлов и инициализации ряда переменных, входящих в общие блоки. Затем вызывается п/п **cotrol**.

П/п **cotrol** является основной программой, управляющей вычислениями в задаче «Модель». В ней осуществляются следующие действия:

- Вызов подпрограммы **aprdin**, считывающей константы, необходимые для работы нелинейной инициализации по нормальным модам (НИНМ), из настроечного файла *inilst* и инициализирующей ряд переменных в общих блоках.

- Вызов подпрограммы **inital**, выполняющей:

- считывание настроечных файлов и инициализацию переменных, входящих в общие блоки (п/п **datcom** и **datini**);

- некоторые предварительные действия для работы НИНМ (в п/п **apnmcl**);

- динамическое размещение массива **buf**, в котором будут находиться практически все переменные, используемые при вычислениях на каждом шаге по времени, а также рабочие массивы и результаты вычислений, которые необходимо сохранять для использования на следующих шагах; динамическое размещение и инициализация массивов, содержащих константы, зависящие от числа используемых MPI процессов и необходимые для распределения работы между ними (п/п **allocnranrb** и вызываемая из нее п/п **readr_MPI**);

- считывание набора исходных данных о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности, подготовленных блоком препроцессинга (п/п **inidat**);

- вызов подпрограммы **stpini** (при задании переключателя $NSJOHA=1$), выполняющей НИНМ.

Процедура НИНМ – итерационная, число итераций определяется в настроечном файле *inilst*, на каждой итерации выполняется шаг по времени модели атмосферы в режиме отключения блоков физических параметризаций. Подпрограмма **stpini** очень похожа на п/п **stepon**, управляющую выполнением шага по времени при численном интегрировании модели и рассматриваемую ниже. Но после выполнения шага по времени проводится коррекция полученных спектральных полей с помощью п/п **nelinl**, лишь после этого восстанавливаются поля на сетке.

- Вызов подпрограммы **stepon** – выполнение шага по времени (подробно рассмотрен ниже). В конце этой п/п номер шага увеличивается на 1 и проверяется на равенство количеству требуемых для выполнения шагов. Если нет – возвращаемся к началу п/п **stepon**,

иначе вычисления заканчиваются. Вычисления в подпрограммах, вызываемые из **stepon**, распределены между процессорами средствами MPI.

Организация шага по времени

Решение уравнений модели основано на спектрально-сеточном методе. Основные переменные модели аппроксимируются усеченными сходящимися рядами, построенными на базисе ортогональных функций, при решении полученных уравнений часть вычислений проводится в спектральном пространстве (т.е. со спектральными коэффициентами), а часть, включая вычисление нелинейных динамических слагаемых основных прогностических уравнений и эффектов физических процессов подсеточного масштаба, в сеточном пространстве (в узлах сетки). На рис. 3 и 4 приведено схематичное изображение шага по времени в модели. На рисунке буквы G или S показывают, что на данном этапе вычисления проводятся в сеточном или спектральном пространстве. Запись $G \rightarrow S$ (или $S \rightarrow G$) означает, что в этом месте осуществляется переход из сеточного пространства в спектральное (или наоборот). На каждом временном шаге производятся расчеты для трех моментов времени, что показано индексами $t-1$, t , $t+1$.

Особенности временных регламентов оперативного счета ПК «Спектральная модель» T169L31 в 2009-2010 гг.

Время разработки Технологии совпало с переходным периодом освоения новой компьютерной техники в Гидрометцентре России, программный комплекс «Спектральная модель» был реализован на нескольких компьютерах. В 2010 г. комплекс был полностью реализован на суперкомпьютере SGI ALTIX4700. Табл. 2, содержащая информацию о временных регламентах выполнения технологии на различных компьютерах в мае 2010 г., иллюстрирует эффективность перевода вычислений на новую технику.

В таблице также представлен временной регламент старой, оперативно функционирующей модели T85L31 на ЭВМ Xeon4b. Ниже приводятся характеристики упомянутых в табл. 2 ЭВМ, на которых производятся оперативные вычисления ПК «Спектральная модель».

Анализ затрат общего времени счета ПК «Спектральная модель» на различных компьютерах Гидрометцентра России, май 2010 г.

	Хеон4b	node1	Tiger	SGI ALTIX4700
Версия модели	T85L31	T169L31	T169L31	T169L31
Срок 00 ч ВСВ, заблаговременность 84 ч				
Начало счета	02:20	03:01	04: 31	03:10
Время счёта	1 ч 20 мин	3 ч 50 мин	2 ч 30 мин	12 мин
Готовность	03:40	06:47	07:00	03:22
Срок 12 ч ВСВ, заблаговременность 240 ч				
Начало счета	14:20	15:01	16: 31	15:10
Время счёта	3 ч 55 мин	8 ч 30 мин	6 ч 45 мин	34 мин
Готовность	18:20	23:40	23:20	16:20

Хеон 4b:

- процессор – 4 процессора Хеон MP с тактовой частотой 2.0 ГГц
- объем общей оперативной памяти – 4 Гб
- дисковая подсистема - 176 Гб
- L1/L2/L3 кэш – 8/512/2048 Кб

SGI ALTIX4700:

- процессор – 832 двухядерных процессоров Intel Itanium 2 с тактовой частотой 1.66 ГГц
- пиковая производительность 11 ТФлопс
- объем оперативной памяти – 8 Гб на процессор
- L3 кэш 18 Гб на процессор
- дисковая подсистема - 56 Тб
- 64 процессора с общей памятью на узел
- интерконнект – NUMALink

“Tiger” :

- процессор – 4 процессора Intel Itanium 2 с тактовой частотой 1.6 ГГц
- L3 кэш 9 Мб
- объем оперативной памяти – 8 Гб
- дисковая подсистема – 140 Гб

“node1” – 1 узел вычислительной системы Гидрометцентра России:

- процессор – 2 четырехядерных процессора Quad-Core Intel Xeon5345 с тактовой частотой 2.33 ГГц
- объем общей оперативной памяти 32 Гб
- L1/L2 кэш: 32/4096 Кб
- дисковая подсистема – 400 Гб

Из таблицы очевидно принципиальное преимущество счета на суперкомпьютерной технике по сравнению с используемыми в Гидрометцентре России менее мощными машинами. Так, время счета T169L31 на SGI ALTIX4700 оказалось примерно в 10 раз меньше, чем на используемых до этого ЭВМ «Tiger» и «node1».

В частности, это обстоятельство позволит начинать счет модели после срока отсечения процедур объективного анализа 3.30 ч ВСВ, учитывающего наиболее полно поступающую информацию, особенно – данные радиозондирования верхних уровней. Это должно способствовать дополнительному повышению успешности численных прогнозов

Результаты мониторинга успешности прогнозов базовых метеополей по спектральной модели Гидрометцентра России в 2009-2010 гг.

В табл. 3 (а-г) представлены осредненные за 2009 и 2010 гг. показатели успешности прогнозов по моделям T85L31 (2009 г.), T169L31 (2009 г.), T169L31(2010 г.) (данные для T85L31 заштрихованы). Значимых различий между значениями успешности T85L31 для 2009 и 2010 гг. зафиксировано не было, поэтому в таблице для T85L31 приведены только оценки за 2009 г. Данные, приведенные в таблице, позволяют судить об эффективности изменения разрешения и внесенных при эксплуатации T169L31 настроек и изменений (за время авторской эксплуатации T169L31 были внесены изменения, касающиеся в основном подготовки стартовой информации и параметров горизонтальной диффузии). Однако технологические изменения информационного обеспечения, связанные с переходом на новые вычислительные платформы в этот период, несколько «затушевывают» результаты перехода на новое пространственное разрешение.

Как следует из таблиц, успешность прогнозов практически для всех рассмотренных базовых метеополей повысилась как при повышении горизонтального разрешения модели, так и при последующих дополнительных усовершенствованиях. Для большинства прогностических полей в свободной атмосферы наблюдалось повышение периода полезного прогноза на 0,5–1,0 сутки (составив, в среднем, для полей в нижних слоях 3-4 суток и для полей в средней и верхней атмосфере 5-6 суток) . Внутри интервала полезного прогноза наблюдалось повышение успешности, эквивалентное увеличению заблаговременностей не менее 12 ч. Наиболее отчетливо выигрыш перехода на T169L31 был замечен в показателях, оценивающих конфигурацию полей (в коэффициентах корреляции и градиентной ошибке). Так, среднегодовые значения коэффициента корреляции фактического и прогностического полей высоты изобарической поверхности 500 гПа для прогнозов на 24 ч достиг 99 %. Однако повышение пространственного разрешения в первую очередь сказалось на успешности прогнозов с заблаговременностью до 5-6 суток. При этом, как правило, наиболее

ощутимый выигрыш достигался к третьим суткам прогноза, после чего он уменьшался и даже нивелировался к 10-м суткам. Этот выявленный факт требует дальнейшего детального изучения, по всей видимости, в первую очередь – особенностей влияния обратных связей при действии неадиабатических источников тепла и при взаимодействии с подстилающей поверхностью, следовательно, внесения соответствующих изменений в алгоритмы физических параметризаций модели атмосферы.

Среди прогнозов различных метеоэлементов в свободной атмосфере наибольший эффект был достигнут при краткосрочном (до 72 ч) прогнозировании скорости ветра. Это связано с более высокой детализацией очагов сильных ветров на струях при более высоком разрешении модели атмосферы. Ощутимый эффект был получен при прогнозировании скорости ветра на 24 ч на уровне 250 гПа, важнейшем для обслуживания авиации (ошибка прогноза (модуль векторной разности) была уменьшена с 7,4. до 6,5 м/с).

С другой стороны, оказалось, что повышение модельного горизонтального разрешения неоднозначно повлияло на успешность прогнозирования метеополей в тропиках, в отдельных случаях ошибки прогнозов по версии T169L31 увеличились по сравнению с T85L31. Наиболее вероятная причина, по-видимому, заключается в том, что при повышении разрешения (в версии T169L31), с одной стороны, наблюдалась локализация прогностической ВЗК с более близкими к реальности областями, занятыми мощной облачностью, а с другой – произошло повышение интенсивности осадков в отдельных ячейках (вследствие сокращения модельных площадей их выпадения). Это привело к очень сильным локальным выбросам скрытой теплоты при действии конвективных процессов в тропиках. По всей видимости, это свидетельствует о необходимости замены или усовершенствования схемы проникающей конвекции, соответствующей более высокому пространственному разрешению.

Анализ карт вырабатываемых метеополей показал на очевидную эффективность перехода на более высокое разрешение, в первую очередь, для краткосрочного прогнозирования пространственного распределения полей ветра, осадков, облачности и приземной температуры воздуха. Такие закономерности типичны при повышении пространственного разрешения моделей атмосферы, аналогичные выводы были получены при увеличении горизонтального разрешения с T40L15 до T85L31 [8]. Для всех перечисленных метеоэлементов наблюдается более четкая локализация очагов с более высокими значениями, что наиболее важно, например, при прогнозировании штормовых усилений ветра над акваториями океанов и морей, струйных течений, зон фронтов с сильными осадками.

Выводы

В 2009–2010 гг. на новой суперкомпьютерной технике ММЦ Москва был реализован обновленный программный комплекс расчета глобальных гидродинамических прогнозов на краткие и средние сроки на базе версии глобальной спектральной модели ФГБУ «Гидрометцентр России» Т169L31 (ПК «Спектральная модель»).

В технологическом плане, по сравнению с оперативно функционирующей версией Т85L31, были выполнены изменения, касающиеся организации автоматизированных оперативных вычислений компонент комплекса, использования приемов распараллеливания алгоритмов вычислений при интегрировании уравнений модели (главным образом по принципу широтной декомпозиции), расширения параметрических возможностей управления конфигурацией модели и сеансов счета.

Реализация новой технологии на суперкомпьютерной технике позволила значительно сократить время, необходимое для оперативных прогнозов, и ввести в оперативную эксплуатацию версию модели с более высоким разрешением Т169L31. Выполненный мониторинг успешности прогнозов подтвердил увеличение продолжительности периода полезного прогноза на 12–24 часа для различных метеополей и значимое повышение качества прогнозов для заблаговременностей внутри этого интервала. Изменение технологии привело к наиболее очевидным преимуществам в прогнозировании таких метеополей, как скорость ветра, осадки, облачность, приземная температура воздуха, главным образом из-за лучшей локализации очагов с максимальными значениями. В то же время, выявлена необходимость адаптации схем параметризаций физических процессов в целях более эффективного повышения успешности прогнозов в тропиках и на заблаговременностях свыше 5-6 суток – для всех районов Земного шара.

Авторы статьи выражают благодарность А.Е. Никитину за ряд ценных замечаний по интерпретации результатов мониторинга успешности прогнозов.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках Фиральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы» по составной части темы «МЕГАПОЛИС – интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

Список использованных источников

1. *Астахова Е.Д., Алферов Ю.В.* Опыт использования параллельных алгоритмов в спектральной модели среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – Т. 8. – С. 138-146
(http://num-meth.srcc.msu.su/zhurnal/tom_2007/v8r117.html).
2. *Жабина И.И., Пурина И.Э., Степанов Ю.А., Чекулаева Т.С.* Новые оперативные технологии обработки данных и управления прикладными программами с использованием суперЭВМ CRAY // В сб.: «70 лет Гидрометцентру России». – СПб. Гидрометеоиздат, 1999. – С. 90–117.
3. *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.
4. *Недачина А.Ю.* Удаленный доступ к базам данных суперЭВМ CRAY Y-MP8E с рабочих станций и ПЭВМ локальной сети // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 334. – С. 148–153.
5. *Розинкина И.А., Алферов Ю.В., Астахова Е.Д., Пономарева Т.Я., Цветков В.И.* Глобальная оперативная спектральная модель Гидрометцентра Росси: основные характеристики и особенности использования в технологиях кратко- и среднесрочного прогноза // В сб.: «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. *Стивене Р., Раго С.* UNIX. Профессиональное программирование. – СПб.: Символ-Плюс, 2007. - 1040 с.
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.

Поступила в редакцию 30.06.2011 г.

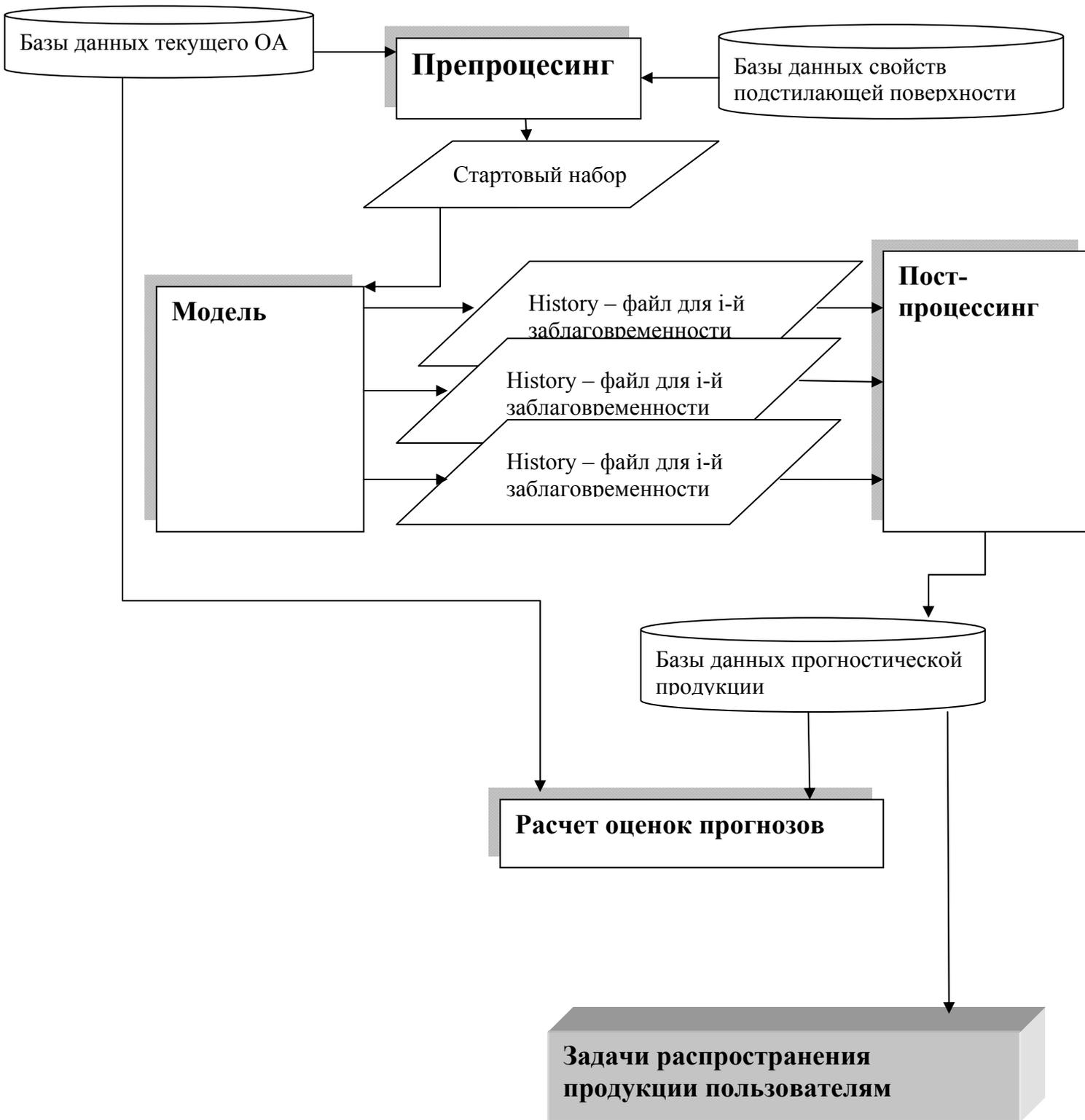


Рис. 1. Структура ПК «Спектральная модель».

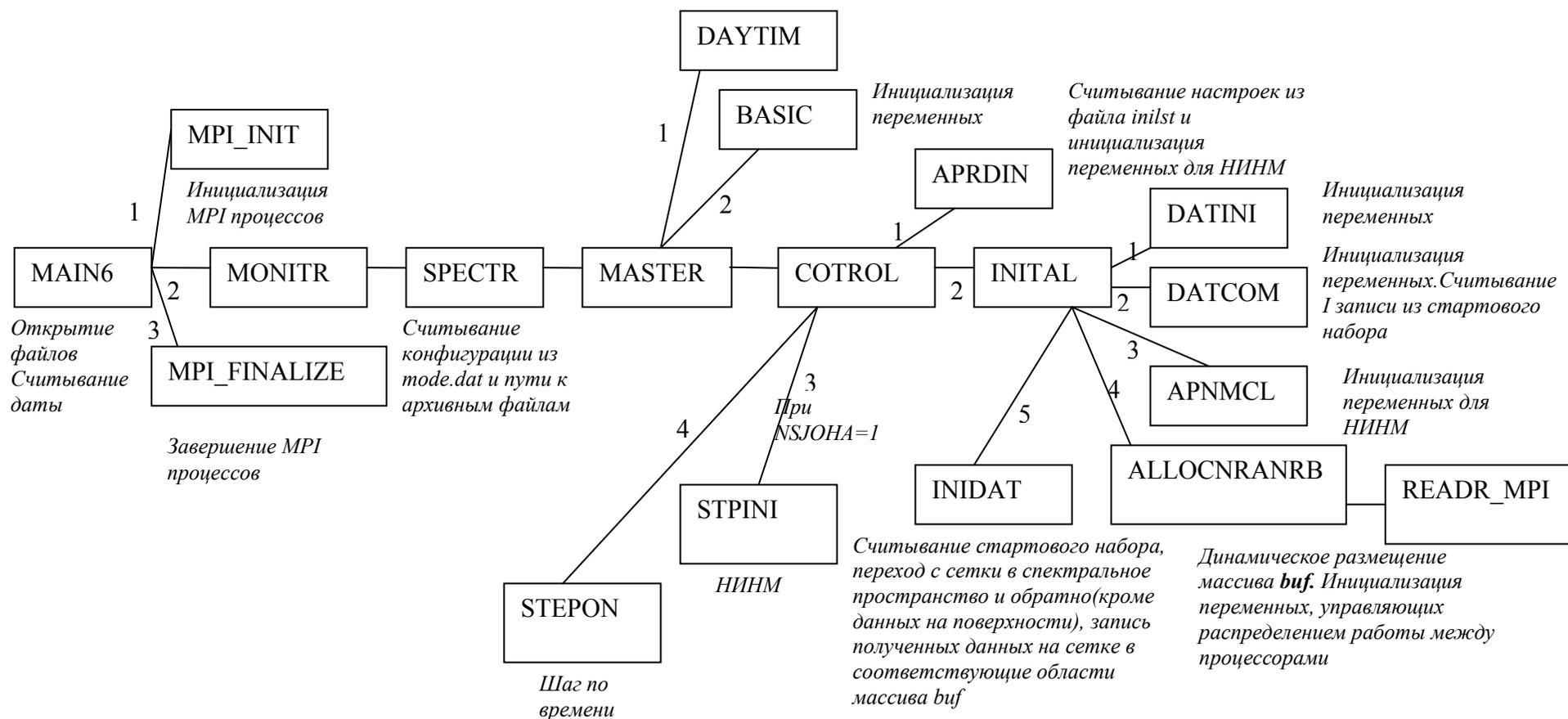


Рис. 2. Блок-схема компоненты «Модель атмосферы». Цифры на рисунке показывают порядок вызова подпрограмм.

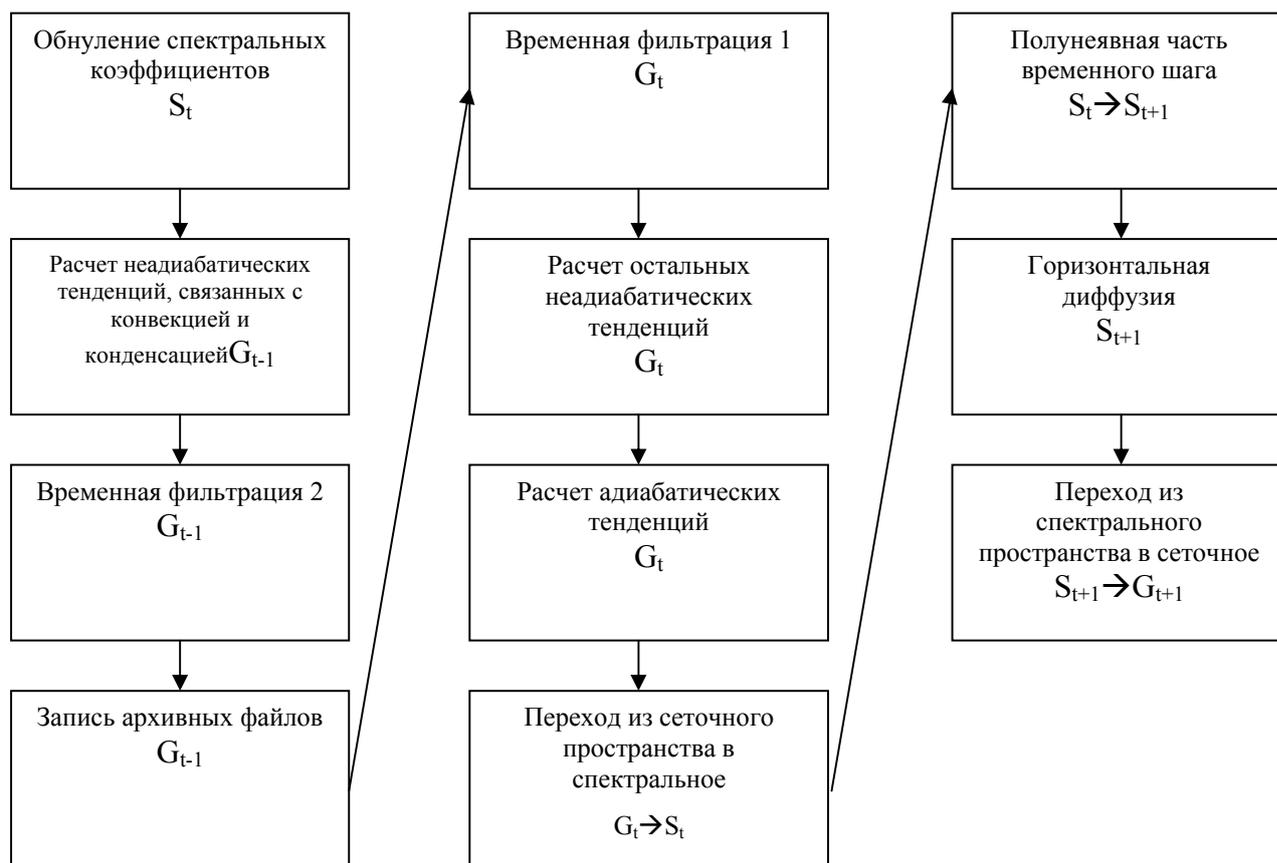


Рис. 3. Структура шага по времени модели атмосферы.

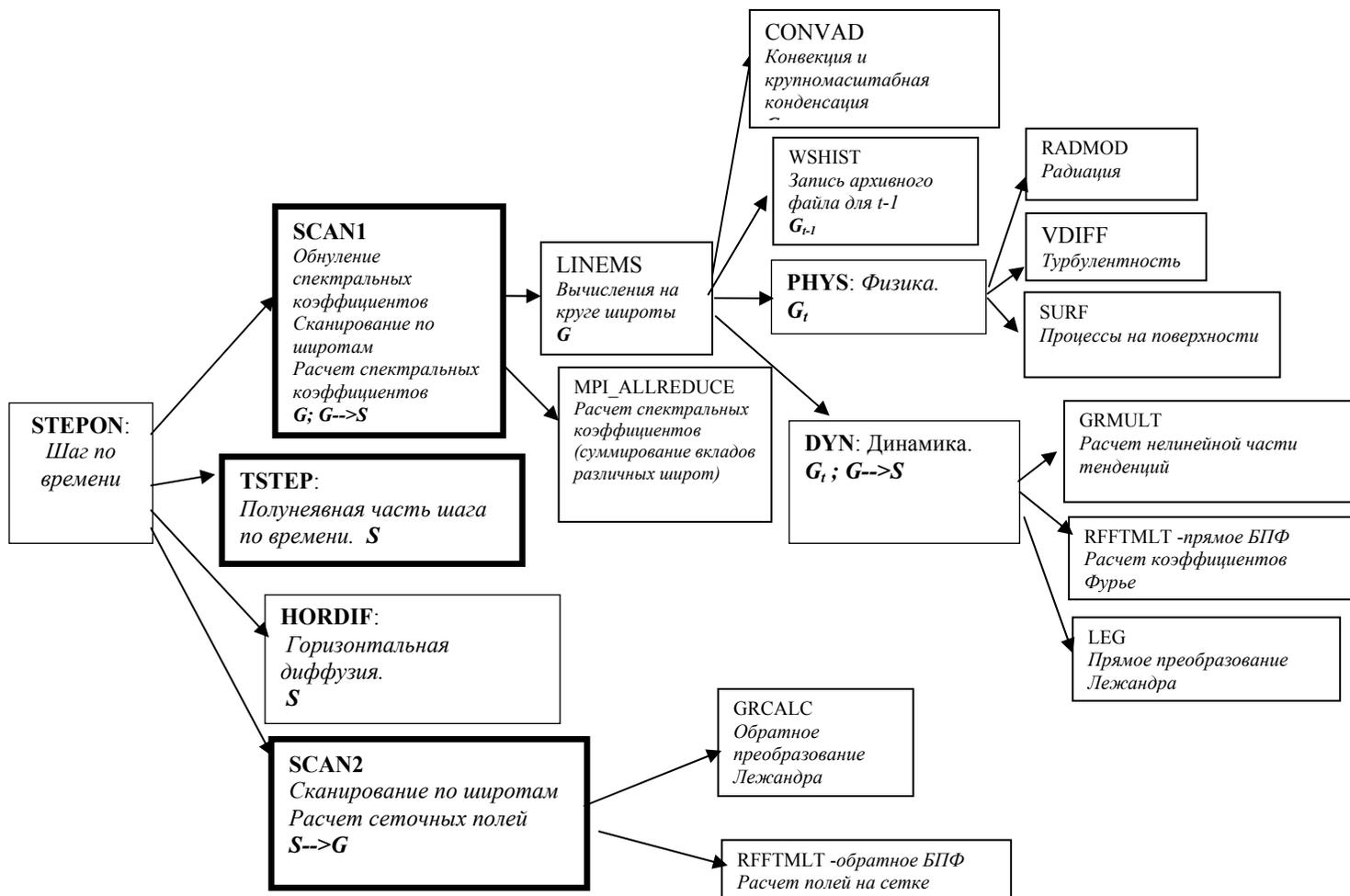


Рис. 4. Блок-схема шага по времени.

Имена подпрограмм, вычисления в которых распараллелены средствами MPI, обведены толстой рамкой

Основные характеристики оперативного ПК «Спектральная модель»

Задача	Функции	Выходные файлы (вне баз данных)	Используемые базы данных АСООИ	Старт	Готовность результатов
«Препроцессинг»	Подготовка начальной информации на основе полей ОА, климатических и морфометрических характеристик из оперативных баз данных	- «initial.dat» (для компоненты «Модель атмосферы») - «height.gau» (для компоненты «Постпроцессинг»)	Входные данные: - данные ОА: S125: сетка 1.25°x1.25°, (Возможно использование ANAZ и архивных баз); - параметры подстилающей поверхности : MRFN: сетка Гауссова Выходные данные: Нет	03:10 15:10	03:12 15:12
«Модель атмосферы»	Расчет прогностических значений метеополей до заблаговременности 84 ч (старт от начальных данных за срок измерений 00.00 UTC) и до 240ч (начальные данные за 12.00 UTC)	- «history333» для заблаго.временностей прогноза (333) (используется компонентой «Постпроцессинг»)	Входные данные: данных: Нет Выходные данные: Нет	03:12 15:12	03:30 15:50
«Постпроцессинг»	Пересчет результатов моделирования в значения для пользователей: горизонтальная и вертикальная интерполяция, диагностические вычисления, статистическая коррекция, запись результатов в базы данных	Нет	Входные данные: нет Выходные данные: - прогностические метеополя: SEL2: сетка 1.25°x1.25°, SELN: сетка 2.5°x2.5° MRFN : вычислительная сетка Гаусса, RAW2-сетка 1.25°x1.25° без стат. коррекции	03:12 15:12	03:31 15:51
«Оценки»	Расчет показателей успешности модельных прогнозов по отношению к значениям объективного анализа Гидрометцентра России	Нет	Входные данные: - Прогностические метеополя: SELN: сетка 2.5°x2.5° - Результаты ОА ANAL: сетка 2.5°x2.5° - климатические значения метеополей SHOT: сетка 2.5x2.5 Выходные данные значения оценок : SELN: ряды	04:10 16:20	04:15 16:25

Таблица 3

Осредненные за 2009 и 2010 гг. оценки успешности прогнозов по спектральной глобальной модели Гидрометцентра России

а) Северное полушарие. Давление на уровне моря

T85L31/T169L3, 2009 г. T169L31, 2010

Заблаговременность, ч	RMSE (hPa)						КА						S1					
	00 ч ВСВ 2009 г.		00 ЧСВ 2010 г.	12 ч ВСВ 2010 г.		12 ч ЧСВ 2010 г.	00 ч ВСВ 2009 г.		00 ч ЧСВ 2010 г.	12 ч ВСВ 2009 г.		12 ч ЧСВ 2010 г.	00 ч ВСВ 2009 г.		00 ч ЧСВ 2010 г.	12 ч ВСВ 2009 г.		12 ч ЧСВ 2010 г.
24	2,2	2,4	2,0	2,1	2,3	2,1	0,96	0,95	0,97	0,96	0,94	0,96	37	39	35	37	38	36
48	3,3	3,2	3,0	3,3	3,2	3,1	0,91	0,91	0,94	0,92	0,91	0,93	47	47	44	47	47	45
72	4,5	4,1	4,0	4,5	4,1	4,1	0,84	0,86	0,89	0,85	0,86	0,88	56	55	52	56	55	53
96				5,7	5,2	5,3				0,75	0,78	0,81				65	63	62
120				6,9	6,3	6,4				0,65	0,68	0,71				72	71	69
144				7,9	7,4	7,5				0,55	0,57	0,61				78	77	75
168				8,7	8,2	8,4				0,45	0,47	0,51				83	82	80
192				9,4	8,9	9,2				0,38	0,37	0,43				86	86	83
216				10,0	9,5	9,7				0,32	0,31	0,37				88	88	86
240				10,4	9,9	10,6				0,27	0,30	0,32				89	89	87

Примечание: Обозначения в таблице: RMSE - среднеквадратическая ошибка;

RMSEV - среднеквадратическая ошибка прогноза вектора скорости ветра;

КА - коэффициент корреляции аномалий;

S1 - показатель успешности прогноза градиента.

б) Северное полушарие. Высота изобарической поверхности 500 гПа T85L31/T169L3, 2009 г. T169L31, 2010

Заблаговременность, ч	RMSE (hPa)						KA						S1					
	00 ч BCB 2009 г.		00 BCB 2010 г.	12 ч BCB 2010 г.		12 ч BCB 2010 г.	00 ч BCB 2009 г.		00 ч BCB 2010 г.	12 ч BCB 2009 г.		12 ч BCB 2010 г.	00 ч BCB 2009 г.		00 ч BCB 2010 г.	12 ч BCB 2009 г.		12 ч BCB 2010 г.
24	17,0	16,2	14,7	16,9	16,0	15,4	0,98	0,98	0,99	0,98	0,98	0,99	24	22	20	24	22	21
48	29,1	25,1	24,8	29,1	24,9	25,4	0,95	0,96	0,97	0,95	0,96	0,96	33	30	29	33	30	29
72	42,5	36,8	37,1	42,5	36,9	37,7	0,89	0,91	0,93	0,89	0,91	0,93	42	39	38	42	39	38
96				56,9	50,7	52,1				0,81	0,84	0,87				50	48	46
120				70,8	65,2	65,6				0,70	0,73	0,78				57	56	54
144				83,4	78,0	79,3				0,60	0,62	0,69				63	62	60
168				93,6	88,9	91,0				0,49	0,51	0,59				67	67	65
192				102,3	99,2	100,6				0,41	0,40	0,50				70	71	69
216				109,3	106,8	108,2				0,34	0,32	0,43				73	73	72
240				115,0	111,6	114,3				0,28	0,30	0,37				74	75	74

в) Северное полушарие. Скорость ветра на поверхности 250 гПа T85L31/T169L3, 2009 г. T169L31, 2010

Заблаговременность, ч	ME (м/с)						RMSEV (м/с)					
	00 ч BCB 2009 г.		00 BCB 2010 г.	12 ч BCB 2010 г.		12 ч BCB 2010 г.	00 ч BCB 2009 г.		00 ч BCB 2010 г.	12 ч BCB 2009 г.		12 ч BCB 2010 г.
24	-1,6	-0,7	-1,0	-1,6	-0,7	-0,9	7,4	7,1	6,4	7,4	7,1	6,5
48	-1,8	-0,9	-1,1	-1,7	-0,8	-1,1	10,1	9,6	9,0	10,0	9,6	9,0
72	-1,8	-0,7	-1,0	-1,8	-0,7	-1,0	12,6	12	11,5	12,6	12	11,6
96				-1,8	-0,8	-1,0				15,2	14,8	14,2
120				-1,8	-0,8	-1,0				17,6	17,2	16,6
144				-1,8	-0,9	-1,1				19,5	19	18,7
168				-1,8	-1,0	-1,2				21,1	20,8	20,7
192				-1,8	-1,1	-1,3				22,5	22,1	22,2
216				-1,7	-1,1	-1,4				23,6	23,05	23,3
240				-1,7	-1,4	-1,5				24,3	23,9	24,3

г) Тропики. Высота изобарической поверхности 850 гПа T85L31/T169L3, 2009 г. T169L31, 2010

Заблаго- времен- ность, ч	RMSE (hPa)						КА						S1					
	00 ч ВCB 2009 г.		00 BCB 2010 г.	12 ч ВCB 2010 г.		12 ч BCB 2010 г.	00 ч ВCB 2009 г.		00 ч BCB 2010 г.	12 ч ВCB 2009 г.		12 ч BCB 2010 г.	00 ч ВCB 2009 г.		00 ч BCB 2010 г.	12 ч ВCB 2009 г.		12 ч BCB 2010 г.
24	7,0	10,6	9,2	6,9	10,2	8,7	0,87	0,76	0,82	0,87	0,78	0,83	48	60	52	48	58	52
48	8,6	11,4	9,9	8,6	11,0	10,1	0,81	0,76	0,79	0,81	0,75	0,78	52	59	54	53	58	55
72	9,8	11,9	10,8	9,9	11,9	11,4	0,76	0,73	0,77	0,76	0,72	0,73	56	60	56	56	59	57
96				11,2	12,7	12,5				0,71	0,69	0,70				58	61	59
120				12,5	14,0	13,7				0,64	0,62	0,65				60	63	61
144				13,4	15,7	15,1				0,60	0,55	0,61				62	65	63
168				14,1	16,3	16,1				0,55	0,53	0,56				65	67	65
192				14,6	17,5	16,9				0,51	0,51	0,52				66	69	67
216				15,1	17,9	17,5				0,48	0,49	0,49				66	69	67
240				15,5	18,6	18,0				0,46	0,44	0,47				67	68	68

НОВАЯ ВЕРСИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ АСООИ НА ВЫДЕЛЕННОМ СЕРВЕРЕ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ

Ю.А. Степанов, И.И. Жабина

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
shabina@mecom.ru*

На протяжении многих лет в Гидрометцентре России разрабатывались и успешно эксплуатировались технологии АСООИ (автоматизированные системы оперативной обработки информации). При переходе от одной аппаратной платформы к другой, более современной, велись работы по адаптации, переработке и развитию АСООИ. Соответственно, были последовательно разработаны и эксплуатировались технологии АСООИ-ЕС, АСООИ-CRAY, АСООИ-Xeon4 [1–6].

Одновременно и параллельно с ростом вычислительных мощностей новых платформ существенно развивались и росли количественно и качественно **предметные области Гидрометцентра России**. Это, в свою очередь, вызывало необходимость всё большего разделения труда в области информационного обеспечения, организации вычислительных пользовательских ресурсов, автоматизации оперативного вычислительного процесса и автоматизации администрирования этих ресурсов. Такая комплексная интеграция информационных и вычислительных ресурсов для различных предметных областей достигнута на высоком качественном уровне в рамках многомашинной технологии АСООИ-Xeon4 [1].

Ядро технологии АСООИ состоит из следующих подтехнологий:

- 1) АСООИ-СУБД — информационная основа (сервер баз данных);
- 2) АСООИ-БнЗ — Банк Задач, вычислительная основа (сервер приложений);
- 3) АСООИ-АСУ — автоматизированная система управления, управляющая основа (сервер управления);
- 4) АСООИ-ОС — управление ресурсами ЭВМ (системными, пользовательскими и др.).

Технология АСООИ-Xeon4 является комплексной, многоуровневой интегрированной средой, которая обеспечивает надёжное и эффективное управление пользовательскими и оперативными ресурсами сервера. Внутреннее устройство этой технологии является очень сложным, но эта сложность и обеспечивает надёжность и внешнюю простоту использования, эксплуатации, сопровождения и администрирования [1].

В [1] рассматривается технология АСООИ-Хеон4 с методологической и научной точки зрения. Здесь обосновываются парадигмы масштабируемости и трёхзвенной архитектуры управления в применении к оперативной практике Гидрометцентра России. Эти парадигмы нашли своё воплощение в виде следующих тесно взаимосвязанных подтехнологий: АСООИ-БнЗ (унифицированный Банк Задач), АСООИ-АСУ (унифицированная управляющая среда), АСООИ-ОС (унифицированное управление ресурсами). Трёхзвенная архитектура АСООИ («данные» \leftrightarrow «программы» \leftrightarrow «управление программами и ресурсами») является связующим управляющим звеном над классической двухзвенной архитектурой («данные» \leftrightarrow «программы»), которая обеспечивается подтехнологией АСООИ-СУБД.

Там же рассматриваются с «высоты птичьего полёта» подтехнологии АСООИ-АСУ, АСООИ-БнЗ, АСООИ-ОС как с качественной стороны дела, так и с количественной. Далее в настоящей статье эти технологии рассматриваются с практической стороны дела.

Для успешного функционирования трёхзвенной архитектуры технологии АСООИ-Хеон4 на каждом из серверов необходима надлежащая организация внутренних ресурсов сервера. **Ресурсы сервера** можно разделить на следующие категории:

- 1) ресурсы оперативной версии АСООИ;
- 2) ресурсы администраторской версии АСООИ;
- 3) ресурсы администратора АСООИ;
- 4) ресурсы пользователей АСООИ.

Эти категории должны быть непересекающимися множествами, как физически, так и логически. Внутри категории (4) **ресурсы пользователей** должны быть взаимно независимыми и гарантированными. Каждый пользователь (разработчик) ведёт разработку приложений собственного Банка Задач внутри собственного ресурса (см. [1, рис. 12]). **Администратор технологии АСООИ** должен иметь возможность вести собственные разработки как в прикладных областях, так и в области АСУ и информационных технологий. Эти работы ведутся внутри категории (3).

Администраторская версия технологии АСООИ является **ключевой** в составе ядра технологии, так как является мостом между пользовательской частью АСООИ и оперативно-значимой частью АСООИ (см. [1, рис.12]).

Администраторский Банк Задач является объединением копий пользовательских персональных Банков Задач. Разработанные пользователями приложения АСООИ тиражируются администратором в объединённый Банк Задач. Администратор осуществляет следующие виды работ (см. [1, рис. 9–12, табл. 3]):

– Заново создаёт «под ключ» приложение (задачу) АСООИ точно таким же способом, как это делал пользователь в своём персональном Банке Задач. Этот способ

называется унифицированным API Банка Задач и реализован в виде стандартизованного управляющего программного обеспечения, разработанного в Отделе СИО в 2003-2009гг. Задача АСООИ *автоматически генерируется* из пользовательских исходных текстов и файлов данных, используя настроечные внешние параметры API БнЗ. Такая задача становится полностью пригодной для оперативной версии АСООИ.

– Проверяет работоспособность задачи в реальных условиях, т.е. моделируя работу задачи в оперативном режиме. При этом используется как вышеуказанный API Банка Задач, так и автоматизированная система управления счётом сеансов АСООИ (АСУ АСООИ), разработанная в 2003-2009гг. в Отделе СИО.

– Тиражирует задачу в **оперативный Банк Задач** (либо новую задачу, либо обновляя текущую версию задачи) и удаляет из неё компоненты, которые существенно использовались при разработке, но не нужны при оперативном использовании. Такими компонентами являются, в частности, исходные тексты (каталог «sources»), спулы листингов («spool»), журналы АСООИ («log»), временные файлы («tmp») и т.д. Остаются только три компонента: исполнимый модуль (каталог «bin»), файлы данных («datasets») и управляющее ПО API Банка Задач («lib»). Это и есть чисто оперативная задача АСООИ.

– Проверяет работоспособность обновлённой задачи в реальных условиях оперативной эксплуатации, т.е. внутри ресурсов оперативной версии АСООИ.

– Если необходимо, администратор вносит изменения в **Управляющую базу данных АСООИ-АСУ** (реестр задач, реестр сеансов, реестр пользователей, сценарий автоматического запуска сеансов на счёт и другие таблицы), т.е. изменяет **конфигурацию оперативного счёта АСООИ**. Проверяет (моделирует) работоспособность обновлённой конфигурации в администраторской версии АСООИ (см.[1, рис. 11]). Затем «зеркально» тиражирует *всю* подтехнологию АСООИ-АСУ в **оперативную версию АСООИ-АСУ** и снова проверяет работоспособность и целостность АСУ (см. [1, рис. 12]). Тиражирование является инкрементным и гарантированным, с учётом всех изменений атрибутов файлов и каталогов и многоуровневой иерархии управляющего ПО. Для надёжного тиражирования дисковых объектов (полного или частичного) используются мощные средства, входящие в состав ОС Linux.

– Все вышеуказанные работы ведутся на основном сервере Хеон4b и называются **базовым администрированием технологии АСООИ-Хеон4**. На резервном сервере Хеон4a структура ресурсов должна быть (и является) аналогичной.

– Все модификации подтехнологий АСООИ-БнЗ и АСООИ-АСУ, внедрённые в оперативную версию АСООИ, администратор тиражирует надёжными средствами сетевой синхронизации на сервер Xeon4a (см.[1, рис. 13]). Однако при переносе этих работ на другие, более современные Linux-серверы, возникают существенные вопросы совместимости ПО во всех подтехнологиях АСООИ. Эти вопросы рассматриваются в конце настоящей статьи.

Оперативная версия технологии АСООИ функционирует в полностью автоматическом режиме и обеспечивает регулярный регламентированный счет всех задач, входящих в состав **оперативного Банка Задач АСООИ**, в соответствии с **управляющей базой данных АСООИ-АСУ**. Оперативная версия внешне создает впечатление статической, зафиксированной технологии. Однако её развитие (как количественное, так и качественное) является достаточно динамичным и обеспечивается вышеуказанными работами администратора АСООИ и пользователями АСООИ. Подробное описание этих работ приводится в производственной документации.

Для организации и гибкого обслуживания всех перечисленных ресурсов (пользовательских, оперативных, администраторских, системных) администратор АСООИ должен иметь возможность непосредственно работать на уровне операционной системы, т.е. осуществлять функции **системного администратора**. Все работы, связанные с системными и аппаратными ресурсами сервера, выделены в отдельную, очень важную подтехнологию, АСООИ-ОС.

Администратор АСООИ-ОС должен иметь прямой доступ ко всем видам ресурсов АСООИ. Для каждого пользователя администратором изначально создается и конфигурируется дисковый ресурс, независимый от других пользователей. Внутри дискового ресурса конфигурируется стандартизованная управляющая среда для разработки приложений АСООИ и создаётся **персональный Банк Задач** пользователя. Устанавливается **дисковая квота** для пользователя. С этого момента пользователь может вести разработку «под ключ» любого числа задач, используя API Банка Задач. При этом пользователь полностью избавлен от необходимости что-либо знать о системных ресурсах сервера и об устройстве и ресурсах технологии АСООИ. Поскольку способ разработки задач АСООИ унифицирован и внешне является очень простым, то пользователь теперь не должен использовать и поддерживать своё управляющее программное обеспечение, т.е. свои разнообразные скрипты. Вся «скриптовая часть» теперь обеспечивается API Банка Задач.

Для каждой новой задачи администратор АСООИ создаёт «заготовку» – стандартный шаблон – это корневой каталог задачи и подкаталоги *sources*, *datasets*, *lib*. В каталог *lib*

вносится стандартное управляющее программное обеспечение, т.е. API Банка Задач. Это следующие shell-программы (скрипты):

AppConfigProg.1.sh
Launch.1.sh
LaunchSimple.1.sh

В этих скриптах можно «прошить» постоянные настройки (например, задать опции компилятора, список дополнительных библиотек, способ архивации и ротации листингов, включить/отключить компиляцию или исполнение задачи и много другого, «продвинутого»). Обычно это 3-4 индивидуальные настройки. Обязательно указывается мнемоническое имя задачи, например, *oasyn*. Такие настройки называются **управляющими параметрами**, или **управляющими флагами АСООИ**, или просто **флагами**. В программе *Launch.1.sh* присутствуют все управляющие параметры API Банка Задач (почти 100 штук). Программа *LaunchSimple.1.sh* является программной «обёрткой» для *Launch.1.sh* и содержит в себе около дюжины самых практичных для пользователя параметров.

Программа *AppConfigProg.1.sh* содержит программный код, который автоматически выполняется перед запуском исполнимого модуля задачи. Здесь пользователь может добавить свой программный код (т.е. скриптовую часть, написанную на языке KornShell). На практике такая возможность используется редко, для специфических задач.

Для более специфического и тонкого управления задачей можно использовать (опционально) следующие предопределённые администратором скрипты:

AppPreCompile.1.sh
AppPreRuntime.1.sh
AppPostRuntime.1.sh

В этих скриптах пользователь также может задействовать собственный программный код KornShell. Фактически это есть «plugin» модули. Схематический порядок (алгоритм) работы API Банка Задач представлен на рис. 1.

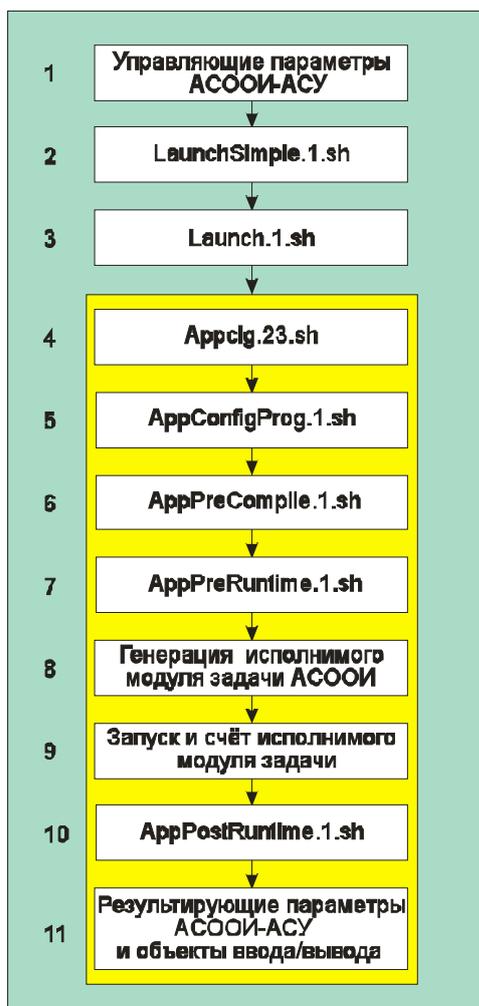


Рис. 1. Общая схема работы API Банка Задач АСОИ.

Главная управляющая программа *appclg.23.sh* является многофункциональной, т.е. состоит из многих функциональных подсистем, которые обеспечивают гибкий оперативный вычислительный процесс технологии АСОИ. Эта программа является централизованной и располагается внутри ресурсов администратора. Множество управляющих параметров (флагов АСОИ) позволяет динамически настраивать, конфигурировать, видоизменять поведение каждой задачи АСОИ в ходе вычислительного процесса технологии АСОИ (а также в ходе процесса разработки). Подробно эта технология API Банка Задач описана в документации.

В каталог *sources* пользователь заносит свои исходные тексты прикладной программы. Обычно это фортранные тексты. В головную Фортран-программу вносятся некоторые небольшие стандартизованные дополнения, реализующие взаимодействие Фортрана с shell-средой API БнЗ и обеспечивающие как передачу в Фортран-среду нескольких обязательных входных параметров АСОИ, так и получение из Фортран-среды нескольких выходных параметров. Эти входные параметры (7 штук) обеспечивают внутри программы

минимальную стандартизованную привязку к информационным и управляющим ресурсам АСООИ. В каталог *datasets* пользователь заносит, если необходимо, файлы данных, используемые прикладной программой в процессе исполнения (т.е. в режиме *runtime*).

Процесс разработки любым пользователем АСООИ любой своей задачи АСООИ-БнЗ осуществляется следующим **стандартизованным унифицированным способом**:

- 1) модифицировать исходные тексты и файлы данных в подкаталогах *sources* и *datasets* ;
- 2) в каталоге *lib* запустить на счёт программу *LaunchSimple.1.sh*; необходимые управляющие параметры можно либо модифицировать непосредственно внутри программы, либо задать при запуске в командной строке, например: *dd=7 mm=11 hh=0 LaunchSimple.1.sh*
- 3) посмотреть результаты работы прикладной программы и результаты работы управляющей программы (не обязательно) в каталоге *spool*. Этот каталог содержит, в частности, **листинги задачи**. Предыдущие версии листингов автоматически архивируются и сжимаются;
- 4) посмотреть, если интересно, каталоги *bin* (исполнимые модули), *log* (журналы событий АСООИ), *tmp* (временные файлы), *admin* (полезная информация о дисковых ресурсах задачи). Все эти подкаталоги, в том числе *spool*, создаются и обслуживаются управляющей программой *appclg.23.sh* автоматически!
- 5) повторить (продолжить) разработку, начиная с п. 1, если результат работы задачи неудовлетворителен.

Таким образом, в процессе разработки приложения АСООИ пользователь использует всего три простых команды Linux (*vi*, *cd*, *ls*), и одну команду АСООИ *LaunchSimple.1.sh*, т.е. процесс практически полностью автоматизирован, а уровень «рутины» практически нулевой для всех пользователей технологии АСООИ.

Каждая **задача АСООИ является унифицированным объектом**. Поведение такого объекта определяется как множеством **внешних управляющих параметров** (флагов) АСООИ, так и **внутренними объектами ввода/вывода**. Хранилищем таких объектов-задач является Банк Задач. Структура Банка Задач также унифицирована. Каждый разработчик имеет собственный Банк Задач и наполняет его своими объектами-задачами. Объекты-задачи могут быть переносимы между Банками Задач различных пользователей, в том числе и в объединённый Банк Задач администратора АСООИ. При таком переносе остаются неизменными как поведение объектов-задач, так и их внутренние и внешние функциональные возможности (т.е. атрибуты задач).

Каждый Банк Задач является **составным объектом**, компонентами (атрибутами) которого являются объекты-задачи. В совокупности с управляющей базой данных АСУ, администраторский Банк Задач является, фактически, **объектно-ориентированной базой данных**, для которой применимы стандартные операции:

- добавить (INSERT) объект-задачу;
- исключить (DELETE) объект-задачу;
- модифицировать (UPDATE) объект-задачу;
- выбрать (SELECT) объект-задачу;
- выполнить, исполнить (RUN) объект-задачу.

Пользователь АСООИ может внутри персонального Банка Задач добавлять, исключать, модифицировать и исполнять свои объекты-задачи в «персональном» режиме, т.е. в режиме разработки, неоперативном, в соответствии с вышеизложенным порядком работ. Администратор АСООИ в своём Банке Задач может осуществлять те же действия, что и пользователь АСООИ, а также выбирать и исполнять **группы объектов-задач** как в статическом, так и в динамическом режиме. Для этого задействуются следующие компоненты подтехнологии АСООИ-АСУ:

1) **Управляющая база данных АСООИ-АСУ** (реляционная, многотабличная);

2) **Управляющее программное обеспечение АСУ**, реализующее SQL-функционал SELECT для Банка Задач;

3) **Объекты-сеансы**, определяющие группы задач и последовательность их исполнения; основными атрибутами объекта-сеанса являются:

а) **список (последовательность) имен объектов-задач**; список может формироваться статически или динамически; статические списки являются таблицами в управляющей базе данных; динамические списки задаются при запуске объекта-сеанса;

б) **комплект атрибутов задач**, т.е. комплект управляющих флагов АСООИ, передаваемый в каждую задачу сеанса в процессе запуска на исполнение; этот комплект атрибутов задаёт одинаковое поведение каждого объекта-задачи внутри сеанса; например, атрибуты

Flag_BackupRotate=8, Flag_BackupType=3

означают, что каждая задача в ходе своего выполнения будет осуществлять 8-дневную циклическую ротацию своих спулов и использовать полную систему именования ротируемых файлов;

с) **комплект атрибутов сеанса**, т.е. комплект управляющих флагов АСООИ, контролирующих работу самого объекта-сеанса, но не объектов-задач; например, атрибут `Flag_TypeOfLaunch=AUTO` означает автоматический режим запуска сеанса и статический список задач.

4) **Управляющее программное обеспечение АСУ**, предназначенное для контролируемого запуска и исполнения объектов-сеансов; это ПО является **интегрирующим, связующим** для следующих компонентов:

- Банка Задач и всех объектов-задач;
- управляющей базы данных;
- ПО доступа к управляющей БД;
- всех объектов-сеансов.

5) **Управляющее программное обеспечение АСУ**, предназначенное для надёжного и эффективного доступа пользователей и администратора к результатам исполнения сеансов АСООИ; эти результаты находятся в **иерархических спулах АСООИ**, которые содержат десятки тысяч постоянно изменяющихся файлов; поэтому процесс доступа должен быть (и является) автоматизированным и унифицированным; зная имя задачи, пользователь одной командой (например, `lr1.oasyn`) получает таблицу листингов своей задачи (`oasyn`) за 8 суток в хронологическом порядке и выбирает любой из файлов, загружая его в текстовый редактор `vi` для последующего просмотра.

Выполнение объекта-сеанса в унифицированной управляющей среде АСООИ-АСУ является **составной транзакцией**, состоящей из заданной (статической или динамической) последовательности объектов-задач (одиночных транзакций). При этом результаты работы задач (листинги, журналы событий и др.) автоматически перенаправляются в **централизованные спулы АСООИ**. Доступ к спулам, поиск и выборка файлов из них автоматизированы и предельно упрощены для пользователей АСООИ. Общая схема работы объекта-сеанса приведена в [1, рис. 10]. Результаты работы самих сеансов располагаются в собственных спулах и доступны администратору также с помощью унифицированных средств АСУ (пользователям эти спулы недоступны). Общая схема многоуровневой организации ресурсов и программного обеспечения подтехнологий АСООИ-АСУ, АСООИ-БнЗ, АСООИ-ОС представлена в [1, рис. 12].

Такая организация управления ресурсами соответствует **объектно-ориентированному подходу** (парадигма ООП). Объект-задача, объект-сеанс, объект-Банк_Задач и другие типы объектов, будучи созданы (разработаны) один раз, могут быть использованы в различных контекстах (в пользовательской среде, в администраторской среде, в оперативной среде)

многократно. Эти объекты могут являться шаблонами для создания других однотипных объектов. Задавая различные значения атрибутов объекта (управляющих параметров АСУ), можно изменять (настраивать) функционирование объекта в зависимости от области применения. Таким образом, к объектам технологии АСООИ применимы такие концепции ООП, как **наследование, полиморфизм, инкапсуляция**. Это позволяет гибко и надёжно управлять ресурсами АСООИ и обеспечивать их масштабируемость и развитие.

Также в рамках одного сервера объекты АСООИ являются локально портируемыми между различными ресурсами (пользовательскими, администраторскими, оперативными), поскольку объекты АСООИ привязаны к программно-аппаратной архитектуре конкретного сервера Xeon4b (тип и разрядность ЦП, версия ОС Linux, версии компиляторов и др.). Однако, между серверами различных архитектур (платформ) объекты АСООИ не являются портируемыми (переносимыми, интероперабельными). Поэтому, для того, чтобы переносить без изменений объекты АСООИ между серверами различных платформ, технологии АСООИ-БнЗ и АСООИ-АСУ должны быть портируемыми.

Необходимость разработки новых версий АСООИ-АСУ и АСООИ-БнЗ на современной серверной платформе

Новая версия технологии АСООИ, разрабатываемая на сервере Xeon5345 Гидрометцентра России, должна быть в целом преемственной к существующей технологии АСООИ-Xeon4, рассмотренной выше. Эта версия должна сохранить парадигму трёхзвенной архитектуры управления АСООИ, изложенную в [1]. Ядро технологии состоит из следующих подтехнологий:

- АСООИ-БнЗ,
- АСООИ-АСУ,
- АСООИ-ОС,
- АСООИ-СУБД.

Подтехнология АСООИ-СУБД принципиально не изменяется с точки зрения программного обеспечения и администрирования.

Первые три подтехнологии концептуально должны остаться прежними, в соответствии с вышеизложенными аспектами. Но их реализация должна быть существенно модернизирована. В первую очередь, эта связка трёх подтехнологий должна быть максимально портируемой (переносимой) между Linux-серверами различных платформ. Во-вторых, необходимо ещё более упростить для пользователей процесс разработки приложений Банка Задач АСООИ, используя современные подходы, в том числе объектно-ориентированное проектирование. В-третьих, надо апробировать такое модернизированное

ядро АСООИ сначала на небольшом количестве задач, т.е. проверить как практическую портируемость ядра, так и удобство работы пользователей и администраторов.

Организация программно-аппаратных ресурсов сервера Хеон5345

Сервер Хеон5345 Гидрометцентра России имеет следующие базовые характеристики:

ЦП: два 4-ядерных Хеон5345;
разрядность: 64;
диски: 8x70 Гиб, RAID5, общий полезный объём ~390Гиб;
LAN: 2 порта Ethernet 100/1000;
ОС: RHEL5;
компиляторы: IFC-10.1.017, IFC-11.1.073

Новый пользовательский интерфейс Банка Задач АСООИ на сервере Хеон5345.

Полная автоматизация разработки задач

В существующей в настоящее время версии API Банка Задач всё управляющее программное обеспечение было разработано и реализовано следующими средствами:

- интерпретатор Shell, являющийся встроенным в ОС Linux языком программирования;
- компиляторы Фортрана различных версий;
- множество утилит, входящих в стандартный комплект любой ОС Linux (например, команды *grep(1)*, *awk(1)*, *tar(1)*, *bzip(1)*, *xargs(1)* и многие другие).

Компиляторы Фортрана предназначены для непосредственно компиляции и сборки прикладной (пользовательской) части задачи АСООИ. **Утилиты ОС Linux** используются для автоматизации многих управляющих аспектов разработки и администрирования задач. **Интерпретатор Shell** используется как связующая программная среда для указанных компонентов. Вся содержательная часть API Банка Задач написана на языке интерпретатора KornShell с использованием множества утилит Linux.

Язык программирования KornShell является достаточно гибким и мощным для реализации весьма сложных управляющих алгоритмов и имеет такие сильные стороны:

- является интерпретируемым языком, т.е. не содержит стадии компиляции/сборки;
- содержит все необходимые стандартные управляющие конструкции (if-then-else, case, for, while; арифметику, функции, простые массивы, ввод/вывод, перехват прерываний и др.);

– содержит мощные средства управления процессами (каналы для межпроцессного взаимодействия, перенаправление ввода/вывода, хронометраж процессов, асинхронные процессы и ожидание завершения, шаблоны имён файлов и др.);

– входит в состав всех современных дистрибутивов Linux.

Основные недостатки интерпретатора KornShell:

- отсутствие как строгой, так и динамической типизации;
- отсутствие встроенных средств обработки строковых и других типов данных;
- отсутствие модульной архитектуры;
- некоторые существенные несовместимости с интерпретатором BASH.

Поэтому при разработке АСУ в предыдущие годы пришлось сначала разработать на языке KornShell специальный макроязык, который дополнял и расширял возможности интерпретатора. После этого были разработаны на KornShell библиотека функций и библиотека подпрограмм, основанные на строгой типизации переменных. Это позволило создать на языке KornShell модульное управляющее программное обеспечение, как это принято в процедурных языках программирования (C++, Си, Фортран и т.п.). Получилось очень надёжное многофункциональное управляющее ПО, но очень сложное внутри.

При переносе этого ПО на сервер Xeon5345 и на другие Linux-машины выявились некоторые существенные несовместимости работы KornShell, а также компиляторов Фортрана и некоторых утилит ОС Linux. Весь комплект программного обеспечения АСОИИ-БнЗ и АСОИИ-АСУ (в том числе и компилируемая фортранная часть) оказался платформозависимым, т.е. не полностью портируемым.

В новой разрабатываемой версии АСОИИ для сервера Xeon5345 производится поэтапный переход (и полная переработка) управляющего ПО АСОИИ на новую систему программирования. Для этого был выбран современный кроссплатформенный объектно-ориентированный интерпретирующий **язык программирования Python**. Переход на язык Python позволяет осуществить следующие фундаментальные возможности:

1) перевести подтехнологии АСОИИ-БнЗ и АСОИИ-АСУ на объектно-ориентированные рельсы, что обеспечит высокую управляемость, надёжность, эффективность всей технологии АСОИИ;

2) обеспечить портируемость этих подтехнологий на различные серверные платформы;

3) обеспечить автоматизацию разработки задач АСОИИ для пользователей и администраторов АСОИИ;

4) обеспечить универсальный способ администрирования персональных Банков
Задач пользователей АСООИ;

5) обеспечить независимый от пользователей вычислительный процесс,
используя объекты-задачи и объекты-сеансы АСООИ.

Переработка управляющего программного обеспечения с языка **KornShell** на язык **Python** осуществляется поэтапно. Это ПО состоит из функциональных подсистем, реализованных в виде компонентов очень большой Shell-программы *appclg.23.sh*, Shell-подпрограмм и большого количества Shell-функций. Переработка на Python осуществляется покомпонентно таким способом, чтобы новый (переработанный) компонент был оформлен в виде модуля языка Python. Это обеспечит модульную и портируемую архитектуру нового ПО.

Для примера рассмотрим новую версию **системы журналирования событий АСООИ**.

Объекты-журналы появляются путём создания экземпляра класса *C_Asoi_Logging_Setup*, определяемого в модуле *M_Asoi_Logging_Setup*. В любом месте Python-программы можно создать необходимый объект-журнал, открыть файлы журнала, осуществить запись необходимых сообщений в эти файлы, закрыть файлы журнала и удалить объект-журнал. Такие объекты-журналы независимы друг от друга, но могут одновременно обрабатывать одни и те же файлы журналов на диске в асинхронном режиме.

Объект-журнал можно встроить в объект-задачу. Тогда каждая задача будет иметь собственную независимую систему журналирования событий. Множество задач АСООИ может выполняться как последовательно, так и параллельно; при этом журналы АСООИ будут целостными, и хронология поступления сообщений в эти журналы будет соответствовать действительности. Это обеспечивается интерпретатором Python независимо от платформы.

Аналогично системе журналирования событий АСООИ на языке Python разработаны такие функциональные возможности (подсистемы), как:

- работа с датой/временем;
- работа с конфигурационными файлами;
- работа с опциями командной строки;
- запуск и контроль процессов (в т.ч. управление Shell-скриптами);
- работа со средой ОС;
- системное программирование, заменяющее многие утилиты Linux;
- другие, более специфические подсистемы.

Каждая из таких подсистем реализована в виде соответствующего **Python-модуля**, содержащего один или несколько классов. **Классы** используются для динамического создания управляющих объектов внутри объектов-задач и объектов-сеансов.

Разработанные Python-модули для новой Python-среды АСООИ-АСУ и АСООИ-БнЗ позволяют реализовать новые возможности технологии АСООИ:

- модульная архитектура ПО;
- портируемость управляющего ПО;
- определение новых типов данных (т.е. новых классов) АСООИ;
- создание объектов новых типов и их динамическое использование в ходе выполнения основной программы;
- объекты АСООИ, в том числе и одного типа, могут создаваться в любом количестве и работать одновременно и независимо друг от друга (в том числе, асинхронно и в параллельной среде);
- объект-задача АСООИ создаёт и использует управляющие объекты АСООИ независимо от других объектов-задач АСООИ;
- объект-сеанс АСООИ создаёт и использует как управляющие объекты АСООИ, так и объекты-задачи независимо от других объектов-сеансов;
- объекты АСООИ новых типов имеют идентичное поведение и свойства на различных платформах Linux/Python.

Новая «гибридная» версия автоматизированной системы управления АСООИ-АСУ

Управляющая среда АРІ Банка Задач является **многоуровневой** и **многослойной**. Общая схема такой организации АРІ представлена на рис. 2. Уровни взаимодействуют между собой программным способом, задействуя необходимые **функциональные подсистемы АРІ**. Объекты ввода/вывода, т.е. дисковые объекты, создаются и/или используются на разных уровнях по-разному. На схеме это обозначено кружочками и стрелками.

В действующей технологии АСООИ-Хеон4 АРІ реализован уровнями 1, 2, 3, 5. В новой версии технологии АСООИ АРІ представлен всеми пятью уровнями. Новый уровень 4 достаточно подробно рассмотрен в документации. По-мере разработки новой Python-среды АСООИ-АСУ, часть функциональных подсистем постепенно переводится из уровня 3 (среда

интерпретатора Shell) в уровень 4 (среда интерпретатора Python). Уровень 3 будет постепенно «утончаться», а уровень 4 будет «утолщаться».

Уровень 1 – прикладное пользовательское ПО – не знает (и не должно знать) что-либо о вышележащих уровнях, кроме некоторых деталей уровня 2.

Уровень 2 – обычно является предустановленным вместе с **уровнем 5**. Оба эти уровня можно назвать **системными уровнями**.

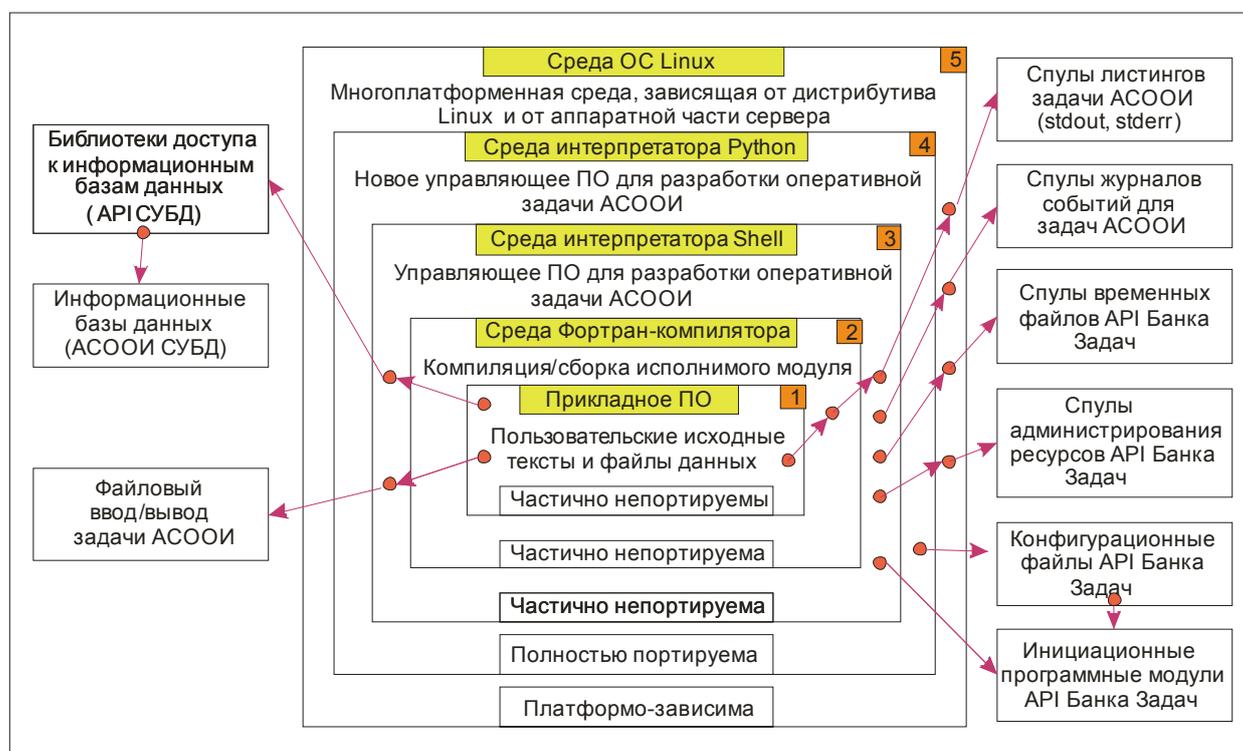


Рис. 2. Многоуровневая управляющая среда API Банка Задач технологии АСООИ и объекты ввода/вывода.

Уровни 3 и 4 – являются полностью собственной разработкой администраторов АСООИ и Отдела СИО Гидрометцентра России. В новой реализации технологии АСООИ для сервера Xeon5345 оба эти уровня составляют **гибридную версию** API Банка Задач, т.к. здесь совместно используются две среды разных интерпретаторов (Python и Shell).

Объект-задача АСООИ реализуется на уровнях 1, 2, 3, 4. Управление объектом-задачей осуществляется большим **комплексом управляющих флагов АСООИ**. Флаги можно передать в задачу несколькими способами в соответствии со **схемой приоритетов** на рис. 3. Все флаги по умолчанию «прошиты» в приоритетах П1 и П2. Любой из этих флагов может быть переопределён пользователем и/или администратором в приоритетах П3, П4, П5. Такая схема приоритетов позволяет управлять задачей внешним образом в разных контекстах. Например, в режиме разработки можно задать одни значения каких-либо флагов, в режиме администраторской версии АСООИ – другие значения тех же самых флагов, а в режиме оперативной версии АСООИ – третьи значения (например, отключить все режимы

компиляции/сборки модуля). В этих трёх режимах идентичные объекты-задачи будут иметь различное поведение.

Из рис. 2 видно, что большая часть объектов ввода/вывода формируется и обрабатывается на уровне 3 (среда API Shell) с использованием системных средств уровня 5 (среда ОС). Объекты ввода/вывода уровня 1 перехватываются уровнем 3 и применяются к соответствующим дисковым объектам. Таким образом, управляющие уровни 2, 3 (это, собственно, и есть API Банка Задач) преобразуют непортируемые компоненты уровней 1, 2, 5 в портируемое представление, т.е. реализуют на практике **парадигму Middleware** (связующая среда). Непортируемые элементы уровня 3 (Shell) постепенно перерабатываются в портируемые аналоги и переносятся в уровень 4 (Python).

Новая версия API Банка Задач существенно упростила работу пользователя-разработчика задач АСООИ, рассмотренную выше и представленную на рис. 1. Теперь вместо трёх «громоздких» Shell-скриптов

```
AppConfigProg.1.sh  
Launch.1.sh  
LaunchSimple.1.sh ,
```

которые пользователь должен был иногда модифицировать вручную, используется одна маленькая Shell-программа («запускалка») ***LaunchTask.3.sh*** (которую вообще не надо модифицировать, а только запускать на выполнение в командной строке терминала) и простой текстовый конфигурационный файл ***AppConfigFile.1.ctl***, в котором можно модифицировать и/или добавлять значения необходимых **флагов АСООИ**.

Очень важная особенность нового API состоит в том, что **имя задачи** можно нигде не указывать. Управляющее ПО автоматически определяет это имя (которое должно быть уникальным во всей сумме всех Банков Задач) по факту наличия в текущем Банке Задач. Это очень упрощает как процесс тиражирования и клонирования объектов-задач, так и создание новой задачи из типового шаблона.

Для управляющего уровня 3 главная Shell-программа *appclg.23.sh* была существенно переработана и оптимизирована для использования в связке с Python-средой уровня 4 и переименована в ***appclg.25.sh*** (версия 25).

Для управляющего уровня 4 **новое программное обеспечение API Банка Задач** состоит из 20 Python-модулей. Все имена модулей начинаются с префикса «*M_Asoi_*». Все эти модули взаимодействуют посредством определяемых в них классов и глобальных объектов. Рассмотренная выше «запускалка» является главной программой, которая при запуске на выполнение загружает (импортирует) цепочечно всю иерархию модулей, и этот программный код сразу исполняется интерпретатором Python. Запуск головной программы –

это и есть параметризация, конфигурирование, создание и выполнение объекта-задачи в автоматизированном режиме.

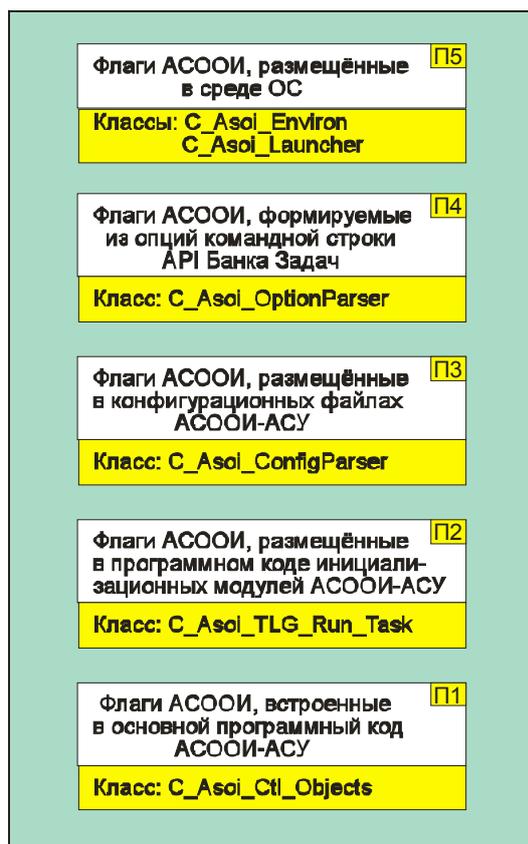


Рис. 3. Приоритеты использования и переопределения управляющих флагов АСООИ-АСУ.

Все модули, классы, функции и методы подробно **самодокументированны** синтаксическими средствами языка Python (Python docstrings). Весь комплект этой документации может быть автоматически сгенерирован модулем *pydoc*. Структура этой документации точно такая же, как у всех модулей библиотеки Python.

Общие сведения о портируемости и кроссплатформенности программного обеспечения АСООИ-БнЗ и АСООИ-АСУ

Проблема портируемости программного обеспечения актуальна в современной индустрии компьютерных и информационных технологий. **Портируемое ПО** имеет ряд важных преимуществ в сравнении с обычным ПО. Одним словом, портируемое ПО более надёжно и эффективно при практическом использовании. В связи с ростом и разнообразием парка ЭВМ вопрос портируемости постепенно становится актуальным и в Гидрометцентре России.

Для технологии АСООИ-Хеон4 портируемость всегда была одним из ключевых аспектов. Однако не было реальной возможности для разработки портируемого ПО. С появлением в Гидрометцентре России серверов современной архитектуры появилась возможность практической разработки и апробации портируемого ПО подтехнологий АСООИ-БнЗ и АСООИ-АСУ. Разработка ведётся на сервере Хеон5345. Апробация ведётся на нескольких доступных серверах различной архитектуры. Далее кратко рассматриваются факторы, которые влияют на портируемость ПО технологии АСООИ.

Разнообразие аппаратного обеспечения. Различие аппаратных архитектур в целом не является критичным, поскольку управление аппаратурой берёт на себя операционная система. Современные ОС Linux могут полностью скрыть архитектурные особенности сервера, т.е. критичным становится системное ПО.

Разнообразие системного ПО. Любой дистрибутив Linux содержит большое количество программных средств (ПС), как низкоуровневых, так и высокоуровневых. Такими средствами, в частности, являются системные библиотеки (например, *glibc*), языки программирования и компиляторы (например, *gcc*), интерпретаторы (например, *bash*, *ksh*, *python*, *perl*), утилиты пользовательского уровня (например, *vi(1)*, *ls(1)*, *grep(1)*, *find(1)*, *bzip2(1)*), утилиты привилегированного уровня (например, *fdisk(8)*, *mount(8)*, *useradd(8)*), высокоуровневые языки программирования (Фортран, Си++, Python, Perl), некоторые интегрированные среды IDE, расширенные средства администрирования.

Многие из этих ПС используются прикладными пользовательскими программами (ПП) неявным образом. Некоторые из этих ПС напрямую используются в ПП. Если какой-либо компонент ОС Linux по-разному работает на разных платформах, то это может стать критичным фактором для ПП. Например, если пользовательский скрипт использует возможности утилиты *find(1)*, но результаты работы этой утилиты слегка различаются, то скрипт не является портируемым. Если интерпретатор *ksh* даже слегка различается в зависимости от версии ОС, то пользовательское ПО, написанное на этом языке программирования, не является портируемым и, по-видимому, либо должно быть переработано в сторону универсальности, либо существовать в нескольких системно-зависимых версиях.

Особенно критичными для портируемости могут быть низкоуровневые системные средства и библиотеки (например, *gcc*, *libstdc* и т.п.), которые обычно задействуются неявным образом. Высокоуровневые языки программирования компилируемого типа (например, Фортран) также могут быть частично несовместимы от версии к версии, что ведёт за собой переработку прикладного ПО.

Несовместимость пользовательского программного кода. Приложения Банка Задач АСООИ обычно написаны на языке Фортран. На сервере Хеон4b установлен компилятор IFC7. На сервере Хеон5345 установлен компилятор IFC10. Практика последних лет показала, что очень часто фортранные тексты, отлаженные в IFC7, компилируются в IFC10 с существенными ошибками. Это означает, что пользовательское фортранное ПО зачастую не является портируемым и требует существенной переработки.

Разнообразие пользовательских библиотек. В технологиях АСООИ-Хеон4 и АСООИ-Хеон5345 используются четыре специализированные библиотеки собственной разработки Отдела СИО Гидрометцентра России. Эти библиотеки задействуются в пользовательских прикладных программах для взаимодействия с такими внешними объектами, как базы данных, сеть, среда АСООИ-АСУ, среда ОС и др. (см. [1, рис.12]). Эти библиотеки реализованы на языке Фортран и, следовательно, являются частично платформозависимыми.

Библиотека *bankload.a* обеспечивает API для локального доступа к базам данных полей метеозаписей.

Библиотека *nablload.a* обеспечивает API для локального доступа к базам данных наблюдений.

Библиотека *remdbload.a* обеспечивает API для удалённого доступа к базам данных АСООИ внутри ЛВС Гидрометцентра России.

Библиотека *ascpload.a* является частью API Банка Задач АСООИ и обеспечивает взаимодействие среды Фортрана со средой ОС и со средой АСООИ-АСУ. Библиотека также обеспечивает портируемость как файлов данных задач АСООИ, так и всей структуры Банка Задач. В режиме НИР эта библиотека не используется.

Вышеуказанные имена библиотек являются условными (мнемоническими). В новой версии технологии АСООИ система именования и хранения библиотек (а также всех других объектов) является **самонастраиваемой и портируемой**.

Управляющее ПО АСООИ-АСУ. Управляющее ПО технологии АСООИ-Хеон4 реализовано в виде подтехнологии АСООИ-АСУ и API Банка Задач. Это ПО написано на языке программирования KornShell с использованием множества утилит Linux, поэтому оно не полностью портируемо. Для новой технологии АСООИ-Хеон5345 разрабатывается портируемая версия, основанная на портируемом объектно-ориентированном интерпретаторе Python. Этот процесс подробно рассмотрен выше.

Поскольку версии Python 2.4 и 2.6 частично несовместимы сверху-вниз, а на разных Linux-серверах установлена какая-либо одна версия, то новое ПО АСООИ-АСУ разработано

таким способом, чтобы оно стало портируемым между Python 2.4 и Python 2.6. Этот механизм универсальности кода является сложным, но вполне оправданным.

API Банка Задач. API Банка Задач является частью управляющего ПО АСООИ-АСУ и предназначено как для полной автоматизации разработки задач технологии АСООИ, так и для использования в оперативном вычислительном процессе в составе сеансов АСООИ. Поэтому проблемы портируемости API Банка Задач включают в себя все вышеперечисленные аспекты (системные, пользовательские, управляющие, библиотечные и др.).

В новой версии технологии АСООИ-Хeon5345 завершена разработка портируемого API Банка Задач, а также разрабатывается новая унифицированная и портируемая структура и организация всего программного обеспечения АСООИ на дисковых ресурсах любого Linux-сервера.

Предметные области и прикладное ПО, апробируемое в технологии АСООИ-Хeon5345. Новое управляющее ПО технологии АСООИ-Хeon5345 разрабатывается и апробируется одновременно по нескольким направлениям и на нескольких компьютерах различной программно-аппаратной архитектуры. Практическим результатом этой многоплановой работы должна явиться полная автоматизация различных предметных областей Гидрометцентра России на выделенном вычислительном ресурсе - сервере Хeon5345.

Апробация нового ПО осуществляется на новом Банке Задач АСООИ, который постепенно расширяется по своему составу. Каждая задача тиражируется из администраторского Банка Задач технологии АСООИ-Хeon4. Затем прежний API БнЗ заменяется на новый API и осуществляется тестирование и проверка совместимости и работоспособности. Затем моделируется счёт сеансов АСООИ, содержащих эту задачу. Затем задача и сеансы добавляются в сценарий автозапуска АСООИ и осуществляется многократный, в течение суток, тестовый счёт задачи в новой управляющей среде АСООИ-АСУ.

В настоящее время такую апробацию прошли такие предметные области, как глобальный ОА, ГСМА, региональный прогноз, мезомодели, авиационные прогнозы, морские прогнозы, ряд специализированных прогнозов, администрирование баз данных АСООИ. Ведутся работы над комплексом задач оценок прогнозов.

Одновременно осуществляется расширение состава и номенклатуры локальных баз данных АСООИ (для этих и других предметных областей).

В реальном режиме времени функционирует адаптированная для новой платформы технология приёма и раскодирования данных наблюдений и продукции зарубежных центров.

По состоянию на 30.03.2011 г. существенная часть вышерассмотренных проблем портирования технологии АСОИИ решена как в концептуальном, так и в алгоритмическом и программном аспектах. Эти новые разработки успешно реализованы и апробированы в новой версии АСОИИ на сервере Xeon5345 (технология АСОИИ-Xeon5345), и эта технология в перспективе может являться адекватной заменой существующей оперативной технологии АСОИИ-Xeon4 Гидрометцентра России.

Список использованных источников

1. *Степанов Ю.А., Жабина И.И.* АСОИИ-Xeon4 – многомашинная оперативная автоматизированная технология ГУ «Гидрометцентр России», предназначенная для информационного обеспечения, регламентированного счёта и формирования продукции различных прогностических моделей // В сб.: «80 лет Гидрометцентру России». – М.: Триада лтд, 2010. – С. 435–452.
2. *Жабина И.И., Пурина И.Э., Степанов Ю.А., Чекулаева Т.С.* Новые оперативные технологии обработки гидрометеорологических данных и управления прикладными программами с использованием суперЭВМ CRAY // В сб.: «70 лет Гидрометцентру России». – СПб.: Гидрометеиздат, 1999. – С. 90–117.
3. *Кастин О.М.* Банк гидрометеорологических данных «ПРОГНОЗ». Общее описание Бнд «ПРОГНОЗ-1060». – М., 1985. – 43 с.
4. *Кастин О.М., Жабина И.И., Степанов Ю.А.* Банк гидрометеорологических данных «ПРОГНОЗ». Средства и организация работы с базами данных Бнд «ПРОГНОЗ». – М.: 1985. – 67 с.
5. *Пурин И.Э., Жабина И.И., Недачина А.Ю., Штырева Н.В.* Развитие информационных технологий в локальной сети CRAY // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 334. – С. 134–147.
6. *Фролов А.В.* Автоматизированная обработка оперативной метеорологической информации в ММЦ Москва с использованием суперЭВМ CRAY // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 334. – С. 3–18.

Поступила в редакцию 20.05.2011 г.

ОПЕРАТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТА ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОГНОЗОВ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУЛАГРАНЖЕВОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ПЛАВ

М.А. Толстых^{1,2}, Н.Н. Богословский^{2}, А.В. Шляева^{2,3}, В.Г. Мизяк²*

¹ *Институт вычислительной математики РАН,*

² *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации*

** в настоящее время – Томский государственный университет, механико-математический факультет*

³ *МГТУ им. Н.Э. Баумана*

tolstykh@mecom.ru

Введение

В 90-х годах прошлого столетия многие прогностические центры выполнили работы по усовершенствованию своих глобальных оперативных моделей. Произошло массовое внедрение полулагранжевого метода для описания адвекции, который позволяет использовать в модели атмосферы шаг по времени в несколько раз больший, чем шаг, определяемый условием Куранта. Большинство прогностических центров к тому времени обладали параметризациями процессов подсеточного масштаба собственной разработки, поэтому в усовершенствованных моделях, как правило, заменялся лишь блок решения уравнений динамики атмосферы. В настоящее время подавляющее большинство глобальных гидродинамических моделей прогноза погоды основано на полулагранжевом подходе.

В Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России в 1997–2008 гг. была разработана и реализована вычислительно эффективная полулагранжева глобальная конечно-разностная модель общей циркуляции атмосферы, получившая имя ПЛАВ (от ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютного Вихря, в английском варианте – SL-AV). Особенности блока решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ являются применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений и использование вертикальной компоненты абсолютного вихря и дивергенции в качестве прогностических переменных.

В России к середине 90-х годов, ввиду отсутствия вычислительных и финансовых ресурсов, отсутствовал современный для того времени набор параметризаций собственной разработки, апробированный оперативной практикой. Поэтому в модели ПЛАВ наряду с оригинальным блоком решения уравнений динамики атмосферы собственной разработки применяется набор параметризаций подсеточного масштаба, разработанный возглавляемым Францией консорциумом по мезомасштабному прогнозу погоды ALADIN/LACE [7].

Внедрение в качестве основного численного метода в начале 2010 года глобальной модели ПЛАВ (решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам Росгидромета от 27.10.2009 г.) с разрешением 0,9 градуса по долготе, 0,72 градуса по широте и 28 уровнями по вертикали позволило примерно в два раза сократить отставание России по сравнению с лидирующей группой мировых прогностических центров (<http://method.hydromet.ru>, раздел "Оценки прогнозов") в ошибках прогноза таких важных параметров, как давление на уровне моря, температура на уровне 850 гПа и высота поверхности 500 гПа. Заметно уменьшились также ошибки прогноза приземной температуры.

В данной работе описывается оперативная технология расчета среднесрочных прогнозов по модели ПЛАВ, реализованная на параллельной вычислительной системе SGI Altix 4700.

1. Общее описание

Оперативная технология расчета глобальных среднесрочных прогнозов по модели ПЛАВ включает в себя следующие программные единицы:

- 1) блок подготовки начальных данных для модели (далее БПД);
- 2) параллельный программный комплекс модели ПЛАВ с интегрированным постпроцессингом;
- 3) средства записи прогностической продукции из выходных файлов модели в базы данных системы АСООИ;
- 4) программа расчета оценок прогнозов;
- 5) сценарии (скрипты) управления сеансами на bash, запускаемые по cron.

Схематически оперативная технология представлена на рис. 1. Оперативная технология подготовки данных для расчета прогнозов представляет собой общепринятую схему, однако объективные анализы в свободной атмосфере на основе метода оптимальной интерполяции пока выполняются на основе внешнего первого приближения. В Гидрометцентре России ведутся работы по реализации трехмерного вариационного усвоения, однако пока результаты этой работы не внедрены в оперативную практику.

Для обеспечения надежности, диктуемой оперативным применением модели, модель ПЛАВ каждые 6 часов рассчитывает и сохраняет состояние атмосферы на модельных сигма-

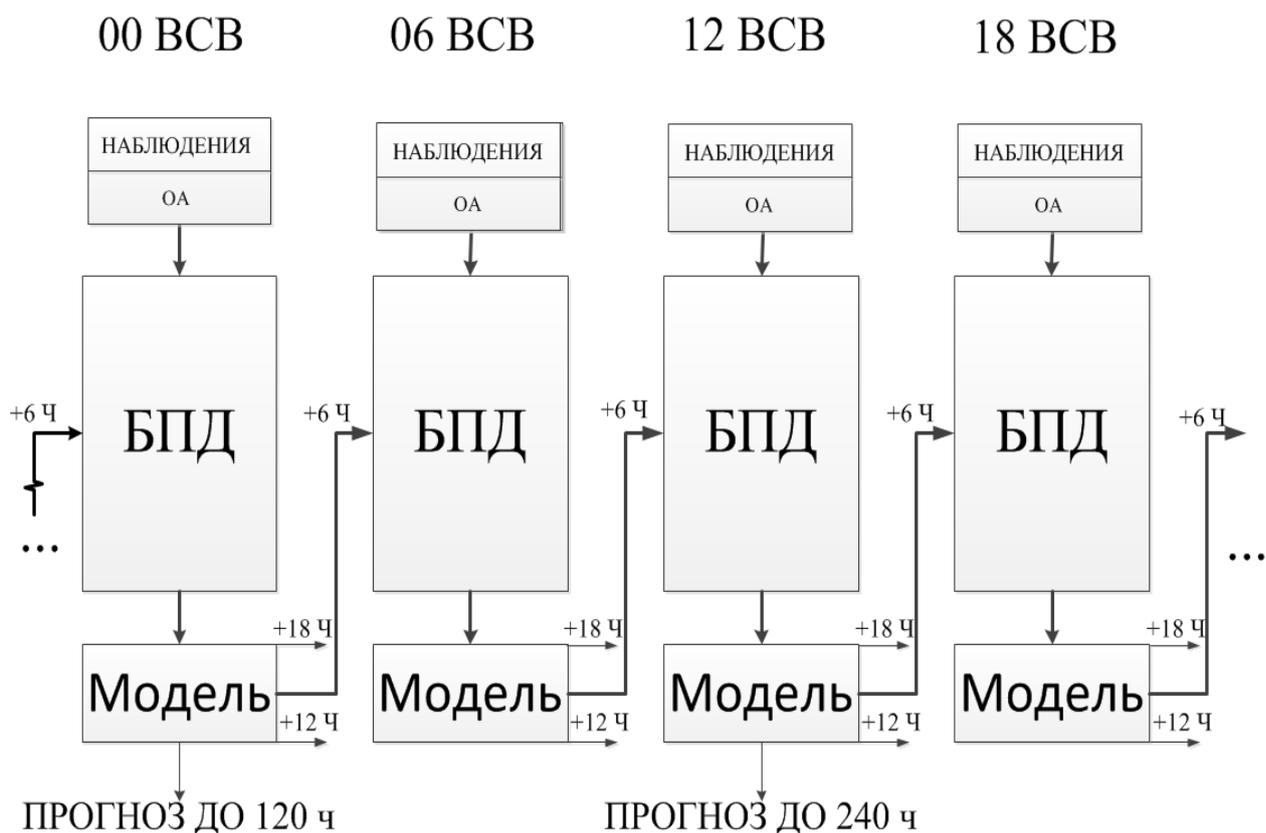


Рис. 1. Блок-схема оперативной технологии расчета прогнозов по модели ПЛАВ.

БПД – блок подготовки начальных данных.

уровнях с заблаговременностями 6, 12 и 18 ч. В штатном режиме используется только файл для заблаговременности +6 ч. В случае пропуска одного сеанса из-за сбоя вычислительной техники, например, вследствие проблем электроснабжения, в следующий работающий сеанс автоматически поступает сохраненное состояние с заблаговременностью +12 ч из предыдущего отработавшего сеанса. Если из-за сбоя был пропущен не один, а два сеанса, то используется состояние +18 ч из соответствующего сеанса.

Блок подготовки данных модели подобно описан в следующем разделе. Полулагранжева модель атмосферы и ее программный комплекс подробно представлены в [3].

2. Блок подготовки данных

Блок подготовки начальных данных схематически представлен на рис. 2.

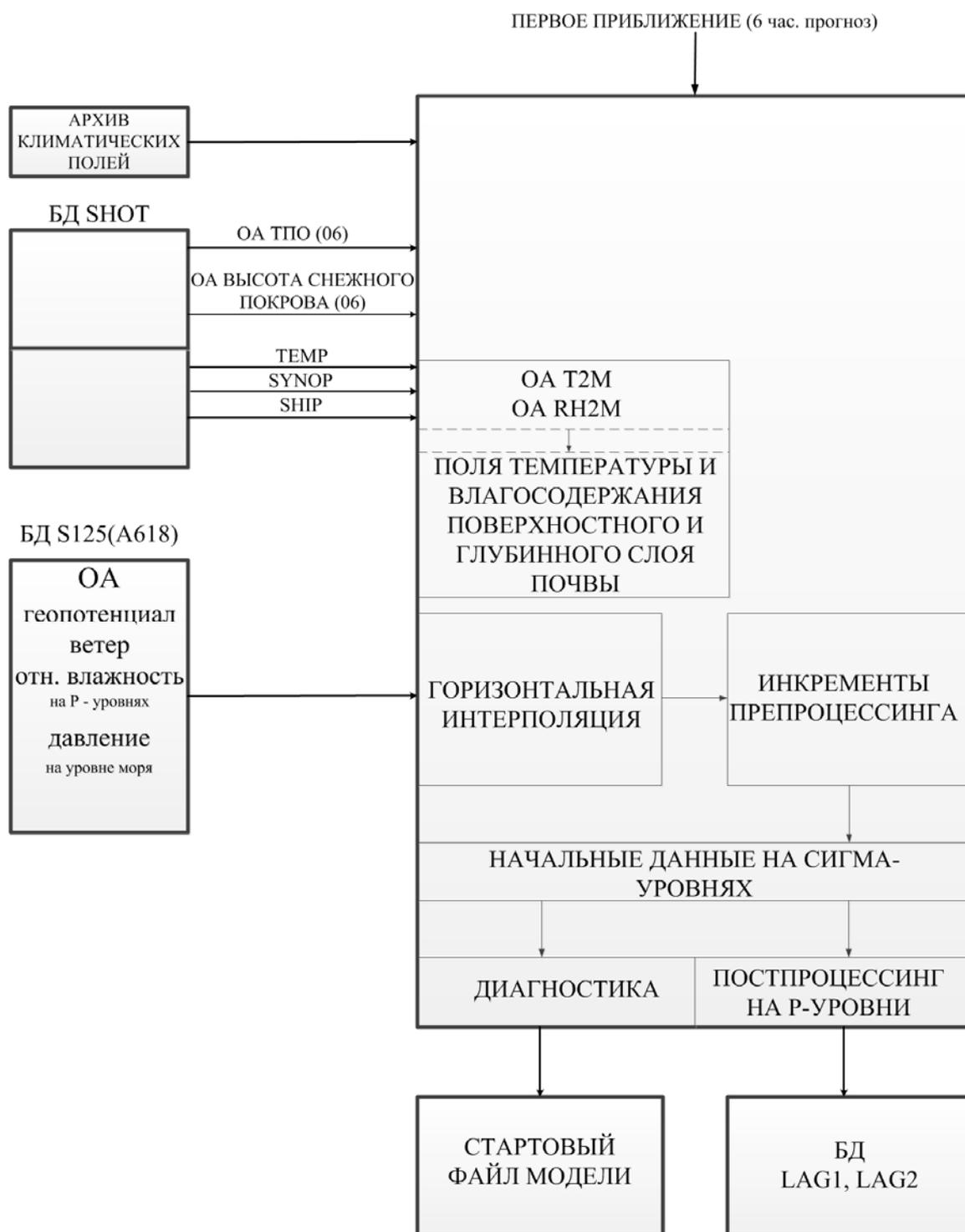


Рис. 2. Схема блока подготовки начальных данных для модели ПЛАВ.

В начале его работы происходит считывание климатических полей на поверхности из архива, содержащего постоянные поля (например, орография) и среднемесячные значения меняющихся полей (например, лиственный индекс). Архив содержит климатические данные физиографических характеристик поверхности суши (орография, маска «суша-море», длина шероховатости, альbedo, излучательная способность, процент песка и глины, глубина

деятельного слоя почвы, преобладающий тип растительности, альbedo, индекс лиственной активности, минимальное устьичное сопротивление), интерполированные на сетку модели $0,9^\circ \times 0,72^\circ$ по долготe и широте.

Орография и ее подсеточные характеристики рассчитывались на основе набора данных GTOPO30 с горизонтальным разрешением в 30 угловых минут. Остальные характеристики рассчитывались по спутниковым данным, обработанным и собранным в набор ESOCLIMAP [9] с горизонтальным разрешением 1 км для процентного содержания песка и глины в почве, 10 км – для остальных характеристик. Для получения текущих значений климатических полей выполняется линейная интерполяция по времени. Это обеспечивает гладкое изменение полей, имеющих сезонный ход.

Для подготовки начальных данных в блоке подготовки данных применяются:

- квазиусвоение для полей в свободной атмосфере,
- готовые объективные анализы (ОА) температуры поверхности океана и высоты снежного покрова (применяются ежедневно в срок 06 часов),
- объективные анализы температуры и влажности на уровне 2 м собственной разработки,
- схема коррекции полей температуры и влагосодержания поверхностного и глубинного слоев почвы.

В качестве входной информации для объективных анализов приземных температуры и относительной влажности используются станционные данные SYNOP и SHIP: температура точки росы и температура (для каждой станции по ним определяется относительная влажность, которая и используется для анализа влажности на уровне 2м), содержащиеся в базе данных SHOT системы АСООИ, и поле первого приближения, являющееся 6-часовым прогнозом модели ПЛАВ, стартующим с предыдущего цикла анализа.

Алгоритм разработанного объективного анализа относительной влажности основан на схеме оптимальной интерполяции и соответствует алгоритмам, применяемым в ECMWF и в модели HIRLAM [10].

По сравнению с применявшимся когда-то для модели ПЛАВ анализом СУД ИОИ [4] используется большее количество наблюдений в каждом узле сетки (число станций ограничено пятьюдесятью, а не восемью). Для близко расположенных станций в реализованном алгоритме анализа генерируется так называемое «супернаблюдение», являющееся средним арифметическим наблюдений, находящихся друг от друга на расстоянии меньше заданного. Еще одним отличием от анализа СУД-ИОИ является использование наблюдений на суше (море) для анализа только в точках сетки, которые расположены над сушей (морем). Разработанный анализ имеет в 2–14 раз меньшую

среднюю ошибку, а также в 1,5-2 раза меньшую среднеквадратичную ошибку относительной влажности по сравнению с анализом СУД-ИОИ.

Для модели ПЛАВ был также разработан и впервые в России реализован двумерный вариационный алгоритм усвоения для приземной температуры. Подробно этот алгоритм представлен в работе [2].

Разработка новых объективных анализов для приземной температуры и влажности позволила в итоге успешно запустить схему усвоения почвенных переменных, согласованную с применяемой в модели ПЛАВ параметризацией процессов на поверхности суши с учетом растительности [5, 6, 11] (ISBA, Interaction Soil Biosphere Atmosphere). Эта параметризация весьма чувствительна к заданию начальных значений для температуры и влагосодержания почвы, поэтому, впервые в России, была реализована схема усвоения для этих переменных [1]. В данной схеме, ввиду отсутствия оперативных наблюдений для параметров почвы, для коррекции значений почвенных переменных в каждой точке горизонтальной сетки используются инкременты анализа температуры и влажности на высоте 2-х метров. Реализованная схема коррекции почвенных переменных, предложенная D. Giard и E. Bazile [8], инициализирует следующие переменные: поверхностную температуру почвы, температуру глубинного слоя почвы, влагосодержание приповерхностного и глубинного слоя почвы

Совместное использование объективных анализов, параметризации ISBA и схемы коррекции для почвенных переменных позволили существенно улучшить прогноз температуры и относительной влажности на уровне 2м в модели ПЛАВ. С лета 2007 года глобальная полулагранжева модель применяет параметризацию ISBA, анализы приземной температуры и относительной влажности, а также схему коррекции почвенных переменных в оперативном режиме.

Ежедневно во время сеанса для срока 06 ч ВСВ в блоке подготовки данных происходит обновление полей температуры поверхности океана (ТПО) и водного эквивалента снежного покрова на основе объективных анализов ТПО и высоты снежного покрова на модельной горизонтальной сетке, рассчитываемых в рамках системы АСООИ на машинах Xeon4 (БД SHOT). Для расчета водного эквивалента снежного покрова используется эмпирическое значение плотности снега, зависящее от месяца года.

Затем в БПД производится считывание оперативных объективных анализов геопотенциала, ветра, относительной влажности на стандартных изобарических поверхностях и давления на уровне моря из БД S125. Эти анализы затем интерполируются по горизонтали с сетки $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$ на сетку модели $0,9^{\circ} \times 0,72^{\circ}$. Для всех полей, кроме относительной влажности, применяется специальная горизонтальная интерполяция, в

которой по долготе осуществляется интерполяция в пространстве коэффициентов Фурье. Для относительной влажности используется билинейная интерполяция. После этого вычисляются инкременты температуры, ветра, относительной влажности на изобарических поверхностях и инкремент давления на уровне моря. Полученные инкременты интерполируются по вертикали на модельные сигма-уровни. Для температуры и относительной влажности применяется линейная интерполяция по вертикали.

Полученные поля на модельной трехмерной сетке записываются в стартовый файл модели. Кроме того, блок подготовки данных выполняет интерполяцию стартовых полей модели на стандартные изобарические поверхности и записывает их в БД LAG1 и LAG2.

3. Программная реализация

Программные комплексы блока подготовки данных и полулагранжевой модели ПЛАВ написаны на языке Фортран 90. Отдельные фрагменты кода написаны на языке Фортран 77. В основном подпрограммы написаны с использованием норм программирования DOCTOR, устанавливающих правила именования переменных. Программные комплексы оперативной технологии распараллелены с помощью технологии OpenMP (перспективный вариант модели ПЛАВ реализован на основе сочетания технологий MPI и OpenMP). Компиляция и сборка модели и блока подготовки данных осуществляется с помощью команды make, использующей соответствующий Makefile. Makefile содержит список исходных файлов для компиляции, список необходимых библиотек и опции компиляции. Среди библиотек отметим xrd.a – библиотеку подпрограмм чтения/записи индексно-последовательных файлов GRIB в формате модели ARPEGE. Этот формат активно применяется в модели ПЛАВ. В результате работы make получается исполняемый файл модели либо блока подготовки данных. Все программные единицы имеют схожий интерфейс вызова, обеспечивающий считывание аргументов даты из командной строки вызова, а настройки путей к файлам – через файлы типа namelist.

На вычислительной системе SGI Altix4700 время работы оперативного сеанса на 8 процессорах для срока 00 ч ВСВ составляет 30–40 минут, а для срока 12 ч ВСВ – 40–50 мин. Блок подготовки данных и программы записи результатов прогнозов в базы работают на фронтэнде вычислительной системы из-за необходимости работы с удаленными базами данных системы АСОИИ. Расчет прогнозов производится через систему очередей PBSPro.

4. Расчет оценок прогнозов

В мае-июне 2010 года в Лаборатории перспективных численных методов Гидрометцентра России был разработан и внедрён в оперативное использование комплекс программ для ежедневного расчёта оценок успешности прогнозов, полученных с помощью модели ПЛАВ, осреднения этих оценок за различные периоды времени, а также для формирования результирующих месячных и годовых отчётов в формате ВМО.

Значения оценок рассчитываются и заносятся в базы после того, как вся необходимая информация становится доступной. Например, для того, чтобы оценить результаты численного прогноза, произведённого в 00 ч ВСВ 24 апреля, необходимо иметь фактические значения полей метеорологических величин. В качестве фактических используются поля объективного анализа Гидрометцентра России на сетке $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$. Все эти значения становятся доступными не раньше, чем расчет соответствующего верифицирующего анализа в 04 ч ВСВ 29 апреля. Таким образом, минимальная задержка между датой получения прогноза и возможностью оценки его качества обусловлена заблаговременностью этого прогноза.

В оперативном режиме расчет прогнозов модели ПЛАВ стартует два раза в сутки – в 02:52 ВСВ – прогноз на пять суток по данным за 00 ч ВСВ и в 14:52 ВСВ – прогноз на десять суток по данным на 12 ч ВСВ. Для каждого из этих сроков существует своя база оценок. Каждая база состоит из шести файлов, соответствующих рассматриваемым регионам. Этими регионами являются требуемые в обязательном порядке Комиссией по общим системам Всемирной метеорологической организации (КОС ВМО) тропики, Северное и Южное полушария, а также Россия, Европа и Азия. Начальной датой каждой из баз является 1 января 2010 года. Полями каждой из региональных баз являются заблаговременность прогноза, оцениваемая метеовеличина, вид оценки.

Количество заблаговременностей в каждой из баз определяется временем старта прогноза. В соответствии с рекомендациями КОС ВМО рассчитываются следующие оценки: осреднённые по соответствующим регионам средние и среднеквадратические ошибки прогнозов, корреляции аномалий и тенденций, а также градиентная ошибка. Оцениваются следующие поля: давление на уровне моря, геопотенциал на изобарических поверхностях 850, 500 и 250 гПа; температура на изобарических поверхностях 850, 500 и 250 гПа; модуль ветра на изобарических поверхностях 850, 500 и 250 гПа; поле температуры на уровне 2 м.

Значения оцениваемых полей прогнозов читаются из выходных файлов модели и интерполируются на сетку $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$. Значения фактических полей считываются из файлов объективного анализа, скопированных из базы данных S125. При наличии каких-либо ошибок чтения, а также при нереалистических значениях полей, в базу оценок записывается

число 999. В дальнейшем такие значения не участвуют в осреднении за требуемый период времени.

Ежемесячно после 16 ч ВСВ пятого числа каждого месяца, после того как становится возможным оценивание пятисуточного прогноза за последний день предыдущего месяца, формируется отчёт для отправки в ВМО. В этот отчёт входят осреднённые за прошедший календарный месяц оценки пятисуточных прогнозов по сроку 00 ВСВ, а также оценки десятисуточных прогнозов по сроку 12 ч ВСВ, осреднённые за период с 25 или 26 числа (в зависимости от месяца) позапрошлого месяца по 25 или 26 число предыдущего месяца. Кроме того, по итогам календарного года формируется годовой отчёт с оценками успешности прогнозов.

Заключение

Реализация модели ПЛАВ в оперативном режиме стала возможной благодаря Ж.-Ф. Желену, Метео-Франс и консорциуму ALADIN/LACE, любезно предоставившим параметризацию процессов подсеточного масштаба. Авторы выражают благодарность Р.Б. Зарипову за оказанную помощь в реализации оперативной технологии и работах по усовершенствованию модели ПЛАВ; А.Н. Багрову за разработку анализов температуры поверхности океана и высоты снежного покрова на сетке модели ПЛАВ; И.И. Жабиной, С.В. Лубову, И.В. Маковской, А.Ю. Недачиной, Ю.А. Степанову за помощь в реализации оперативной технологии модели ПЛАВ.

Работы, представленные в настоящей статье, выполнялись при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований 06-05-08109 офи, 09-05-12054 офи_м, 10-05-01066.

Список использованных источников

1. *Богословский Н.Н., Толстых М.А.* Реализация схемы усвоения для почвенных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // *Вычислительные технологии.* – 2006. – Т. 11. – Спец. выпуск. Ч. 3. – С. 20–25.
2. *Богословский Н.Н., Шляева А.В., Толстых М.А.* Усвоение почвенных и приземных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // *Вычислительные технологии.* – Т. 13. – Спец. Выпуск. – 2008. – С. 111–116.

3. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М.–Обнинск: ОАО ФОП, 2011. – 111 с.

4. Цырульников М.Д., Толстых М.А., Багров А.Н., Зарипов Р.Б. Развитие глобальной системы усвоения данных с переменным разрешением // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 4. – С. 5–24.

5. Bazile E., Haiti M. El, Bogatchev A., Spiridonov V. Improvement of the snow parameterization in ARPEGE/ALADIN. Proceedings of SRNWP // HIRLAM Workshop on Surface Processes, Turbulence and Mountain Effects; Madrid, 22–24 October 2001. – January 2002.

6. Boone A., Masson V., Meyers T., Noilhan J. The Influence of the Inclusion of Soil Freezing on Simulations by a Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme // J. of Applied Meteorology. – 2000. – V. 39. – P. 1544–1569.

7. Geleyn J.-F., Bazile E., Bougeault P., Deque M., Ivanovici V., Joly A., Labbe L., Piedelievre J.-P., Piriou J.-M., Royer J.-F. Atmospheric parameterization schemes in Meteo-France's ARPEGE N.W.P. model // Procs. of ECMWF Seminar on Parameterization of subgrid-scale physical processes 5–9 September 1994. – Reading, UK: ECMWF. – 1995. – P. 385–402.

8. Giard D., Bazile E. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model // Mon. Wea. Rev. – 2000. – Vol 128. – P. 997–1015.

9. Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models // J. of Climate. – 2003. – V. 16. – P. 1261–1282.

10. Navascués B. Analysis of 2 meter Temperature and Relative Humidity. – HIRLAM Technical Report, No. 28, Norrköping, January 1997.

11. Noilhan J., Planton S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models // Mon. Wea. Rev. – 1989. – Vol. 117. P. 536 – 549.

Поступила в редакцию 01.06.2011 г.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ВЕРСИЯ ПОЛУЛАГРАНЖЕВОЙ МОДЕЛИ ПЛАВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПОРЯДКА 20 КМ

М.А.Толстых^{1,2}, В.Г. Мизяк²

¹ *Институт вычислительной математики РАН*

² *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации*
tolstykh@mecom.ru, vmizyak@mecom.ru

Введение

Известно, что модели атмосферы с грубым пространственным разрешением неточно по сравнению с наблюдениями описывают статистику синоптических процессов в тропиках и средних широтах. Более того, такие модели могут включать лишь параметрическое описание крайне важного процесса глубокой конвекции. Перспективные модели атмосферы, свободные от этих недостатков, должны будут иметь горизонтальное разрешение порядка 1–10 км. Глобальные модели прогноза погоды в ведущих мировых центрах имеют горизонтальное разрешение порядка 20 км [3]. Кроме того, оперативный прогноз налагает ограничение на допустимое время счета модели (как правило, не более 20 мин астрономического времени для прогноза на 24 часа). Таким образом, требуется эффективное применение параллельных вычислений на сотнях процессоров для ускорения расчетов.

1. Параллельная реализация модели ПЛАВ

Глобальная полулагранжева модель ПЛАВ [2] в 2009 году принята в качестве основного численного метода среднесрочного прогноза погоды. В настоящее время разрешение оперативной версии модели составляет 0,9 градусов по долготе, 0,72 градуса по широте, 28 уровней по вертикали. По современным меркам, данное разрешение является весьма грубым, поэтому коллективом разработчиков модели была реализована новая версия модели, имеющая горизонтальное разрешение порядка 20–25 км, а вертикальное – 51 уровень. Оказалось, что из-за ограниченной масштабируемости существующей параллельной реализации, время расчета прогноза по существовавшей на конец 2010 года параллельной реализации модели не удовлетворяет упомянутым выше требованиям оперативности. Имейшиеся результаты параллельного ускорения модели представлены на рис. 1. Видно, что модель могла эффективно использовать лишь около 200 процессоров.

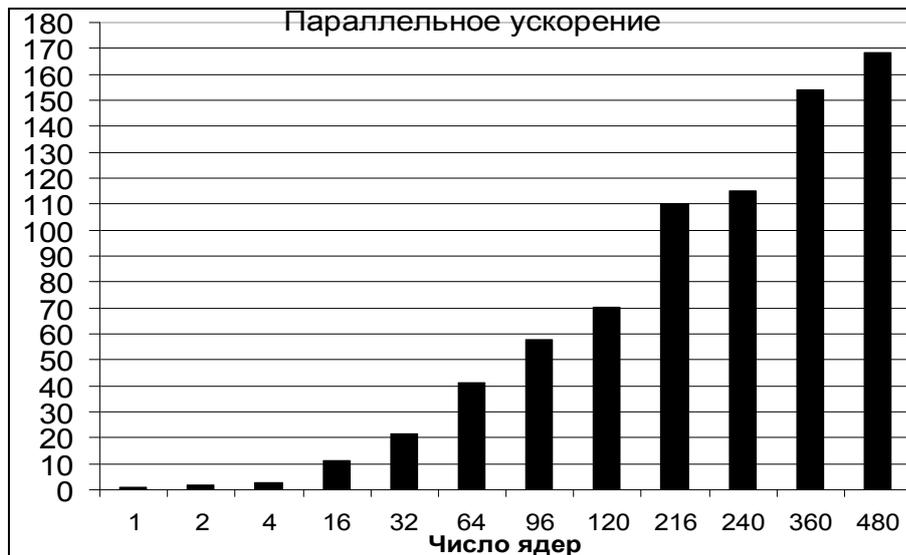


Рис. 1. Параллельное ускорение экспериментальной версии модели (2010 год) с разрешением $0,225 \times 0,18$ градусов, 28 уровней по вертикали.

Имевшаяся параллельная реализация полулагранжевой модели ПЛАВ на основе технологии MPI была подробно представлена в [5], дальнейшее развитие программной реализации модели на основе сочетания технологий MPI и OpenMP (гибридной технологии) описывается в [1]. Отметим, что гибридный подход был впервые в России применен к реальному сложному программному комплексу.

Приведем краткое описание параллельной реализации модели (подробнее см. [5, 1]). Рассмотрим вычислительную структуру модели. Основная часть вычислений производится в сеточном пространстве, расчетная область разбивается по широте (рис. 2 слева).

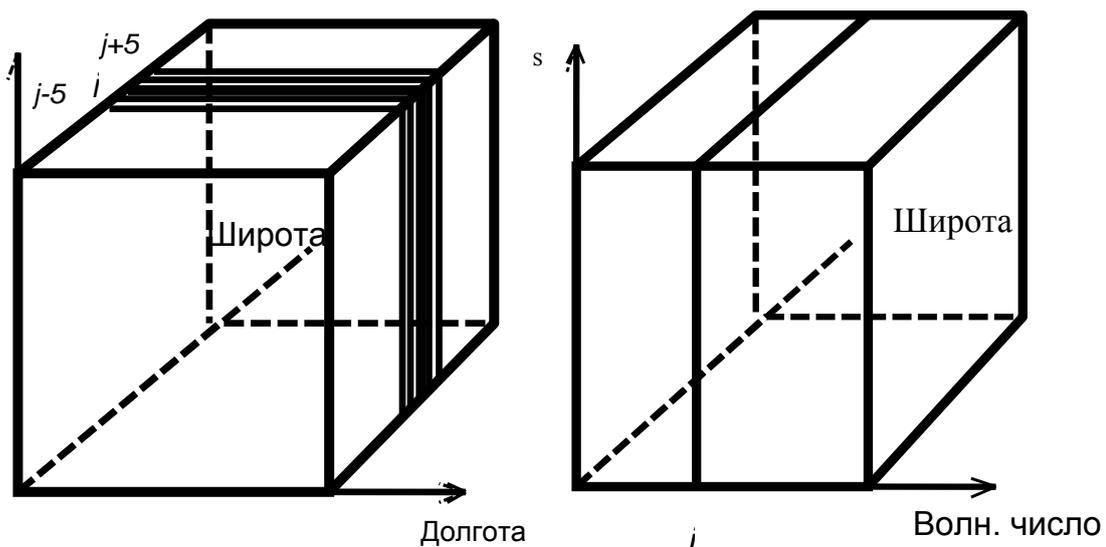


Рис. 2. Организация вычислений в сеточном пространстве (слева) и пространстве коэффициентов Фурье по долготе (справа).

Сначала вычисляются правые части прогностических уравнений (подробное описание дано в [2]), используя значения переменных на текущем шаге по времени. Эти правые части содержат тенденции прогностических переменных вследствие процессов подсеточного масштаба (солнечное излучение, глубокая конвекция и т.д.). Здесь мы имеем высокую степень параллелизма, так как эти вычисления для данной точки сетки не требуют значений переменных в смежных точках сетки в долготном и широтном направлениях, требуются только значения в вертикальных столбцах. Следует заметить, что эти вычисления занимают 61–70 % всего времени расчета. Затем вычисляются разностные аналоги дифференциальных операторов с помощью формул четвертого порядка. Эти вычисления для данной точки сетки требуют значения переменных из области. Процессоры обмениваются необходимыми значениями на границах с соседями перед тем, как эти вычисления начинаются. Там, где возможно, используются асинхронные обмены, что позволяет одновременно выполнять вычисления и обмены данными.

Следующий этап вычислений – поиск исходных точек лагранжевых траекторий и интерполяция вычисленных слагаемых уравнений в эти точки. Эта часть вычислений занимает около 30 % машинного времени. Шаблон интерполяции составляет 4 точки по каждой координате. Исходная точка траектории может лежать за несколько интервалов сетки от конечной точки (которая всегда является точкой сетки в полулагранжевом методе). Максимальная ширина области зависимости вычислений для данной точки сетки зависит от размера шаблона, значения шага по времени и максимальной скорости ветра в атмосфере (около 110 м/с). Типичная половинная ширина области зависимости в нашей модели для горизонтального разрешения $0,7^\circ$ составляет 7 точек в каждом горизонтальном направлении. Таким образом, количество данных, которое передается между процессорами, существенно больше, чем для эйлеровых моделей.

После того, как интерполяции и прямые быстрые преобразования Фурье по долготе заканчиваются, нам необходимо перераспределить данные для вычислений в пространстве коэффициентов Фурье по долготе. Вычисления для каждого коэффициента требуют значения всех широт (рис. 2 справа), так что нам нужно обеспечить каждый процессор соответствующими данными, используя транспонирование данных. Вычисления в пространстве Фурье включают вычисление правой части и решение дискретного уравнения типа Гельмгольца, неявной горизонтальной диффузии четвертого порядка и вычисления горизонтальных компонент вектора скорости из дивергенции и завихренности. Эти вычисления выполняются параллельно для каждого коэффициента Фурье. После вычислений в пространстве Фурье нам нужно снова перераспределить данные между

процессорами, так как для выполнения обратного преобразования Фурье по долготе нужны все коэффициенты.

Весь ввод-вывод выполняется нулевым процессом MPI, который затем рассылает необходимые данные остальным процессам. Примерно так же организована предварительная обработка результатов модели (интерполяция по вертикали с модельных сигма-уровней на стандартные изобарические поверхности).

При горизонтальном разрешении $0,18^\circ$ по широте модель теоретически может использовать до 1000 процессоров. Однако это будет требовать большого количества обменов данными между процессорами, поскольку необходимые данные будут размещены не только в соседних процессорах, но также в следующих за ними процессорах. Практически с помощью технологии MPI для упомянутого разрешения можно использовать до 125–150 процессоров (в зависимости от величины шага по времени модели).

В дополнение к распараллеливанию по технологии MPI было выполнено распараллеливание на основе OpenMP [1]. При этом с помощью OpenMP распараллеливались циклы по широте, т.е. те же, что и распараллеленные с помощью MPI. Тем самым заметно снижаются накладные расходы на организацию и синхронизацию.

Для повышения параллельной эффективности программного комплекса модели ПЛАВ было выполнено распараллеливание алгоритма постпроцессинга модели (расчета полей на стандартных изобарических поверхностях). Кроме того, все транспозиции данных были реализованы с помощью библиотеки подпрограмм SHMEM, имеющейся на вычислительных системах SGI, Cray и некоторых других. Эта библиотека реализует идеологию односторонних коммуникаций, которая также реализована в стандарте MPI-2. Кроме того, были выполнены оптимизации обменов, позволившие сократить объем пересылаемой информации.

2. Результаты расчетов

Были выполнены тестовые расчеты на вычислительной системе SGI Altix 4700, имеющей 1664 ядра процессоров Intel Itanium 9100, организованные в узлы по 128 ядер. Эта вычислительная система установлена в ГВЦ Росгидромета. Тестовые расчеты выполнялись для варианта модели с разрешением $0,225^\circ$ по долготе, $0,17-0,24^\circ$ по широте (примерно 20 км в средних широтах северного полушария), 51 неравномерно расположенных вертикальных уровней в немонопольном режиме (запуск через систему очередей). Размерность сетки задачи – $1600 \times 865 \times 51$. Значения параллельного ускорения в зависимости от числа используемых вычислительных ядер приведены на рис. 3 и 4.

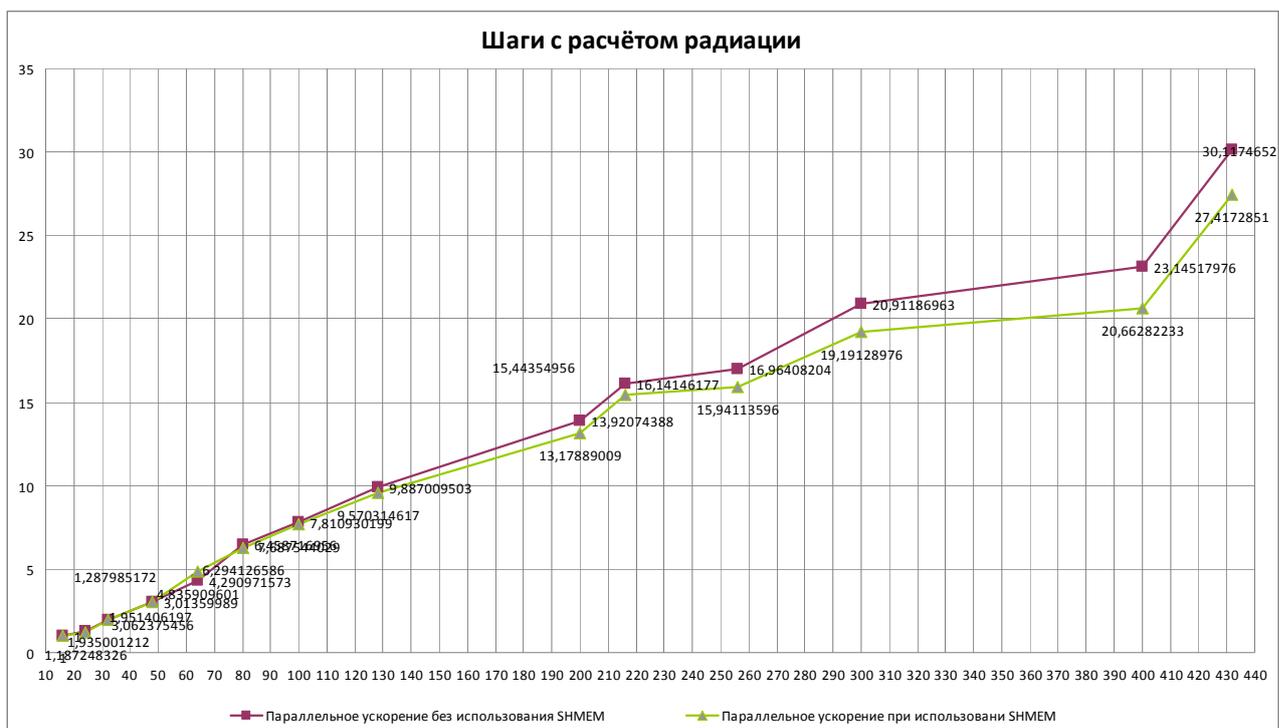


Рис. 3. Параллельное ускорение модели на вычислительной системе SGI Altix 4700 для шагов, в которых производится расчёт радиации.



Рис. 4. Параллельное ускорение модели на вычислительной системе SGI Altix 4700 для шагов, в которых не производится расчёт радиации.

На рисунках представлены графики параллельных ускорений для версий модели с использованием библиотеки SHMEM и без её использования. Первый график отражает

обратное отношение среднего времени выполнения одного шага модели, в котором не происходит вызова параметризации коротко- и длинноволновой радиации, к времени выполнения на 16 ядрах. Второй график построен по значениям времени для тех шагов, в которых радиация рассчитывается.

При небольшом количестве используемых процессорных ядер задача занимает слишком большой объем оперативной памяти и требует очень большого объема системных буферов MPI, поэтому минимальным количеством ядер, на котором можно запускать данную версию модели, является 16. По этой причине среднее время расчёта одного шага по времени при различном количестве используемых ядер сравнивалось с временем расчета на 16 ядрах. Форма графиков практически одинакова на обоих рисунках, значения ускорений в обоих случаях слегка различаются.

В ходе численных экспериментов было выявлено, что оптимальным количеством OpenMP-нитей является четыре. Судя по всему, это обусловлено особенностями аппаратной реализации вычислительного комплекса Altix 4700, на котором производились запуски модели (4 ядра имеют физически общую память на той же плате, что и ядра).

Видно, что параллельное ускорение при количествах ядер, которым кратно число 864, заметно выше, чем при других исследованных значениях. При запуске на 432 ядрах наблюдается суперлинейное ускорение в случаях запуска без использования SHMEM и для шагов с расчётом радиации при запуске с использованием SHMEM. Это связано с тем, что модельная сетка без учета полюсов имеет 864 узла по широте, а декомпозиция расчётной области для распараллеливания по технологии MPI происходит по широтным полосам. Таким образом, при количествах ядер, являющихся делителями 864, наблюдается равномерная загруженность всех ядер вычислениями, и передачи сообщений лучше синхронизированы во времени. Ещё одной причиной хорошего ускорения в этом случае является, по всей видимости, меньший объем данных, приходящийся на один процессор и, вследствие этого, лучшая их загрузка в кэш-память процессора. Это существенно увеличивает скорость доступа к данным в процессе вычислений.

Также можно заметить, что использование библиотеки SHMEM даёт прирост ускорения по сравнению с запуском без её использования только в случае расчёта на 64 ядрах, как в случае шагов с расчётом радиации, так и в случае шагов без расчёта радиации. Среднее время выполнения одного шага при использовании SHMEM увеличивается по сравнению с запуском без использования библиотеки при использовании более 256 ядер. Скорее всего, это обусловлено тем, что при увеличении количества ядер сильно увеличивается время ожидания каждым процессом завершения всех односторонних коммуникаций. Технология SHMEM предусматривает блокировку процесса, пока он не

окончил копирование из памяти другого процесса. Кроме того, перед началом обмена SHMEM предусмотрена барьерная синхронизация. В технологии MPI при использовании неблокирующих коммуникаций возможно выполнение арифметических операций на фоне обмена. Таким образом, при большом количестве процессов в варианте SHMEM тратится много времени на ожидание завершения всех односторонних вызовов.

Заключение

Для повышения параллельной эффективности программного комплекса модели ПЛАВ был выполнен ряд работ по оптимизации обменов между процессорами и распараллеливанию постпроцессинга, интегрированного в модель. В результате удалось заметно повысить эффективность параллельного программного комплекса модели. Прогноз на 24 часа по модели ПЛАВ в версии с размерностью сетки 1600x865, 51 уровнями по вертикали (разрешение во внетропической части Северного полушария не хуже 22 км) с параметризацией микрофизических процессов неконвективного характера ALARO-0 может быть рассчитан на 432 ядрах вычислительной системы Altix 4700 за 25 минут. Предполагается, что ряд запланированных оптимизаций модели (внедрение алгоритма дихотомии [4] вместо векторной прогонки с транспозициями данных, оптимизация процедур ввода-вывода) позволит сократить время расчета прогноза на сутки до 20 мин.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-05-01066, 12-09-12054 офи-м, Программ 14 и 17 Президиума РАН.

Список использованных источников

1. Володин Е.М., Толстых М.А. Параллельные вычисления в задачах моделирования климата и прогноза погоды // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – Т. 8. – С. 113–122.
2. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М.-Обнинск: ОАО ФОП, 2011. – 111 с.
3. Report of the twenty-fifth session of the Working Group on Numerical Experimentation (WGNE) (Offenbach, Germany, 26 November 2009). World Meteorological Organisation. Geneva. 2010. WMO/TD N 1524. – 25 p. – <http://www.wmo.int/pages/prog/wcrp/documents/wgne25rpt.pdf>.
4. Terekhov A.V. Parallel Dichotomy Algorithm for solving tridiagonal system of linear equations with multiple right-hand sides // Parallel Computing. – 2010. – V. 36. – P. 423–438.
5. Tolstykh M.A., Gloukhov V.N. Implementation of global atmospheric models on parallel computers // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7. – Спец. выпуск. – С. 101–109.

Поступила в редакцию 01.07.2011 г.

ПРИЧИНЫ АНОМАЛЬНО ЖАРКОГО ЛЕТА 2010 года НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Н.С. Сидоренков, К.А. Сумерова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
sidorenkov@mecom.ru*

Летом 2010 года на Европейской территории России наблюдалась чрезвычайно жаркая погода. На территории столичного региона максимальная температура воздуха в отдельные дни достигала 38-39 градусов. Были превышены многие суточные и абсолютные максимумы температуры. Всего за три месяца в Москве было зафиксировано 22 случая с рекордно высокой температурой. Устойчивая аномальная жара в Московском регионе в 2010 г. началась 21 июня и продолжалась 60 дней до 19 августа. Еще более длительная и жаркая погода наблюдалась в Поволжье и центрально-черноземных областях. Очаг, охваченный аномальной жарой и отсутствием осадков, имел диаметр около одной тысячи километров. Жара способствовала возникновению лесных и болотных пожаров, нанесла существенный ущерб природе, животному миру, населению и хозяйству.

В настоящее время эту небывалую жару связывают с глобальным потеплением климата, придумываются всевозможные «страшилки», строятся устрашающие сценарии последствий глобального потепления. Однако в действительности, как мы покажем ниже, аномальная жара в 2010 году была вызвана явлением **биения** колебаний. Фазы солнечного годового колебания температуры совпали с фазами основных лунных циклических колебаний температуры, произошло сложение их амплитуд. В итоге результирующая амплитуда годовых колебаний температуры воздуха оказалась катастрофически большой.

Известно, что зимой холодно, а летом тепло. Это нормальное годовое колебание температуры воздуха, обусловленное изменением склонения Солнца с периодом 365,24 суток. **Нормы** (средний годовой ход) температуры вычисляют путем осреднения временного ряда температуры за 30-летний интервал времени. Ниже используются нормы за 1961–1990 гг. Разность фактической температуры и нормы называется **аномалией температуры**. Правильно вычисленные аномалии температуры не должны содержать гармоник и субгармоник годового периода 365 сут.

Считается, что аномалии температуры изменяются случайным образом. Однако когда мы провели спектральный анализ ряда аномалий температуры воздуха в Москве за 1960–2003 гг., то обнаружили хорошо выраженные составляющие с периодами лунного года 355 сут., полупериода лунной эвекции 206 сут., четверти лунного года 87 сут. и лунного сидерического месяца 27 сут. (рис. 1).

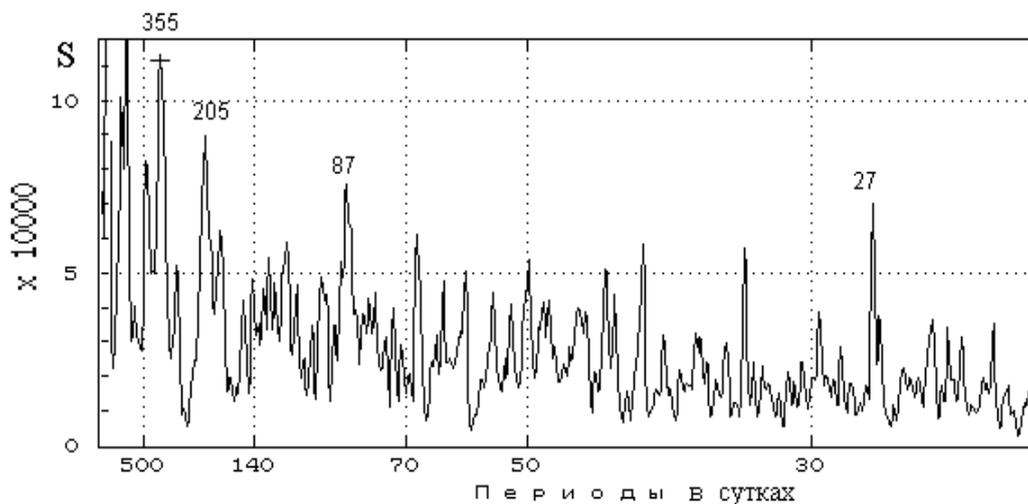


Рис. 1. Спектр аномалий температуры воздуха в г. Москве.

На фоне белого шума выделяются составляющие с периодами лунного года 355 сут., полупериода лунной эвекции 206 сут., четверти лунного года 87 сут., и лунного сидерического месяца 27 сут.

Как холодное небесное тело, Луна может влиять на температуру воздуха? Дело в том, что приливы влияют на количество облачности в атмосфере. Давно замечено, что в дни полнолуний и новолуний (сизигий) ясная погода случается чаще, чем в дни первой и третьей четвертей Луны (квадратур). От амплитуды и фазы лунного прилива зависит балл облачности в месте наблюдения. При ясной погоде днем атмосфера разогревается солнечной радиацией, а ночью выхолаживается за счет инфракрасного излучения. Летом день длится существенно дольше ночи, максимальна и полуденная высота Солнца над горизонтом. Поэтому летом при ясной погоде атмосфера ото дня ко дню разогревается солнечной радиацией, и в итоге наблюдаются положительные аномалии температуры. Зимой день короткий, ночь длится очень долго, а полуденная высота Солнца над горизонтом минимальна. Поэтому зимой при ясной погоде атмосфера ото дня ко дню выхолаживается за счет инфракрасного излучения и как следствие наблюдаются отрицательные аномалии температуры.

При облачной погоде значительно уменьшается поступление солнечной радиации днем, но зато ночью существенно сокращаются потери тепла за счет инфракрасного излучения. Поэтому при облачной погоде знаки аномалий температуры воздуха изменяются на обратные: днем и летом преобладают отрицательные аномалии, а ночью и зимой – положительные. Так взаимодействие гравитационных эффектов Луны с радиационными условиями в атмосфере (из-за изменения количества облачности) создают колебания суточных аномалий температуры воздуха с лунными периодами и с амплитудами, зависящими от физико-географических условий местности. В Москве амплитуда основного 355–суточного лунного колебания аномалий температуры составляет около 5° . Именно

поэтому в спектре аномалий температуры на рис. 1 имеется большой пик на периоде 355 сут.

Нам кажется, что влияние лунно-солнечных приливов на радиационные условия в атмосфере и океане является основным механизмом вынужденной синхронизации атмосферных процессов колебаниями лунно-солнечных приливных сил, рассмотренной в работе [6].

Существуют тесные связи между лунно-солнечными приливами и вариациями метеорологических характеристик [8]. Для иллюстрации приведем, например, спектр среднесуточных значений экваториального компонента h_2 , который тоже имеет основной максимум спектральной плотности не на периоде P_1 солнечного года (365 сут.), а на периоде $P_2 = 355$ сут. (рис. 2). Компонент h_2 характеризует вращение атмосферы относительно оси Ox_2 , лежащей в экваториальной плоскости и направленной из центра Земли на точку с координатами $\varphi = 0^\circ$, $\lambda = 90^\circ E$ [8]. То есть угловая скорость вращения атмосферы относительно оси Ox_2 изменяется с периодом $P_2 = 355$ сут. В спектрах индекса квазидвухлетней цикличности ветра в экваториальной стратосфере (QBO), некоторых коэффициентов сферических гармоник глобального поля атмосферного давления, аномалий некоторых гидрометеорологических характеристик также обнаружен период P_2 , а не P_1 . Что же это за период – P_2 ? Астрономы и народы Востока знают, что это лунный год. За 355 сут. протекает ровно 13 сидерических (относительно звезд) и 12 синодических (относительно Солнца) лунных месяцев.

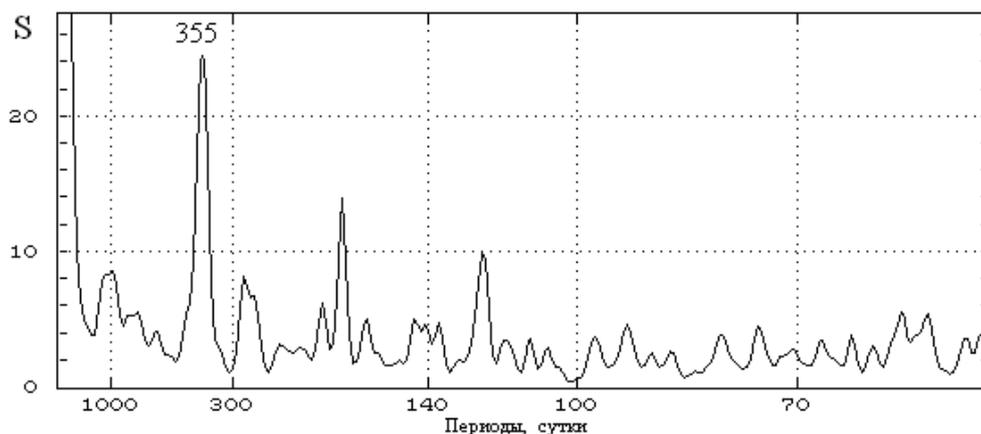


Рис. 2. Спектр среднесуточных значений экваториального компонента h_2 момента импульса атмосферы. Вместо обычного пика на периоде 365 дней выделяется пик на периоде лунного года 355 суток. Это свидетельствует о доминирующем влиянии лунных приливных сил в формировании меридиональной циркуляции атмосферы вдоль Атлантического и Тихого океанов (большого круга меридианов 0° и 180°).

Цикл 206 суток возникает из-за вращения большой оси лунной орбиты относительно большой оси земной орбиты. Перигей лунной орбиты совершает один оборот за 8,85 года, а перигелий земной орбиты – за 1 год. Перигей встречается с перигелием через каждые 412 суток. Но оси лунной и земной орбит становятся коллинеарными через каждые 206 суток. Описанная цикличность взаимных конфигураций двух орбит порождает наиболее сильную переменность гравитационного воздействия Солнца на движение системы Земля–Луна (эвекцию) и на лунные и земные процессы. Продолжительность лунного аномалистического (относительно перигея) месяца изменяется с этим периодом (206 сут.) от 28,5 до 24,8 суток [1]. Земля в своем месячном движении вокруг барицентра зеркально отражает все движения Луны. Поэтому она имеет такие же вариации скорости обращения вокруг барицентра с периодом 206 сут.

При изучении приливов вводят термин лунно-солнечный приливный год, под которым понимают интервал времени, содержащий целое число лунных месяцев и максимально близкий к солнечному году [2, 8]. Большая часть лунно-солнечных приливных лет имеет продолжительность 355 сут., а меньшая – 382 сут. Средняя длительность лунно-солнечного приливного года близка к 368 сут.

Помимо лунного года имеются еще более длительные циклы: октаетерис (греч. восьмилетний промежуток времени, длится 99 синодических месяцев, или 8 лет) и сарос (223 месяца, или 18,03 лет), по прошествии которых затмения Луны и Солнца повторяются приблизительно в прежнем порядке, Метонов цикл (235 месяцев, или 19 лет), по прошествии которого фазы Луны повторяются в те же дни солнечного года, инекс (358 месяцев, или 28,95 лет), по прошествии которого лунные и солнечные затмения повторяются примерно на тех же географических долготах, и т.д.

Солнце обеспечивает радиационный форсинг и порождает колебание всех гидрометеорологических характеристик с периодом 365,24 суток. Это годовое колебание взаимодействует с лунными циклическими колебаниями. В результате амплитуда годового колебания гидрометеорологических характеристик периодически изменяется со временем, возникает явление биений.

Сложение двух колебаний одинаковой амплитуды, но с разными частотами f_1 и f_2 , дает

$$\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t = 2 \cos \frac{2\pi(f_1 - f_2)t}{2} \cos \frac{2\pi(f_1 + f_2)t}{2}. \quad (1)$$

Последний косинус в правой части (1) описывает колебание, частота которого равна средней частоте исходных колебаний. Первый косинус описывает изменение его амплитуды. Амплитуда нарастает и спадает с удвоенной частотой $(f_1 - f_2)$, а не с частотой

$(f_1 - f_2)/2$, как можно было бы подумать на основании формулы (1). Происходит это потому, что амплитуда есть абсолютная величина отклонения от среднего значения рассматриваемой характеристики. Первый косинус описывает два цуга (пакета) колебаний с высокой частотой $(f_1 + f_2)/2$, а понятие цикл предполагает один цуг (пакет) высокочастотных колебаний. Поэтому частота цикла равна $(f_1 - f_2)$, а не $(f_1 - f_2)/2$.

Рассмотрим, например, воздействие лунного годового цикла $f_1 = 1/355$ сут. на годовые колебания температуры воздуха $f_2 = 1/365,24$ сут. В этом случае $(f_1 + f_2)/2 = 1/360$ сут., а $(f_1 - f_2) = 1/12869$ сут. = $1/35,2$ лет. То есть из-за воздействия лунного годового (355 сут.) цикла на солнечные годовые (365 сут.) колебания температуры или других гидрометеорологических характеристик возникает биения с периодом примерно 35 лет.

Выше отмечалось, что лунно–солнечный приливный год иногда может длиться не 355, а 382 сут. Сложение такого колебания с солнечным годом дает биения с периодом примерно 22 года. Однако в спектре аномалий температуры воздуха на рис. 1 есть пик 355 сут., но нет пика, соответствующего периоду 382 сут. Поэтому можно констатировать, что в Москве проявляется в статистическом смысле только 35-летнее биение температуры воздуха.

В климатологии давно известен Брикнеров цикл, длительность которого изменяется от 30 до 45 лет [7]. Вероятно, он связан с упоминаемыми выше и ниже многолетними астрономическими циклами, и, в первую очередь, найденным нами 35-летним циклом биений гидрометеорологических характеристик.

Биения – это периодическое изменение амплитуды результирующего колебания. Когда фазы суммируемых колебаний совпадают, их парциальные амплитуды складываются, и амплитуда результирующего колебания становится максимальной. Затем фазы колебаний постепенно расходятся, и амплитуда результирующего колебания уменьшается. Она минимальна при разности фаз, равной 180° , когда амплитуды суммируемых колебаний вычитаются.

В Москве по климатическим данным среднесуточная температура T достигает минимума -10° в январе, а максимума $+20^\circ$ в июле, то есть амплитуда её солнечного годового (365 сут.) колебания равна примерно 15° , а среднегодовая температура равна: $(-10^\circ + 20^\circ)/2 = 5^\circ$. В 2010 г. среднемесячные аномалии температуры составили в январе -6° , а в июле $+8^\circ$. Основной вклад в эти аномалии вносит лунное 355–суточное колебание. Допустим, что его амплитуда равна 5° . Построим график суммы этих двух колебаний

$$T = 5 + 15 \cos 2\pi t / 365 + 5 \cos 2\pi t / 355,$$

где 5 – среднегодовая температура в Москве, t – время в сутках, отсчитываемое от 1 января 1972 года. Этот момент принят за начальный потому, что в 1972 г. однозначно наблюдалось

аномально жаркое лето, то есть фазы солнечного и лунного годовых колебаний совпадали. Рис. 3 изображает результирующее колебание T с 1937 по 2012 г. В 1972 г. фазы «солнечного» (365 сут.) и «лунного» (355 сут.) годовых колебаний температуры T совпали, поэтому амплитуды этих двух колебаний сложились $15^\circ+5^\circ=20^\circ$, и амплитуда результирующего колебания T составила примерно 20° . Поскольку среднегодовая величина T равна 5° , постольку среднесуточная температура в июле достигала 25° , а в январе опускалась до -15° . Поэтому лето 1972 г. на ЕТР было аномально жарким, а зима холодной. В последующие годы фазы колебаний T расходились, и амплитуда результирующего колебания T постепенно уменьшалась. В 1990 г. разность фаз достигла 180° , и амплитуда уменьшилась до минимума $15^\circ-5^\circ=10^\circ$. Зима стала теплой, а лето прохладным. С 1991 по 2007 г. фазы колебаний T сходились, амплитуда постепенно увеличивалась и в 2007 г. она снова достигла максимального значения 20° .

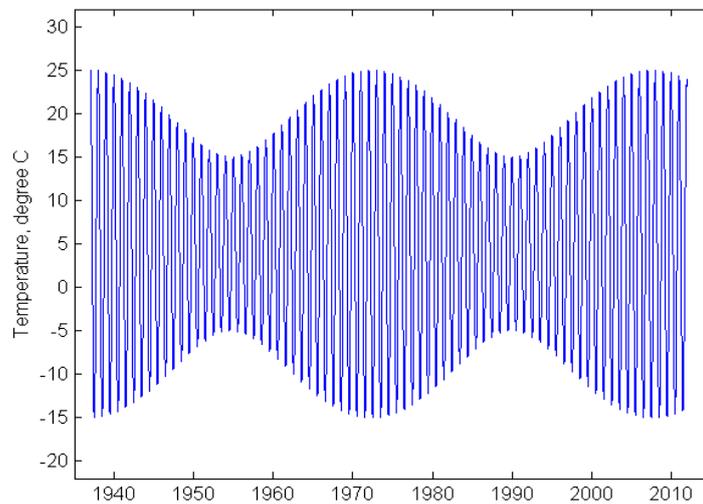


Рис. 3. Модель биений температуры воздуха (T) с двумя гармониками:

$$T = 5 + 15 \cos 2\pi t / 365 + 5 \cos 2\pi t / 355.$$

Итак, при сближении фаз солнечного и лунного годовых колебаний T результирующая амплитуда T увеличивается, а при расхождении фаз — уменьшается. Из-за такого хода температуры в тридцатые, семидесятые годы XX века и в первое десятилетие XXI века на ЕТР часто отмечались холодные зимы и теплые, засушливые лета (склонность к «континентальному» климату), а в пятидесятые и девяностые годы XX века серьезные морозы и засухи происходили реже обычного (склонность к «морскому» климату).

Колебание T с периодом 206 суток взаимодействует с полугодовым солнечным периодом 182,6 сут., в результате возникают биения с периодом 4,4 года ($1/182,6 - 1/206 = 1/1614 \text{ сут.} = 1/4,4 \text{ года}$). Из-за таких биений 35-летний цикл изменения амплитуды годового колебания температуры настолько затушевывается, что создается

впечатление, что экстремумы температуры меняются случайным образом (рис. 4). Вместо постепенного изменения амплитуды T (рис. 3) наблюдается разброс лет с жаркими и холодными сезонами. Так, наряду с 1972 г. умеренно жаркие летние сезоны были также в 1975, 1979, 1981 гг., а холодные зимы наблюдалась в 1969, 1972, 1976 и 1978/79 гг. Около 2007 г. снова участились жаркие и засушливые летние сезоны (2002, 2007, 2010, 2011 гг.) и холодные зимы (2002, 2006, 2010, 2011 гг.). На первый взгляд может создаться впечатление, что экстремумы T на рис. 4 меняются не периодически, а случайным образом. Так возникают «двойники» типа экстремумов в 1936 и 1938 гг. вместо 1937 г., и в 2002 и 2010 гг., вместо 2007 г.

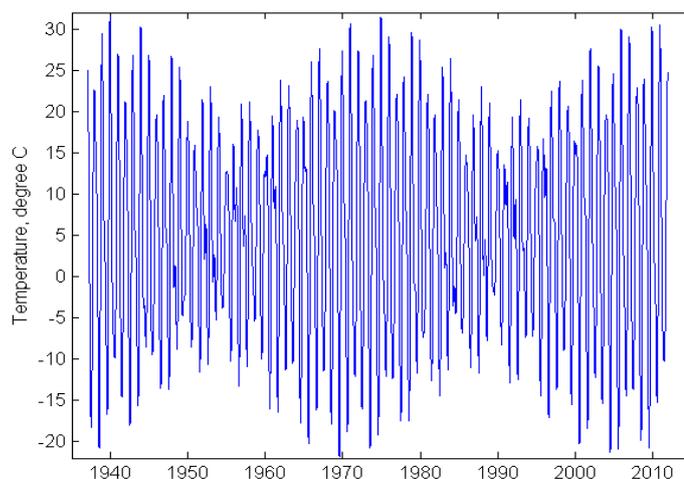


Рис. 4. Модель биений температуры воздуха T с четырьмя гармониками:

$T = 5 + 15 \cos 2\pi / 365 + 5 \cos 2\pi / 355 - 4 \sin 2\pi / 182.6 + 5 \sin 2\pi / 206$. Сложение «солнечного» полугодового периода (182,6 сут.) колебаний T с её «лунным» периодом в 206 сут., порождает биения T с периодом 4,4 года. Из-за этого 35 летний цикл изменения амплитуды годового колебания T (рис. 3) сильно затушевывается.

Аналогом для 2010 г. может быть 1972 г., который памятен нынешнему поколению жителей ЕТР по чрезвычайно жаркому лету и горящим болотам (рис. 5), и 2002 г. (рис. 6). Сдвиги на этих графиках возникают, в первую очередь, потому, что лунные циклы не кратны солнечному году. Мы провели исследования и нашли, что лучшими аналогами для теплого сезона 1972 г. были 1938 и 1901 гг., которые тоже были чрезвычайно жаркими (рис. 7). Как видно из рис. 7, в 1938 г. летом аномалии температуры были сопоставимы с летними аномалиями 2010 г. По данным [3] средние областные индексы засушливости Селянинова и Педя во всех центральных областях РСФСР за **июль-октябрь** 1938 г. были самыми высокими за весь 90-летний период. По каталогу [4], где приведены индексы засушливости «З» за **август-сентябрь** по экономическим районам основной зернопроизводящей зоны СССР за 1891–1983 годы, 1938 г. является самым засушливым за

весь период, как по большинству экономических районов, так и по всей европейской части СССР. 1938 год имел двойника – 1936 г., когда тоже было довольно жаркое лето и ход аномалий был похож на их ход в 1938 г. Поэтому последовательность жарких летних сезонов на ЕТР в 1901, 1936/1938, 1972 и 2002/2010 гг. связана, в первую очередь, с 35–летними биениями температуры воздуха. В 2010 г. к этому эффекту прибавились еще эффекты удвоенного Метонова 19–летнего цикла (аналог 1972 г.), 8–летнего субцикла октаетерис (в августе и сентябре 2002 г. на ЕТР тоже горели торфяники и леса), 29–летнего цикла инекс (лето 1981 г. на ЕТР было жарким и засушливым) и других менее значимых лунных циклов. В 2010 г. фазы этих циклов совпали, амплитуды сложились, и поэтому результирующая амплитуда достигла катастрофических значений.

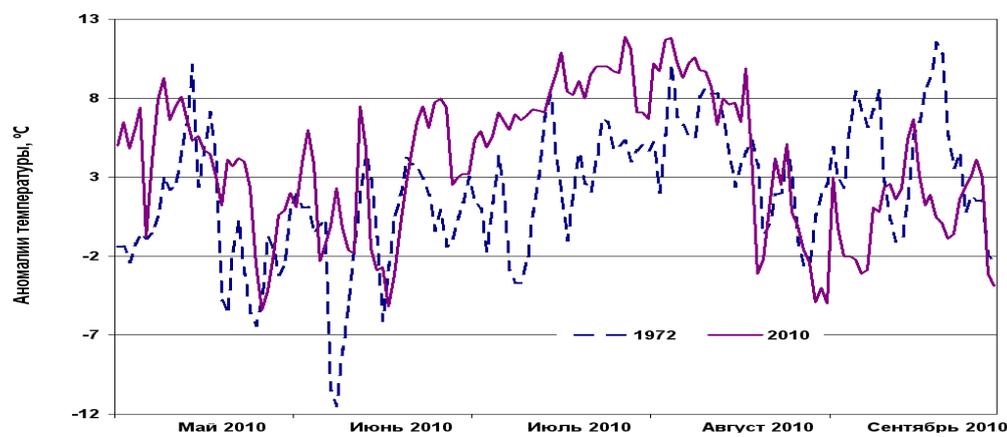


Рис. 5. Ход аномалий температуры воздуха в г. Москве за теплый период в 2010 и 1972 гг. Для максимальной корреляции аномалии 1972 г. сдвинуты на 28 дней вправо, т.е. 1 мая 2010 г. соответствует 2 апреля 1972 г. Коэффициент корреляции равен 0,48

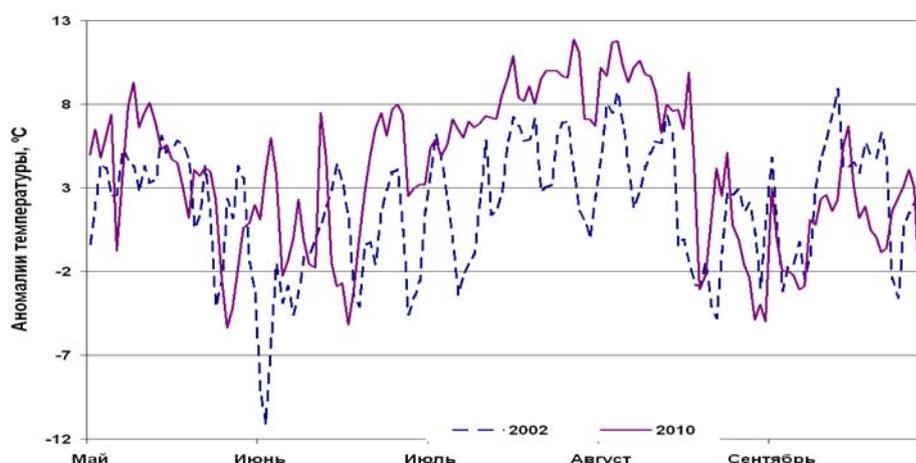


Рис. 6. Ход аномалий температуры воздуха в Москве за теплый период в 2010 и 2002 гг. Для максимальной корреляции аномалии 2002 г. сдвинуты на 13 дней вправо, т.е. 1 мая 2010 г. соответствует 18 апреля 2002 г.

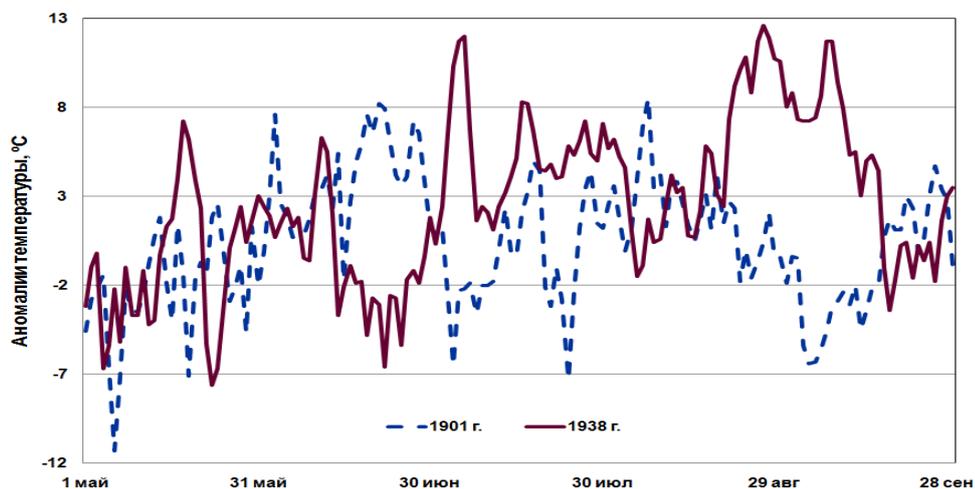


Рис.7. Ход аномалий температуры воздуха в г. Москве с 1 мая по 30 сентября в 1938 и в 1901 гг.

Кривая 1901 г. в среднем на $2,2^{\circ}$ лежит ниже кривой 1938 г. Это произошло из-за потепления климата, которое наблюдалось с 1903 по 1939 г. Нормы везде используются за период с 1961 по 1990 г.

Заметим, что жара на ЕТР в 1936/1938, 1972, 2002/2010 и 2011 гг. наблюдалась **во вторую половину лета** и часто продолжалась в сентябре. Например, в 1938 г. жара в центральных областях ЕТР началась 2 июля, и закончилась только в середине сентября. По продолжительности она почти на 15 дней превышала жару 2010 г. Очаги аномальной жары и отсутствия осадков локализовались в областях диаметром порядка тысячи километров. Именно в них возникают условия, при которых происходит самовозгорание торфяников из-за биохимических превращений. Болотные пожары являются хорошим естественным индикатором аномально жаркого лета.

Отметим еще связанный с Луной 6-летний цикл изменений валового сбора зерна в СССР и биения географических полюсов Земли. Этот цикл возникает из того, что узлы лунной орбиты непрерывно перемещаются по эклиптике к западу, совершая полный оборот за 18,61 лет. Перигей же лунной орбиты движется к востоку, оборачиваясь за 8,85 лет. В результате такого встречного движения соединения узла с перигеем происходят ровно через

6 лет: $\frac{1}{18,61} + \frac{1}{8,85} = \frac{1}{6,0}$. Земля в своем месячном движении вокруг барицентра зеркально

отражает все движения Луны. Поэтому она, и геофизические и гидрометеорологические процессы, протекающие на ней, имеет такие же 6-летние вариации.

Совместно с лунными циклами проявляют себя и циклы больших планет, прежде всего Юпитера и Сатурна, периоды обращений которых (11,86 и 29,46 лет) имеют общее наименьшее кратное, равное 60, и находятся почти в точном резонансе 5:2. Циклы 60 и 30 лет лежат в основе древних календарей. Они проявляются и в гидрометеорологических

процессах. Вспомним описанные в художественной и научной литературе жестокие засухи на ЕТР в 1891, 1921, 1951 и 1981 гг. В эти годы летом были не только засухи, но и высокие температуры. Среднемесячные аномалии температуры воздуха на ЕТР в июле 2011 г. тоже достигли редких по повторяемости значений. Например, аномалия температуры в Москве составила $+5,2^\circ$. За всю 130-летнюю историю наблюдений это третье по величине значение после 2010 ($+7,8^\circ$) и 1938 гг. ($+5,3^\circ$). В 2011 г. на ЕТР засушливых условий не было, но по аномалии температуры он подтвердил существование 60 и 30-летних циклов.

Ясно, что жара 2010 г. на ЕТР – это результат биения не только температурных колебаний, но и колебаний всех других гидрометеорологических характеристик – давления, ветра, влажности и т. д. Такие условия соответствуют малоподвижным блокирующим антициклонам, которые еженедельно регенерируют почти в одном и том же районе в течение длительного времени. Какие силы заставляют его регенерировать? Есть веские основания полагать, что это аномальные гравитационные силы, возникающие в процессе медленного изменения взаимного положения Луны, Земли, Солнца, вращения их больших осей (апсид), движения узлов их орбит, изменения их орбитальных параметров [8]. Изменения взаимных конфигураций в системе Земля–Луна–Солнце порождают медленно движущиеся в околоземном пространстве гравитационные возмущения. Последние индуцируют в атмосфере барические волны (антициклоны и депрессии), смещающиеся по земной поверхности вместе с гравитационными возмущениями. Рис. 8 и 9 иллюстрируют это предположение. На рис. 8 видно, что в июле 2010 г. ось блокирующего гребня располагалась на меридиане 40°E (аномалии геопотенциала превышают 15 дкм), а в апреле 2011 г. – на меридиане 5°E (аномалии геопотенциала превышают 12 дкм).

Выводы

Лунные циклы (355, 206 сут., 19 лет, 8 лет и др.) оказывают существенное влияние на изменчивость аномалий температуры воздуха.

Влияние лунно-солнечных приливов на облачность и через нее на радиационные условия в атмосфере и океане является основным механизмом формирования изменчивости аномалий температуры воздуха.

Из-за взаимодействия солнечно обусловленных годовых колебаний гидрометеорологических элементов с многочисленными лунными циклами возникают **биения**. Холодная зима и аномально жаркое лето в 2010 г. на Европейской территории России явились ярким примером таких биений гидрометеорологических элементов.

Сложение колебаний температуры с периодами солнечного (365 суток) и лунного (355 суток) года порождает 35-летний цикл биений, в результате которого климат постепенно

изменяется от «континентального» (при совпадении фаз) до «морского» (при расхождении фаз на 180°)

Список использованных источников

1. Авсюк Ю.Н., Суворова И.И. Изменение широт и вынужденные перемещения твердого ядра Земли. – Сборник научно-популярных статей – победителей конкурса РФФИ 2007 года. Выпуск 11. – М.: Изд. «Октопус», 2008. – С. 221–229.
2. Дуванин А.И. Приливный год и системы времени // Океанология. – 1999. – Том 39. – № 6. – С. 843–848.
3. Мещерская А.В., Блажевич В.Г. Многолетние ряды средних областных комплексных метеорологических параметров для основной сельскохозяйственной зоны СССР. 1891–1980 гг. – Ленинград: Изд. ГГО, 1985.
4. Мещерская А.В., Блажевич В.Г. Каталоги температурно–влажностных характеристик с учетом площади распространения по экономическим районам основной зернопроизводящей зоны СССР. 1891–1983 годы. – Ленинград: Изд. ГГО, 1990
5. Сидоренков Н.С. О неправильной оценке роли приливных явлений в геофизике // Геофизические исследования. – 2010. – Том 11. Спецвыпуск. – С. 119–128.
6. Сидоренков Н.С., Сумерова К.А. Синхронизация вариаций атмосферной циркуляции колебаниями лунно-солнечных приливов и подбор аналогов для долгосрочных прогнозов погоды // Труды Гидрометцентра России. – 2010. – Вып. 344. – С. 238–251.
7. Brückner E. Klimaschwankungen seit 1700 // Geographische Abhandlungen. – 1890. – Vol. 14. – P. 325.
8. Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2009. – 305 p.

Поступила в редакцию 22.06.2011 г.

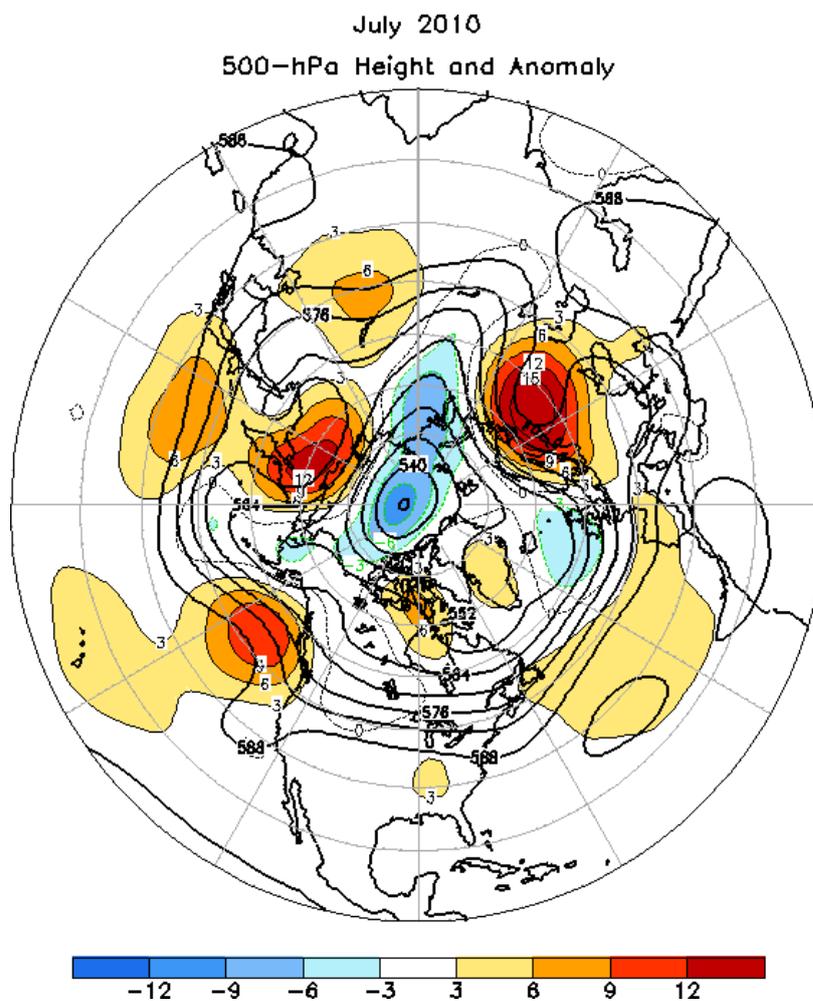


Рис 8. Карта среднемесячных высот и аномалий абсолютного геопотенциала поверхности 500 гПа Северного полушария в июле 2010 г. Изолинии геопотенциала проведены жирными линиями через 6 дкм, а аномалий – тонкими линиями (сплошными для положительных значений и пунктирными для отрицательных) через 3 дкм.

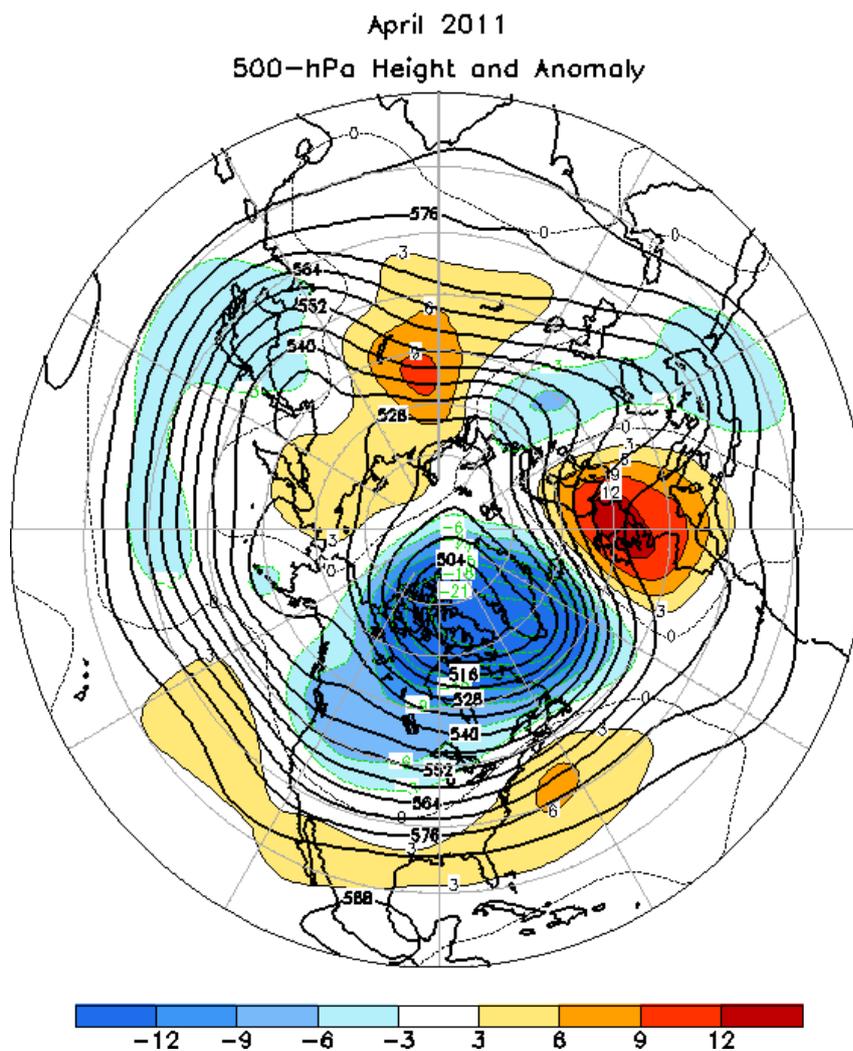


Рис 9. Карта среднемесячных высот и аномалий абсолютного геопотенциала поверхности 500 гПа Северного полушария в апреле 2011 г. Изолинии геопотенциала проведены жирными линиями через 6 дкм, а аномалий – тонкими линиями (сплошными для положительных значений и пунктирными для отрицательных) через 3 дкм.

Аннотации

УДК 551.509.32.001.572

Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU: ансамблевый прогноз / Алферов Д.Ю., Ривин Г.С. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 5–15.

В работе излагаются результаты первого в России опыта по построению системы мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды на основе негидростатической атмосферной модели COSMO-RU с шагом 14 км по горизонтали. Кратко приводится история и мировой опыт построения систем ансамблевого прогноза погоды (САП), в том числе систем глобальных средне- и долгосрочного прогнозов, уже работающих в Гидрометцентре России. Изложены основные применяемые в мировой практике методы построения САП, а также рассмотрен опыт построения мезомасштабных ансамблевых систем в рамках международного консорциума COSMO. Подробно рассматриваются состав построенного ансамбля, способ его реализации на суперЭВМ, используемые методы верификации получаемых прогнозов. Приведены результаты проведенных экспериментов по прогнозированию температуры на уровне 2 м, общие выводы, а также рекомендации и планы по сокращению времени вычисления ансамблевого прогноза.

Ключевые слова: ансамблевый прогноз погоды, диаграмма Талаграна, карты-«спагетти», параметризация подсеточных процессов.

Табл. 1. Ил. 4. Библ. 21.

УДК 681.3.068+ 551.501.5

Аспекты автоматизации в гидрометеорологической системе визуализации Isograph / Алферов Ю.В., Копейкин В.В. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 16–24.

Описываются механизмы автоматизации производства карт погоды в гидрометеорологической системе визуализации Isograph. Разработан специальный язык описания сценариев обработки карт в пакетном режиме и интерпретатор этого языка. Для возможности работы с языком сценариев пользователей-непрограммистов создан специальный инструмент — генератор скриптов, основанный на принципе «визуального программирования».

Ключевые слова: визуализация метеоданных, карты погоды, автоматизация построения карт, язык сценариев, интерпретатор, генератор скриптов.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 8.

УДК 681.142.4+551.501.6

Модернизация центров обработки оперативной гидрометеорологической информации Росгидромета / Анцыпович В.А., Лубов С.В. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 25–32.

В статье приведена информация по модернизации центров обработки оперативной гидрометеорологической информации в ходе выполнения Проекта модернизации и технического перевооружения учреждений и организаций Росгидромета. Рассмотрены основные вопросы по организации вычислительного процесса.

Ключевые слова: вычислительный комплекс, кластер, локальная вычислительная сеть, производительность, сервер.

.Табл. 1. Ил. 3.

УДК 551.509.33

Ансамблевый среднесрочный прогноз погоды: реализация технологии на современной компьютерной базе / Астахова Е.Д. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 33–46.

Необходимым компонентом прогнозов погоды является априорная оценка его качества в зависимости от текущей прогностической ситуации. Единственным практически реализуемым методом, способными дать такую информацию являются ансамблевые прогнозы. В статье дается описание системы ансамблевого прогноза на сроки до 10 суток, разработанной в Гидрометцентре России и обсуждаются особенности ее реализации на современной многопроцессорной технике.

Ключевые слова: ансамблевые прогнозы, средние сроки, бридинг, параллельные вычисления.

Ил. 3. Библ. 18.

УДК 551.509.32.001.572

Система краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU: технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов / Блинов Д.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 47–54.

В работе излагаются технологические аспекты работы постпроцессинга по организации эффективных визуализации (только для оперативных прогнозов по одному сроку 00 ч ВСВ более 600 метеорологических карт и 400 метеограмм) и доставки пользователям прогнозам, рассчитанных с помощью системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU.

Ключевые слова: визуализация, краткосрочный численный прогноз погоды, постпроцессинг.

.Табл. 2. Ил. 1. Библ. 7.

УДК 551.501.5

Построение изолиний по нерегулярной сети точек в рамках графической системы Isograph / Копейкин В.В., Алферов Ю.В. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 55–66.

Несмотря на успехи численного прогноза погоды, труд метеорологов остается определяющим. При производстве прогноза метеоролог должен начать анализировать карту погоды как можно раньше. Это обстоятельство и обуславливает необходимость изготовления карт непосредственно по данным наблюдений. В статье описывается алгоритм расчета изолиний по нерегулярной сети точек на основе построения триангуляции Делоне и кубической интерполяции.

Ключевые слова: изолинии, триангуляция Делоне, кубическая интерполяция, карты погоды, визуализация метеоданных.

Ил. 6. Библ. 4.

УДК 551.509.313: 551.510.522

Реализация алгоритма расчета турбулентного масштаба длины, основанного на методе смещения частиц воздуха под влиянием сил плавучести, в модуле пограничного слоя атмосферы модели COSMO-RU Гидрометцентра России / Перов В.Л.// Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 67–76.

В настоящее время, ряд численных моделей прогноза погоды (включая COSMO) использует так называемую “полупорную” схему расчета турбулентности. В этой схеме используется уравнение кинетической энергии турбулентности (E), а вертикальные коэффициенты турбулентного переноса находятся как произведение $E^{1/2}$ и турбулентного масштаба длины (пути смещения) l . Для вычисления E решается нестационарное нелинейное уравнение, выведенное для вторых моментов и имеющее ясную физическую интерпретацию его слагаемых. В то же время, для вычисления l используется простая локальная диагностическая формула, полученная Блэкадаром для нейтральной стратификации над ровной подстилающей поверхностью. Такой подход имеет недостатки при расчете турбулентности в верхней части пограничного слоя. В настоящей работе используется другой подход к вычислению турбулентного масштаба длины, основанный на методе смещения частиц воздуха вверх (вниз) под действием сил плавучести. При таком подходе L зависит не только от стратификации в слое, где проходит уровень z , но и от стратификации в других слоях (нелокальный L). В работе проводится сравнение расчетов с двумя различными турбулентными масштабами длины по 3-х мерной модели COSMO-RU. По результатам расчетов сделаны выводы о преимуществе нового подхода, в частности для конвективных случаев.

Ключевые слова: численная модель прогноза погоды, пограничный слой атмосферы, параметризация турбулентности, турбулентный масштаб длины, конвекция.

Ил. 7. Библ. 6.

УДК 551.515.2.001.572

Расчет на мезомасштабных моделях атмосферы ETA и WRF (NMM) взаимодействия тропических циклонов с полярными фронтами и струйными течениями / Похил А.Э., Глебова Е.С., Смирнов А.В. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 77–88.

Обсуждаются результаты исследования эволюции серий тропических циклонов (ТЦ) в Тихом океане на основании расчетов на мезомасштабных численных моделях атмосферы ETA и WRF (NMM). Рассчитаны траектории ТЦ и поля метеорологических величин в тайфунах и скоростей ветра и кинетической энергии струйных течений при взаимодействии тайфунов Парма, Мелор, Лупит с полярными фронтами и струйными течениями. Проведен анализ и сопоставление расчетных полей давления, ветра, кинетической энергии и траекторий ТЦ, полученных на обеих моделях, и сравнение их с реальными полями. Показано, что обе модели достаточно хорошо рассчитывают сложные траектории и меняющиеся в ходе взаимодействия поля ветра и кинетической энергии. Предлагается объяснение процессов, происходящих при взаимодействии вихрей со струйными течениями и полярными фронтами.

Ключевые слова: тропические циклоны, численное моделирование, взаимодействие тропических циклонов с другими элементами циркуляции.

Ил. 9. Библ. 10.

УДК 551.509.2.501.6

Технология обработки и доведения конечной агрометинформации до потребителей в Гидрометцентре России и оперативно-производственных учреждениях Росгидромета в программном комплексе PROMETEI / Пурина И.Э., Страшная А.И., Чекулаева Т.С., Игнатова Н.С. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 89–101.

Описана новая технология информационного обеспечения агрометеорологических прогнозов, реализованная в программном комплексе PROMETEI. Технология включает полный цикл обработки данных агронаблюдений, поступающих в новом коде КН-21: раскодирование, размещение в специализированной базе данных, архивацию и визуализацию в виде сводных журналов синоптических и фенологических наблюдений. Рабочее место по России включает 43 декадных журнала, по Московской области – два сводных журнала ежедневных наблюдений и 16 декадных. Кроме того технология содержит процедуры формирования агрокарт по территории России и отдельным федеральным округам. В настоящее время реализовано построение 69 видов карт. Все материалы используются в оперативной работе отдела агрометпрогнозов. Кроме того, журналы и карты ежедекадно выкладываются на сайт Методического кабинета ГМЦ РФ и могут быть доступны специалистам УГМС в оперативном режиме.

Ключевые слова: программный комплекс PROMETEI, архитектура клиент-сервер, агрометеорологическая информация, новый код КН-21, база раскодированных агрометеорологических данных, АРМ агрометеоролога, визуализация агрометнаблюдений, сводный журнал наблюдений по областям, агрокарты, передача журналов в регионы, размещение на сайте.

Табл. 2. Ил. 8. Библ. 4.

УДК 551.509.33

Технология оперативного выпуска глобальных прогнозов на 1–10 суток на основе модели T169L31 (шаг сетки 60–70 км) на новой суперкомпьютерной технике ММЦ Москва / Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Пономарева Т.Я., Цветков Ю.В. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 102–123.

Приводится описание технологии глобального прогностического численного моделирования на основе спектральной модели ФГБУ «Гидрометцентр России» T169L31. Новая оперативная версия модели была реализована на новой высокопроизводительной многопроцессорной вычислительной технике ММЦ «Москва» и включила в себя алгоритмы, обновленные с применением приемов распараллеливания. Это позволило при повышении пространственного разрешения во много раз сократить время оперативного счета. Подробно рассматривается структура компоненты «модель» в новой технологии, наиболее измененная при создании новой версии и временные регламенты выполнения задач технологии, констатируется эффективность использования новой суперкомпьютерной техники. Рассматриваются особенности показателей успешности версии T169L31 по сравнению с предыдущей версией T85L31, являвшейся базовой глобальной моделью ФГБУ «Гидрометцентр России» в период 2000–2010 гг.

Ключевые слова: среднесрочный прогноз погоды, спектральная модель, параллельные вычисления.

Ил. 4. Табл. 3. Библ. 8.

УДК 551.5

Новая версия автоматизированной технологии АСООИ на выделенном сервере Гидрометцентра России / Степанов Ю.А., Жабина И.И. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С.124–144.

В статье рассматриваются общие принципы новой версии технологии «Автоматизированная Система Оперативной Обработки Информации» (АСООИ) Гидрометцентра России, которая разработана на выделенном Linux-сервере и функционирует в экспериментальном режиме. Технология базируется на объектно-ориентированном подходе и реализована на языках программирования Python и KornShell, что обеспечивает как высокую масштабируемость и портируемость прикладного и управляющего программного обеспечения, так и трёхзвенную архитектуру управления (middleware). Middleware связывает подтехнологии АСООИ (автоматизированная система управления, система унифицированных Банков Задач и средств быстрой разработки, система централизованных информационных баз данных, система управления ресурсами сервера и гибкие средства администрирования) в единую интегрированную среду.

Ключевые слова: Автоматизация, технология, система управления, сервер, интегрированная среда, трехзвенная архитектура управления, middleware, программное обеспечение, язык программирования, Python, Linux, объектно-ориентированный подход, быстрая разработка, масштабируемость, портируемость, администрирование, информационное обеспечение, АСООИ, банк задач, база данных, приложение, ресурс, оперативный вычислительный процесс, оперативная продукция.

Ил. 3. Библ. 6.

УДК 551.509.313.41

Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ / Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 145–154.

В статье описывается оперативная технология расчета среднесрочных прогнозов с помощью глобальной полулагранжевой конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛ-АВ, разработанной в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России. Технология расчета реализована на параллельной вычислительной системе SGI Altix 4700. Описаны входящие в нее блок подготовки начальных данных для модели (включая технологии получения объективных анализов), параллельный программный комплекс модели, средства записи прогностической продукции из выходных файлов модели в базы данных, а также сценарии (скрипты) управления сеансами. Также приводится описание комплекса программ для расчёта оценок успешности прогнозов, полученных с помощью модели ПЛАВ и формирования результирующих отчётов в формате ВМО.

Ключевые слова: глобальная модель атмосферы, оперативная технология, подготовка начальных данных для численных прогнозов.

Ил. 2. Библ. 11.

УДК 551.50

Параллельная версия полулагранжевой модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением порядка 20 км / Толстых М.А., Мизяк В.Г. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 155–161.

Были выполнены работы по оптимизации параллельного программного комплекса глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в среде MPI, SHMEM и OpenMP на вычислительной системе SGI Altix 4700. В частности, была распараллелена процедура постпроцессинга, интегрированного в модель. В результате была достигнута практически линейная масштабируемость программного комплекса модели до 432 процессоров. Время счета прогноза на сутки по новой версии модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением 20–25 км на 432 процессорах сократилось до 25 мин.

Ключевые слова: глобальная полулагранжева модель атмосферы, гибридное распараллеливание на основе MPI и OpenMP, масштабируемость параллельных программ.

Ил. 4. Библ. 5.

УДК 551.509.33

Причины аномально жаркого лета 2010 г. на Европейской территории России / Сидоренков Н.С., Сумерова К.А. // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 162–174.

Летом 2010 года на Европейской территории России (ЕТР) наблюдалась небывалая по продолжительности и интенсивности катастрофически жаркая погода. Жара унесла десятки тысяч жизней, выжгла сотни сел и около миллиона гектаров леса, причинила России ущерб в сотни миллионов долларов.

Анализ метеорологических наблюдений и спектральный анализ суточных аномалий температуры воздуха показал, что жара возникла из-за биений (медленных периодических изменений результирующих амплитуд) взаимодействующих колебаний температуры с близкими частотами. Основной 35-летний период биений температуры и других гидрометеорологических характеристик возникает из-за сложения их колебаний с периодами солнечного (365 суток) и лунного (355 суток) года. В 2010 г. на ЕТР фазы «солнечных» годовых колебаний гидрометеорологических характеристик совпали с фазами их основных «лунных» колебаний. В результате амплитуды этих колебаний сложились и достигли экстремальных значений.

Ключевые слова: Аномально жаркое лето, синхронизация колебаний, спектральный анализ, лунные циклы, биения колебаний, диагноз и прогноз погодных условий

Ил. 9. Библ. 8.

Summaries

The mesoscale weather forecast COSMO-RU system: the ensemble forecast / Alferov D.Yu., Rivin G.S. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 5–15.

The results of Russians first experiments in mesoscale ensemble weather prediction using the nonhydrostatic atmospheric model COSMO-RU (horizontal step – 14 km) are presented in this article. The history and world experience in the ensemble weather prediction are briefly told, including systems for the global middle- and long-term prediction already using in the Hydrometcenter of Russia. The main methods of ensemble forecasting used in world practice and the COSMO consortium experience in mesoscale ensemble forecasting are described. The composition of the constructed ensemble, its implementation on supercomputers and the forecast verification methods used are described in detail, together with the results of experiments on the forecast of the temperature at 2 m, level the overall conclusions, recommendations and plans to reduce the computation time of the ensemble forecast.

Keywords: ensemble weather forecasting, Talagrand diagram, spaghetti plots, subgrid-scale parameterization.

Fig. 4. Tab. 1. Ref. 21.

Aspects of automation in the hydrometeorological visualization system Isograph / Alferov Yu.V., Kopeikin V.V. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 16–24.

Mechanisms of the automation of the weather mapping in the hydrometeorological visualization system Isograph are described. A special script language of the map processing in a package mode and the interpreter of this language are developed. For a possibility of the work with script language for users-nonprogrammers a special tool – the script generator based on a “visual programming” principle is created.

Keywords: meteo data visualization, weather maps, mapping automation, script language, interpreter, script generator.

Fig. 2. Tab. 1. Ref. 8.

Modernization of the Roshydromet operational hydrometeorological information processing centers / Antsipovich B.A., Lubov S.V. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 25–32.

Information on modernization of the operational hydrometeorological information processing centers conducted within the framework of the “Modernization and Technical Refinement of the Roshydromet Institutions and Organizations” project is presented in the paper. The key issues of the computational process arrangement are discussed.

Keywords: Computing system, cluster, local computational network, capacity, server.

Tab. 1. Fig.. 3.

Ensemble medium-range weather prediction: the technology implementation on a modern computer base / Astakhova E.D. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 33–46.

An a priori evaluation of the weather quality prediction skill, depending on the current prognostic situation, is a necessary component of weather forecasts. The only practically realizable method that can provide users with such information is ensemble prediction. An ensemble prediction system for up to 10 day forecasting developed at the Hydrometcenter of Russia is described in the article and specific features of its implementation on modern multiprocessor techniques are discussed.

Keywords: ensemble prediction, medium range, breeding, parallel computing.

Fig. 3. Ref. 18.

The mesoscale weather forecast COSMO-RU system: the technological aspects of the visualization and mailing of the forecasts / Blinov D.V, Rivin G.S., Rozinkina I.A. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 47–54.

The paper outlines the technological aspects of post-processing on the organization of effective visualization (only for the operational forecasts in term of 00 hour UTC more than 600 weather maps and 400 meteograms) and delivery to users forecast, calculated with the help of short-term weather forecasting COSMO-RU.

Keywords: visualization, short-range numerical weather prediction, postprocessing.

Tab. 1. Fig. 2. Ref. 7.

Construction of isolines on an scatter points network within the graphic system Isograph framework / Kopeikin V.V., Alferov Yu.V. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 55–66.

Work of meteorologists remains deciding despite successes of a numerical weather forecast. During the forecasting the meteorologist should start to analyze a weather map as soon as possible. This circumstance also determines necessity of mapping directly according to observations. The algorithm of calculation of isolines on an scatter points network on a basis of the Delaunay triangulation construction and cubic interpolation is described in the article.

Keywords: isolines, Delaunay triangulation, cubic interpolation, weather maps, meteo data visualization.

Fig. 6. Ref. 4.

The implementation of the algorithm for calculating the turbulent length scale, based on the method of displacement of air parcel under the influence of buoyancy forces, in a module of the atmospheric boundary layer, in the model COSMO-RU of the Russian Hydrometcenter / Perov V.L. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 67–76.

Currently, a number of numerical weather prediction models (including the COSMO) use a so-called 1.5 closure scheme for calculating of the turbulence. In this scheme, the equation of turbulent kinetic energy (E) is used, and the vertical turbulent transport coefficients are calculated as a product of $E^{1/2}$ and the turbulent length scale (mixing length) l . To calculate the E , non-stationary nonlinear equation derived for the second moments is solved. The E equation has a clear physical interpretation of its terms. At the same time, to compute l a simple local diagnostic formula is used. The formula was obtained by Blackadar for neutral stratification over a flat underlying surface. This approach has drawbacks in the calculation of turbulence in the upper part of the atmospheric boundary layer. In this paper a different approach to calculation of the turbulent length scale is used. This approach is based on the method of displacement of air parcel up (down) under the influence of buoyancy. With this approach, l depends not only on the stratification of the layer, where the level z , but also on stratification of the other layers (nonlocal l). In a comparison of calculations with two different length scales of turbulence in 3-D model COSMO-RU. The calculations show superiority of the new approach, in particular for convective cases.

Keywords: numerical weather prediction model, atmospheric boundary layer, turbulence parametrization, turbulent length scale, convection.

Fig. 7. Ref. 6.

Calculation of tropical cyclones' and polar fronts and jet-streams interaction on mesoscale models of atmosphere ETA and WRF (NMM) / Pokhil A.E., Glebova E.S., Smirnov A.V. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 77–88.

Results of investigation of tropical cyclones' (TC) series evolution in the Pacific ocean derived from mesoscale numerical models of atmosphere ETA and WRF(NMM) are discussed. Trajectories of tropical cyclones and meteorological fields in typhoons, as well as fields of velocity and kinetic energy of jet-streams, during typhoons' Parma, Melor and Lupit interaction with polar fronts and jet-streams were calculated. The analysis of model fields of pressure, wind, kinetic energy and TC trajectories in ETA and WRF and their comparison with fact and each other were done. It is shown that both models calculate complex trajectories and fluctuations of kinetic energy and velocity in jet-streams in the period of the interaction. An explanation of the processes occurring in the course of vortices' interaction with polar fronts and jet-streams is proposed.

Keywords: tropical cyclones, numerical modeling, interaction of tropical cyclones with other elements of atmospheric circulation.

Fig. 9. Ref. 10.

Technology of processing and DELIVERING of the final agrometeorological information to the customers in HMC Russia and operating organizations of Roshydromet structure in software package PROMETEI / Purina I.E , Chekulaeva T.S, Strashnaia A.I, Ignatova N.S. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 89–101.

The new technology of the information support of the agro-forecasts, realized in a software package program complex Prometheus, is described. The technology includes a full operation cycle of the agro-observations received in new code KH-21: decoding, placing in a specialized database, archiving and visualization in the form of summary logbooks of synoptic and phenological observations. The standard working place for Russia includes 43 decade logs, for Moscow Region - two summary logs of daily observations and 16 decade logs. In additions the technology also contains procedures of agro-mapping for Russia and separate federal districts. Currently 69 types of maps are implemented. All data are used in operative work of the agro-forecasts department. Additionally, logs and maps have been uploading to the internet site of Methodical office of HMC RF every decade and are accessible to the specialists in operative mode.

Keywords: Software package PROMETEI, client/server architecture, agrometeorological information, new code KH-21, data base for agrometeorological observations, forecaster's workbench, observations visualization, observations magazines for the federal districts, agromaps, logs transmission to the regions, hosting on a site.

Tab. 2. Fig. 8. Ref. 4.

A technology of the operational global weather prediction 1 to 10 days ahead based on the T169L31 model (with a 60-70 km resolution) on the new supercomputer technique of Moscow WMC / Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Ponomareva T.Ya., Tsvetkov V.I. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 102–123.

A technology of global prognostic numerical simulations with the T169L31 spectral model of the Hydrometcenter of Russia is described. The new operational version of the model was implemented on new high-performance multiprocessor computers at Moscow WMC and included new parallel algorithms. This made it possible to improve the spatial resolution of the model considerably but to reduce the computing time. The structure of the model component of the new technology is considered in detail because the model was subject to the greatest modifications. The time schedule of different tasks of the technology is thoroughly examined and the efficiency of the technology implementation on the new supercomputer is demonstrated. Verification scores for T169L31 are considered and compared to those for the T85L31 model, which was the basic global model of the Hydrometcenter of Russia in 2000-2010.

Keywords: medium-range weather prediction, spectral model, parallel computing.

Fig. 4. Tab. 3. Ref. 8.

New version of automated technology ASOIP on dedicated server of Hydrometcenter of Russia / Stepanov Yu.A., Shabina I.I. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 124–144.

General concepts of a new version of the Hydrometcenter of Russia computer technology “Automated System for Operational Information Processing” (ASOIP) are considered. The technology is implemented on a dedicated Linux-server and works in research mode. It is based on the object-oriented approach and is realized in Python and KornShell programming languages. This ensures both a good scalability and portability of the application and control software and a three-tire architecture (middleware). The middleware ties the ASOIP subtechnologies (an Automated Control System, a System of Unified Application Repositories and Rapid Application Development, a bundle of Centralized Informational Databases, a Server Resource Management System and flexible administration tools) into a common integrated environment.

Keywords: automation, technology, control system, server, integrated environment, three-tire architecture, middleware, software, programming language, Python, Linux, object-oriented approach, rapid development, scalability, portability, administration, dataware, ASOIP, applications repository, database, application, resource, operational computational process, operational production.

Fig. 3 Ref. 6.

Operational technology for computing global forecasts using semi-Lagrangian atmospheric model SL-AV / Tolstykh M.A., Bogoslovskii N.N., Shlyayeva A.V., Mizyak V.G. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 145–154.

The paper presents the operational forecasting technology using the medium-range SL-AV model. SL-AV is a semi-Lagrangian finite-difference global atmospheric circulation model developed at the Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences and Hydrometeorological Research Center of Russia. The operational technology is implemented on the SGI Altix 4700 supercomputer. The following technology units including technologies of objective analyses are described: initial data processing unit, parallel model and post-processing software package, forecast output software package, session management scripts as well as the software package for the forecast error statistics calculation and WMO reports generation.

Keywords: global atmospheric model, operational technology, preparation of initial data for numerical forecasts

Fig. 2. Ref. 11.

Parallel version of the semi-lagrangian model SL-AV with the horizontal resolution of about 20 km /

Tolstykh M.A., Mizyak V.G. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 155–161.

The works on optimization for the parallel program complex of the global semi-Lagrangian atmospheric model SL-AV were carried out on computer system SGI Altix 4700 using MPI, SHMEM and OpenMP environment. In particular, the postprocessing procedure integrated into the model was parallelized. As a result, practically linear scalability of the model program complex was achieved using up to 432 processors. The wall-clock time for computing 24 h forecast with the new version of SL-AV model with the horizontal resolution of 20-25 km is reduced to 25 minutes using 432 processors.

Keywords: Global semi-Lagrangian atmospheric model, hybrid parallel implementation using MPI and OpenMP, scalability of parallel codes.

.Fig. 4. Ref. 5.

Causes of an anomalous hot summer in 2010 over European Russia / Sidorenkov N.S., Sumerova K.A. //

Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2011. – Vol. 346. – P. 162–174.

In the summer of 2010, heat wave of unprecedented duration and intensity was observed over European Russia. The heat wave has taken tens of thousands of lives, led to fires that destroyed hundreds of villages and about one million hectares of the forest, and costed the Russian economy hundred million of dollars.

An analysis of meteorological observations and the spectral analysis of the daily air temperature anomalies have shown that the heat wave was caused by the beats (slow periodic variations in the resulting amplitude) of the interacting temperature oscillations with close frequencies. The 35-year basic period of beats in the temperature and other hydrometeorological characteristics takes place due to the interference between their oscillations with periods of solar (365 days) and lunar (355 days) years. In 2010 over European Russia, the phases of the "solar" annual oscillations of hydrometeorological characteristics coincided with those of their basic "lunar" oscillations. As a result, the amplitudes of these oscillations added up and reached extreme values.

Keywords: Summer heat wave, synchronization of oscillations, spectral analysis, lunar cycles, beats of oscillations, diagnosis and forecast of the weather conditions.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Статья должна содержать сжатое и ясное изложение современного состояния вопроса, описание методики исследования, изложение и обсуждение полученных автором данных. Статья должна быть озаглавлена так, чтобы название соответствовало ее содержанию.

2. Объем статьи, как правило, не должен превышать 20 страниц машинописного текста, включая аннотацию, список литературы, таблицы, рисунки, подписи к рисункам. В "Трудах..." публикуются заказные статьи, объем которых определяется редколлегией.

3. Статьи представляются в двух экземплярах, напечатанных через полтора интервала с приложением электронной версии статьи и рисунков (дискета или диск с текстом, созданным текстовым редактором Microsoft Word, и рисунками в отдельных файлах в формате *.jpg, *.tif.).

4. **Комплект статьи** должен включать следующие части:

УДК, соответствующий теме статьи (курсивом)

Фамилии авторов

Название работы

e-mail (курсивом)

Аннотация

Ключевые слова (5–10 слов)

Основной текст

Список литературы

Английское резюме

Подрисуночные подписи

Рисунки на отдельных страницах и в отдельных файлах.

Таблицы на отдельных страницах

Сведения об авторах: фамилия, имя, отчество всех авторов (полностью); учёная степень, должность и место работы, *e-mail*, служебный телефон. Для группы авторов необходимо указать, с кем вести переговоры и переписку

Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.

К статье прикладывается акт экспертизы (1 экз.).

5. **Текст** должен быть напечатан шрифтом Times New Roman кеглем 12 через полуторный интервал на листе форматом А4 с полями: нижнее, верхнее и левое – 25 мм, правое – 15 мм. Выравнивание по ширине. Абзацный отступ 1 см. Не допускается формирование абзацного отступа с помощью пробелов. Все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом.

Подзаголовки набираются отдельной строкой жирным шрифтом. Могут быть пронумерованы или без нумерации (на усмотрение авторов).

6. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом (Па, Вт/м², Дж/(кг·К) и т. д.). Между цифрой и единицей измерения вставляется один пробел; например 5 м/с, 3 %.

Однозначные числа не при физических величинах в косвенных падежах рекомендуется писать в буквенной форме (например, одного, трем, двумя и др.), крупные числа – в сокращенной буквенно-цифровой форме (например 20 тыс., 5 млн, 3 млрд). Пределы величин приводятся следующим образом: 17–20 мм, от 17 до 20 мм. Порядковые числительные, обозначенные арабскими цифрами, пишутся с наращением (5-й, 3-е, 20-м, но 5-го, 3-му). Математические знаки =, <, > и др. применяются только в формулах, в тексте их нужно передавать словами равно, меньше, больше.

Кавычки («...»). Не допускается использовать дефис (-) вместо знака тире (–) и минус.

7. **Таблицы** размещаются на отдельных страницах после основного текста статьи. В тексте на полях отмечается место окончания абзаца после первого упоминания таблицы. (Ссылка на таблицу в тексте: в табл. 1). Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Таблицы следует создавать в режиме таблиц (вставить таблицу). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста. Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы :

Таблица 1

Название таблицы

8. **Рисунки** должны быть черно-белыми, представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В тексте на полях отмечается место окончания абзаца после первого упоминания рисунка. (Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1). Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах, желательно в графических форматах: *.jpg, *.tif, и придерживаться следующих требований: для рисунков — 600 dpi; для сканированных полутонных фотографий — 300 dpi. Рисунки должны быть четкими, с учетом последующего сканирования и уменьшения. Векторные рисунки (графики) должны предоставляться в формате программы, в которой они созданы. Подрисуночные подписи даются единым списком для всех рисунков после основного текста.

Оформление подрисуночной подписи:

Рис. 1. Название рисунка.

9. **Формулы** набираются только с использованием редактора формул Microsoft Equation Editor и имеют следующие размеры: обычный – 12, крупный индекс – 8, мелкий индекс – 6, крупный символ – 24, мелкий символ – 12. Латинские и греческие буквы – курсив; цифры – прямые. Возможно представление простых формул в тексте (не занимающих отдельную строку и не содержащих дробей) без редактора формул Microsoft Equation Editor, при этом размеры символов в формулах должны соответствовать вышеперечисленным требованиям.

Расшифровка символов формулы дается в той последовательности, в которой они употреблены в формуле. Простые формулы пишут в одну строку через косую линию. Знаки математических функций (sin, ctg, arcsin, ln, lg и др.) набирают прямым шрифтом.

10. **Список использованных источников** должен быть пронумерован и упорядочен по алфавиту (вначале на русском языке, затем на иностранных). В него не следует включать неопубликованные материалы; ссылки на электронные ресурсы и тезисы докладов. Сведения о литературных источниках включают (в следующем порядке): фамилию автора, инициалы, название источника, номер тома/части, город, издательство, год издания, количество страниц. Журнальные источники после фамилии автора и названия статьи включают: название, год, номер журнала, номера страниц начала и окончания статьи.

Ссылки в тексте приводятся в квадратных скобках [1, 2, 3–8].

11. Подписанная автором (авторами) на первой странице рукопись является оригиналом для печати. Вносить в корректуру статей значительные исправления и дополнения в оригинал авторам не разрешается.

Редакция сохраняет за собой право делать необходимые редакционные исправления.

Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.