

Исследовательская технология численного среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России

Достижения в научном понимании физических процессов, определяющих циркуляцию атмосферы, значительный прогресс в области компьютерной техники, средств связи, методов и средств наблюдений обусловили существенное улучшение качества численного прогноза погоды в последние 10-15 лет, что во многих странах дает заметный экономический и социальный эффект. В России реальные возможности проведения интенсивных научных исследований в области численных прогнозов погоды появились после установки в 1996 г. в ГВЦ Росгидромета супер-ЭВМ CRAY Y-MP8E с быстродействием более 2 тыс. Мегафлоп (1 Мегафлоп = 1 млн операций с плавающей точкой в сек). Данная статья посвящена проблеме улучшения качества численных методов среднесрочного прогноза погоды на этой вычислительной платформе.

Постановка задачи

Технология численного среднесрочного прогноза погоды (СПП) - это большой комплекс задач, выполняемых последовательно:

- препроцессинг данных объективного анализа (подготовка исходных данных на модельной сетке и в переменных модели);
- нелинейная инициализация по нормальным модам исходных метеорологических полей (проводится в целях улучшения взаимного согласования исходных данных и устранения ложных высокочастотных мод в спектральных разложениях полей основных переменных модели);
- расчеты по спектральной модели атмосферы;
- постпроцессинг результатов численного прогноза (представление выходной информации модели в стандартном виде - на регулярной сетке, на стандартных уровнях, в удобном для пользователя виде - и запись в общедоступные базы данных);
- статистическая коррекция результатов прогнозов (производится коррекция прогностических значений высот геопотенциальных поверхностей и давления на уровне моря с целью устранения систематических ошибок);
- расчет оценок качества прогнозов.

Отметим, что каждая из перечисленных выше задач весьма сложна, а соответствующее программное обеспечение объемно (так, программное обеспечение задачи интегрирования модели атмосферы занимает около 30 тыс. строк текста на языках Фортран 90 и Си). Ряд проблем, связанных с разработкой и настройкой различных элементов технологии рассмотрен в работах [2--5, 7, 11]. Ядром технологии СПП является спектральная модель атмосферы.

Численный СПП в Гидрометцентре России осуществлялся с 1985 г. на ЭВМ HITACHI 3033 (1985-1996 гг.), а затем на ЭВМ COMPAREX (с 1996 г.). Отметим, что малое быстродействие и ненадежность функционирования указанных выше ЭВМ не только не давало возможности существенно улучшить качество прогноза (например, путем увеличения разрешения модели), но и нередко приводило к запаздыванию необходимой синоптикам прогностической информации. Кроме того, весьма ограничены были возможности численного экспериментирования.

В 1996 г. в ГВЦ Росгидромета была установлена супер-ЭВМ CRAY Y-MP8E с быстродействием более 2 тыс. Мегафлоп. На ЭВМ CRAY оперативная технология СПП сперва (в 1998 г.) была запущена в конфигурации, прежде функционировавшей на ЭВМ COMPAREX: полусфера, треугольное усечение по 40 гармоникам; горизонтальное

разрешение 128 x 32 точки; вертикальное разрешение - 15 σ -уровней (до 20 гПа, 4 уровня в погранслое); шаг по времени в модели - 1600 с; учет основных процессов подсеточного масштаба - радиационно-облачного взаимодействия, турбулентного обмена тепла и влаги, влажной конвекции, процессов на подстилающей поверхности, крупномасштабной конденсации [1]. Даже простой перенос системы СПП потребовал значительных работ, связанных со спецификой новой вычислительной техники: систему надо было перевести из среды MVS в среду UNICOS (версия ОС UNIX, реализованная на ЭВМ CRAY Y-MP8E); учесть 64-битовую длину слова (на ЭВМ COMPAREX длина слова составляла 32 бита); оптимизировать программное обеспечение системы СПП с учетом возможностей векторизации и применения стандартного математического обеспечения ЭВМ CRAY Y-MP8E. Уже на этой стадии потребовалось выполнение большого количества численных экспериментов и ясно обозначилась необходимость создания исследовательской технологии СПП, позволяющей организовывать эти эксперименты оптимальным образом. Далее, новые вычислительные возможности позволили провести модернизацию системы, в первую очередь, улучшить пространственное и временное разрешение и расширить область интегрирования на весь глобус, что и было выполнено в 1998-2000 гг. Результаты этой работы описаны в статье А. В. Фролова и др. в настоящем сборнике [8]. Данная работа также потребовала активного экспериментирования.

Итак, перенос технологии СПП на ЭВМ CRAY Y-MP8E и ее дальнейшее развитие потребовали выполнения большого количества численных экспериментов. В свою очередь, само появление быстродействующей ЭВМ с большой оперативной памятью, допускающей одновременную работу многих пользовательских задач, но при этом обладающей ограниченным объемом дисковой памяти, новые методы графического представления информации, а также появление в Гидрометцентре России значительного количества мест для работы с удаленным доступом поставили задачу оптимальной организации работ по численному экспериментированию. Необходимо было создать исследовательскую технологию СПП, позволяющую в многопользовательском режиме легко и удобно работать как со всей технологией, так и с ее отдельными частями.

Основные принципы организации исследовательской технологии СПП

Задача оптимизации проведения численных экспериментов с объемным программным комплексом большим количеством пользователей не нова. Так, исследовательская технология численного экспериментирования существует в Метеорологическом бюро Великобритании (УКМО), где с UM-моделью работают сотрудники как УКМО, так и Гадлеевского центра климатических исследований [9, 10]. Развитый пользовательский интерфейс UM-модели позволяет исследователю, практически незнакомому с организацией технологии прогнозирования, легко выполнять численные эксперименты в интересующей его области. Знакомство автора со спецификой организации численных исследований в УКМО и практическое использование исследовательской версии UM-модели во время стажировки в УКМО явилось толчком к разработке исследовательской технологии СПП в Гидрометцентре России.

Обсудим, что необходимо пользователю технологии СПП для удобной работы.

Заметим, что при работе с таким большим программным комплексом, как технология численного прогноза, пользователю часто не нужно знать особенности работы отдельных его составляющих. Так, например, при работах по развитию параметризаций процессов подсеточного масштаба в модели пользователь обычно модифицирует только часть программ модели и использует остальные блоки технологии как «черный ящик». Поэтому следовало создать некое неизменное ядро технологии (базовую версию), к которому могли бы обращаться все пользователи. Естественно, что для обычных (непривилегированных) пользователей это ядро должно быть недоступно для модификации. Специфические

изменения (их обычно относительно немного), вносимые пользователем в базовую версию, логично хранить в пользовательских файлах, которые должны автоматически замещать базовые файлы (из ядра технологии) при проведении конкретных численных экспериментов. Таким образом можно достичь существенной экономии дискового пространства и обеспечить для пользователей единую экспериментальную базу.

Необходимым требованием к исследовательской технологии должна быть возможность гибкой настройки всего комплекса, включая как возможности настройки системы файлов входных и выходных данных, так и возможности варьирования отдельных программ комплекса и конфигурации системы.

Кроме того, необходимо было учесть, что все удачные модификации технологии в конечном итоге должны внедряться в оперативную практику, а само ядро исследовательской технологии должно периодически обновляться в ходе развития методов СПП.

Принимая во внимание вышесказанное, а также учитывая специфику работ в Гидрометцентре, было решено, что исследовательская технология СПП должна удовлетворять следующим основным требованиям.

1. Обеспечивать возможность одновременной работы различных пользователей.
2. Обеспечивать максимально возможную экономию дискового пространства.
3. Предоставлять широкие возможности гибкой настройки системы в целом и ее отдельных частей.
4. Обладать интерфейсом, позволяющим любому пользователю, имеющему минимальное представление о технологии СПП, легко настраивать систему, проводить численные эксперименты, осуществлять обработку результатов.
5. Обеспечивать максимально возможную аналогию базовой версии исследовательской технологии с оперативной технологией (чтобы облегчить последующее внедрение разработок в оперативную практику). Предоставлять возможность осуществления квазиоперативных просчетов.

Обновление базовой версии исследовательской технологии следует проводить периодически (на первом этапе, 1 раз в полгода). При этом необходимо в течение последующих полгода сохранять две версии исследовательской технологии с целью предоставления пользователям возможности завершить серию своих экспериментов на одной и той же версии модели.

«Сведение» оперативной и исследовательской технологии в плановом порядке нужно проводить раз в полгода. При обнаружении существенных погрешностей в какой-либо версии технологии (или исследовательской или оперативной) коррекция должна выполняться немедленно с оповещением всех пользователей системы.

Реализация исследовательской технологии СПП

Исследовательская технология СПП реализована на ЭВМ CRAY Y-MP8E на основе использования средств ОС UNICOS.

Основными элементами ее являются:

1. Базовая версия исследовательской технологии

Размещена в общедоступной директории на магнитном диске. Включает в себя тексты на языках Фортран 90 и Си; объектные и исполняемые модули для стандартных конфигураций модели (в данный момент T85L31, T40L15, T40L31, где $T_{число}$ означает *число* используемых сферических мод при треугольном усечении, $L_{число}$ означает *число* уровней по вертикали); общие файлы данных, не меняющиеся в ходе счета; управляющие программы на языке командного процессора ОС UNIX.

2. Пользовательские файлы

Для работы с исследовательской технологией каждым пользователем в своей домашней директории создается фиксированная система директорий со стандартными

именами (рис. 2). В эти директории записываются все тексты и файлы (включая управляющие программы), необходимые для решения специфических задач конкретного пользователя и отличающиеся от использованных в базовой версии исследовательской технологии, а также настроечный файл (см. ниже). Такая унифицированная система оказывается весьма удобной при работе большого коллектива исследователей. Заметим, что структура директорий, содержащих программное обеспечение для оперативной технологии, файлы исследовательской технологии и пользовательские файлы аналогична. При проведении пользователем численного эксперимента сборка программ происходит следующим образом: все модули первоначально ищутся в пользовательской директории, затем - в директориях исследовательской технологии, затем - в директориях оперативной технологии. При наличии в пользовательской директории управляющих программ с именами, аналогичными базовой версии, используются пользовательские управляющие программы.

3. Настроечный файл пользователя

Настроечный файл пользователя – это файл, изменяемый любым текстовым редактором. С его помощью пользователь может произвести настройку системы. Возможности для настройки, предоставляемые исследовательской технологией СПП, чрезвычайно велики. Перечислим здесь лишь некоторые, наиболее важные с точки зрения автора:

- выбор данных объективного анализа и климатических данных на подстилающей поверхности;
- выбор стартового набора для модели;
- выбор входных и выходных баз данных;
- выбор используемых параметризаций в модели;
- возможность замены любой программы базовой исследовательской версии на пользовательскую программу;
- выбор ряда констант для параметризаций процессов подсеточного масштаба;
- управление печатью из модели и из блока расчета оценок прогноза;
- возможность отключения любого элемента технологии (препроцессинга, модели, постпроцессинга, расчета оценок);
- возможность функционирования системы в двух модах: выполнение всех задач технологии последовательно и параллельное выполнение задач модели и постпроцессинга (как в оперативной версии);
- возможность определения конфигурации системы (пространственного разрешения, шага по времени, области интегрирования);
- возможность конкретизации необходимой выходной продукции технологии;
- возможность сохранения архивных файлов модели (в оперативном варианте они уничтожаются сразу же после обработки их постпроцессингом).

4. Оперативная технология

В целях экономии дискового пространства ряд неизменяемых файлов данных всегда берется из директорий с оперативной технологией. Отсюда же берутся объектные модули для сборки программы при отсутствии их в пользовательской директории и в директориях с исследовательской технологией.

5. Входные и выходные базы данных

В Гидрометцентре России вся оперативная технология основывается на использовании баз данных определенной структуры и организации, математическое обеспечение для которых создается в отделе средств информационного обеспечения (ОСИО) Гидрометцентра России. Это, например, общедоступные базы данных SHOT, ANAL, SELF, MRFS и т.д. Создание и поддержание баз такого рода осуществляется сотрудниками ОСИО. Однако оказалось, что для исследовательской технологии в ряде случаев нужно быстро создать небольшие пользовательские базы, состав которых не постоянен, и которые, возможно,

будут уничтожены или изменены через короткий промежуток времени конкретным пользователем. Для этого были использованы средства создания и поддержания исследовательских баз, опирающихся на систему управления базами данных «Record Manager» (автор - П. И. Свиренко) [6]. Исследовательская технология может использовать базы указанных выше двух типов.

6. Временные файлы

Часть файлов, не являющихся конечным продуктом технологии, заводится только на период выполнения задачи в директории для временных наборов и уничтожается после завершения задачи.

Для работы с исследовательской технологией пользователь должен:

- завести директории с универсальными именами для размещения изменяемых им текстов, вновь создаваемых объектных и исполняемых модулей, специфических для пользователя наборов данных;
- разместить в этих директориях свои тексты и файлы;
- отредактировать настроечный файл в своей директории с помощью любого текстового редактора;
- запустить задачу.

Результат будет записан в пользовательскую директорию с именем тождественным имени эксперимента и в определенные в настроечном файле выходные базы данных.

Подробное руководство для пользователей исследовательской технологии СПП имеется в лаборатории гидродинамического среднесрочного прогнозирования отдела среднесрочных прогнозов погоды Гидрометцентра России.

Некоторые результаты использования исследовательской технологии СПП

Исследовательская технология СПП первоначально была использована при проведении работ по оптимизации программного комплекса с учетом особенностей ЭВМ CRAY Y-MP8E. Оптимизация проводилась по следующим направлениям:

- программы векторизованы с использованием директив компилятора;
- осуществлен переход от использования ряда пользовательских программ и функций к использованию встроенных функций (это привело к дополнительной векторизации программ);
- старые программы для выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ) и обращения матрицы заменены на программы научной библиотеки CRAY;
- часть программ «вставлена» в код при компиляции с помощью директивы компилятора `INLINE`;
- оптимизированы процессы ввода/вывода; рабочие наборы размещены в оперативной памяти, а не на дисках, что существенно сокращает время доступа к ним.

Результаты оптимизации отдельных блоков технологии в версии T40L15 приведены в таблице. Видно, что оптимизация привела почти к десятикратному уменьшению времени счета по модели, что, в конечном итоге, позволило увеличить разрешение технологии СПП. (Переход к системе с высоким разрешением T85L31 потребовал почти 30-кратного увеличения времени счета. Для информации, в таблице представлены временные затраты для просчета прогнозов по глобальной версии T85L31. Напомним, что в настоящее время эта версия является оперативной).

Следующим этапом в работах с исследовательской технологией явились эксперименты по модификации параметризаций модели (конвекции, вертикальной диффузии, процессов осадкообразования) и развитию схемы инициализации. Результаты этих экспериментов,

подробно описанные в настоящем сборнике в статье А. В. Фролова с соавторами [8], позволили создать оперативную технологию кратко- и среднесрочных прогнозов на основе спектральной модели атмосферы T85L31.

Заключение

В Гидрометцентре России на основе использования средств операционной системы UNIX разработана и реализована на супер-ЭВМ CRAY Y-MP8E исследовательская технология СПП, позволяющая легко и удобно проводить численные эксперименты и, таким образом, являющаяся важным инструментом для развития методов численного прогноза погоды. В результате работ с исследовательской технологией СПП создана система кратко- и среднесрочного прогноза погоды, основанная на использовании глобальной спектральной модели атмосферы высокого пространственного разрешения и позволившая существенно улучшить качество прогнозов на сроки до 10 сут [8].

Автор выражает благодарность В. И. Цветкову, М. Д. Цырульникову, Г. В. Мостовому, Ю. В. Степанову за ценные советы при создании исследовательской технологии СПП, а также за ее апробацию.

Работа поддержана грантами РФФИ 00-05-64803, 01-05-65493, 01-05-65400.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахова Е. Д. Спектральная модель прогноза до 7 суток основных метеорологических полей по северному полушарию на супер-ЭВМ CRAY Y-MP8E. // Тез. докл. на оперативно-производственном совещ. «Использование прогностической продукции численных моделей Гидрометцентра России и других НИУ в оперативной работе УГМС: новые технологии, внедренные в оперативную практику на современных ЭВМ», 16—20 марта 1998.-Москва, 1998. – С. 11—12.
2. 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.
3. Курбаткин Г.П., Зулунов С. М., Фролов А. В., Покудов А. В. Нелинейное согласование полей ветра и давления при численном прогнозе погоды по полным уравнениям // Метеорология и гидрология.- 1988.- № 12.- С. 5-13.
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., Киктев Д. Б., Пономарева Т. Я., Рузанова И. В. Оперативный выпуск гидродинамических прогнозов погоды на средние сроки по спектральной глобальной модели Гидрометцентра России //Труды Гидрометцентра России. -2000. –Вып. 334. -С. 52-68.
6. Свиренко П. И. Система управления данными. //Труды Гидрометцентра России. -2000. – Вып. 334. -С. 158-162.
7. Фролов А. В., Важник А. И., Цветков В.И., Астахова Е. Д. Глобальная спектральная модель атмосферы с высоким разрешением по вертикали.//Метеорология и гидрология.-2000.- № 2.- С.10-21.
8. Фролов А. В., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., 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 и др.//См. наст. сб.
9. Jones T. C. The top level control system // Unified Model Documentation Paper C0, 1992. Available from the UKMO.

10. Rawlings F. Change control management of the Unified Model System // Unified Model Documentation Paper No. 2, 1995. Available from the UKMO.
11. Tsvetkov V. I., Vazhnik A. I., and Frolov A.V. Properties of inertial-gravity and Rossby waves in a global spectral eigenvalue problem // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, WMO/TD No. 942. – 1999.

Результаты оптимизации технологии СПП

Блок технологии	Вариант	Время CPU
Модель T40L15 без инициализации, полусфера, интегрирование на 1 сутки	исходный	624 с
	векторизация программ	416 с
	+ использование встроенных функций	145 с
	+ БПФ по CRAY	56 с
Оптимизированная модель T40L15, полу-сфера, интегрирование на 7 суток	без инициализации	336с
	с инициализацией	357 с
Оптимизированная модель T40L15, глобус, интегрирование на 7 суток	без инициализации	675 с
	с инициализацией	836 с
Постпроцессинг T40L15, полусфера, обработка 22 архивных файлов	Исходный вариант	268 с
	оптимизированный вариант	191 с
Оптимизированная модель T85L31, глобус, интегрирование на 1 сутки, вызов радиационного блока 2 раза в сутки	без инициализации	1675 с
	с инициализацией	1820 с
Оперативный вариант (оптимизированная модель T85L31, глобус, интегрирование на 10 суток, вызов радиационного блока 2 раза в сутки)	с инициализацией	17730 с