

Г.С. Ривин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОНОВЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРОБЛЕМА ПЕРЕНОСА АЭРОЗОЛЕЙ В СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ¹

Описаны состав и современное состояние развиваемой в Институте вычислительных технологий СО РАН системы MAP – моделирования атмосферных процессов и переноса примесей в Сибирском регионе для проведения экспертных оценок с помощью данных наблюдений за метеоусловиями и выбросами в атмосферу.

1. Введение

Одной из целей проекта «Аэрозоли Сибири» является изучение закономерностей процессов трансформации и переноса аэрозолей в Сибирском регионе [1].

Мощным средством исследования таких процессов является вычислительный эксперимент [2]. Под вычислительным экспериментом при этом понимается последовательность действий, включающая анализ изучаемого процесса, построение математической модели, разработку необходимых численных алгоритмов и программ, проведение расчетов и анализ полученных результатов. Одной из наиболее привлекательных сторон вычислительного эксперимента как инструмента для исследования процессов в атмосфере является не только возможность сценарного моделирования за счет многообразия задаваемых состояний окружающей среды, но и полная безопасность как для человека, так и для самой среды. В то же время такой вычислительный эксперимент требует разработки сложного математического обеспечения для решения указанных выше задач, в частности для описания фоновых процессов в атмосфере и выбора или создания баз метеоданных, концентрации и состава атмосферного аэрозоля.

В статье дается краткий обзор современных баз метеоданных (существующих и подготавливаемых), необходимых для вычислительного эксперимента, описываются состав и современное состояние развиваемой в ИВТ СО РАН системы MAP моделирования атмосферных процессов и переноса примесей в регионе для проведения с помощью вычислительного эксперимента экспертных оценок на базе данных наблюдений за метеоусловиями и выбросами в атмосферу.

2. Метеорологическая информация

Для проведения вычислительного эксперимента очень важны создание архивов и баз данных наблюдений и доступ к ним.

Метеорологическую информацию можно условно разбить на оперативную и исследовательскую. Данные синоптического (через каждые 3 ч), аэрологического (через каждые 6, а в основном 12 ч), непрерывного спутникового и другого зондирования атмосферы примерно через 2 ч после наблюдения находятся в ведущих метеоцентрах мира. На основе этих данных создаются обширные базы метеорологических данных уровней II (данные наблюдений) и III (в узлах, обычно широтно-долготной, сетки). Для исследовательских и экспертных целей наиболее полезными являются данные Первого глобального эксперимента Программы исследования глобальных атмосферных процессов (ПГЭП) [3, 4] и подготавливаемые в настоящее время более обширные и уточненные базы данных повторного анализа в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды и в совместном аналогичном проекте Национальных центров для прогнозов окружающей среды США и Национального центра атмосферных исследований США, проводимых с помощью систем усвоения метеоданных [5]. Обзор используемых для этих целей современных систем и методов усвоения метеоданных приведен в [6].

¹Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 95-05-15581).

3. Система MAP

Развиваемая в ИВТ СО РАН система MAP моделирования атмосферных процессов и описания переноса примесей в регионе для проведения экспертных оценок [7, 8] состоит из следующих основных компонентов:

- схема численного анализа данных метеонаблюдений для восстановления начальных полей в узлах сетки;
- схема инициализации, предназначенная для уменьшения или стационарирования амплитуд высокочастотных гравитационных волн;
- модель атмосферы, описываемая с помощью уравнений гидротермодинамики;
- модель переноса примесей;
- блок визуализации результатов вычислительного эксперимента.

Такой состав этой системы позволяет для Сибирского региона проводить на региональном уровне экспертную оценку антропогенного влияния на атмосферу, на распределение и распространение в атмосфере аэрозоля.

3.1. Характеристика компонентов системы MAP

3.1.1. Анализ

Схема численного анализа использует бокс-вариант метода трехмерной многоэлементной оптимальной интерполяции [9]. В качестве дополнительной априорной информации используются прогностические поля и ковариационные функции ошибок прогноза по данной модели атмосферы и наблюдений.

Если обозначить \mathbf{D} – вектор данных наблюдений, \mathbf{F} – вектор прогностических значений, E_f – средний квадрат ошибки прогноза, то проанализированные значения в узлах сетки A_k можно найти по формуле

$$\frac{A_k - \mathbf{F}_k}{E_k} = \sum_{i=1}^N w_i \frac{\mathbf{D}_i - \mathbf{F}_i}{E_f},$$

где индекс k – номер узла сетки; индекс i – номер наблюдения.

Следовательно, метод интерполяции является линейным и состоит в нахождении вектора $\mathbf{W} = \{w_i\}$ из условия минимума среднего в статистическом смысле квадрата ошибки анализа:

$$\min \overline{(A_k - I_k)^2},$$

где I_k – истинное значение метеоэлемента в k -м узле; $\overline{(\cdot)}$ – оператор указанного выше усреднения.

Для нахождения весовых коэффициентов необходимо решить систему нормальных уравнений

$$M\mathbf{W} = \mathbf{H}.$$

Вычисление элементов матрицы M и вектора \mathbf{H} требует задания корреляций ошибок наблюдений, корреляций ошибок прогноза, а также их среднеквадратических ошибок.

3.1.2. Модель атмосферы

Моделирование будущего состояния атмосферы основывается на гидротермодинамической модели атмосферы. Экономичная 5-уровневая модель атмосферы для Сибирского региона была разработана Г.И. Марчуком на основе метода расщепления и реализована под его руководством. Эта модель многие годы использовалась в региональной оперативной прогностической системе. Для применения ее в разрабатываемой системе была проведена модификация модели, позволившая не только расширить область интегрирования по вертикали, но и заметно улучшить качество прогнозов [10].

Адиабатический (взят для простоты описания) вариант модели атмосферы в (x, y, p) -системе координат в форме, удобной для применения метода расщепления, описывается следующей системой уравнений гидротермодинамики:

$$\begin{aligned} u_t + \frac{1}{2} [uu_x + (uu)_x + vu_y + (vu)_y + \tau u_p + (\tau u)_p] - fv &= -gz_x; \\ v_t + \frac{1}{2} [uv_x + (uv)_x + vv_y + (vv)_y + \tau v_p + (\tau v)_p] + fu &= -gz_y; \\ T &= -(gp/R) z_p; \quad u_x + v_y + \tau_p = 0; \\ T_t + \frac{1}{2} [uT_x + (uT)_x + vT_y + (vT)_y] + \tau (\gamma_a - \gamma) RT^*/(gp) &= 0. \end{aligned}$$

Решение этой системы уравнений сводится к последовательному решению уравнений адвекции на интервалах $(t_n, t_{n+1/2})$

$$\frac{1}{2} \Phi_t + \frac{1}{2} [u\Phi_x + (u\Phi)_x + v\Phi_y + (v\Phi)_y + A\Phi_p + (A\Phi)_p] = 0$$

и решению системы уравнений адаптации на интервалах $(t_{n+1/2}, t_{n+1})$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} u_t - fv &= -gz_x; \quad \frac{1}{2} v_t + fu &= -gz_y; \quad T &= -(gp/R) z_p; \\ u_x + v_y + \tau_p &= 0; \quad \frac{1}{2} T_t + \tau (\gamma_a - \gamma) RT^*/(gp) &= 0, \end{aligned}$$

где p – давление; (u, v, τ) – компоненты вектора U скорости относительно осей x, y, p соответственно; z – отклонение высоты изобарической поверхности от стандартного значения; T – отклонение температуры от стандартного значения; T^* – стандартное значение температуры; f – параметр Кориолиса; γ – стандартное значение вертикального градиента температуры; γ_a – сухоадиабатический вертикальный градиент температуры; R – универсальная газовая постоянная; g – ускорение свободного падения; $\Phi = (u, v, T)^T$, 3×3 – матрица $A = \text{diag}(\tau, \tau, 0)$.

В свою очередь, решение уравнения адвекции проводится с помощью метода расщепления. Решение системы уравнений адаптации основывается на методе биортогонализации с применением вертикальных мод.

3.1.3. Перенос примесей

Описание переноса примесей в атмосфере производится с помощью следующего уравнения:

$$\eta_t + \text{div}(U\eta) + L\eta = D\eta + F.$$

В этом уравнении η – концентрация аэрозольной субстанции, мигрирующей с воздушным потоком; U – вектор скорости воздушных частиц; L – оператор, описывающий локальные преобразования примесей; $D\eta$ – диффузионный член и F – описывает источник субстанции. Соответствующая разностная схема для этого уравнения должна сохранять решение неотрицательным, что приводит к необходимости использовать для нахождения решения уравнения переноса монотонную разностную схему.

3.1.4. Визуализация

К настоящему времени на основе опыта визуализации метеоинформации [11] разработана технология построения специализированных графических процессоров с заданными функциями для широкого класса задач визуализации, возникающих как при моделировании атмосферных процессов, так и в производственной практике [12]. В силу свойств автономности, мобильности, компактности и легкой управляемости подобный графический процессор может быть включен вместе с соответствующим пользовательским интерфейсом в автоматизированную систему программного обеспечения вычислительного эксперимента или производственного процесса.

3.2. Верификация компонентов системы MAP

1. Модифицированная модель атмосферы, используемая в системе MAP, имеет 15 уровней (1000 гПа – 10 гПа) и горизонтальную 26×22 – сетку типа *D*, по терминологии А. Аракавы, с шагом 300 км и центрированную относительно Новосибирска. Модификация модели улучшила в среднем для высот изобарических поверхностей коэффициент корреляции суточной тенденции на 20%, а относительную ошибку – на 12% и оценку градиентов высот *S1* – на 5% [10].

2. Для оценки качества и возможностей системы MAP проведено усвоение метеоданных [12, 13], которое базируется на применении цикла анализ – инициализация – прогноз и тем самым использует почти все компоненты системы MAP.

В использованную подсистему усвоения входят помимо основного меню для управления процессом вычислительного эксперимента различные варианты процедур анализа, инициализации и прогностической модели. Для проведения численных экспериментов были использованы оперативные данные аэрологических и синоптических наблюдений за 30.03.91.00 – 01.04.91.00, получаемые Росгидрометеоцентром.

Для нахождения пространственно-временного распределения метеополей с 30 марта по 3 апреля 1991 г. осуществлялось усвоение данных в основные синоптические сроки с интервалом 12 ч. В качестве первого приближения для анализа за срок 30.03.91 бралось поле 12-часового прогноза Национального метеорологического центра США, дальше усвоение шло циклически по схеме: прогноз – анализ – инициализация.

Как показано в [12], качественное временное изменение оценок метеополей указывает на эффективность разработанной системы MAP для адекватного описания крупномасштабных метеопроцессов.

3. Исследование [14] влияния различных модельных корреляционных функций при оценке ошибок первого приближения на результат анализа в схеме многоэлементного численного анализа показало эффективность применения в качестве корреляционной функции ряда по функциям Бесселя.

4. Для выбора эффективной монотонной схемы на ряде специальных тестов проведено сравнение монотонных схем второго порядка точности, используемых в метеорологии, газовой динамике и физике плазмы [12]. Численные эксперименты показали, что для решения уравнения переноса неотрицательных характеристик при моделировании атмосферных явлений имеет смысл использовать схему Ботта. Выбор второго порядка аппроксимации связан с тем, что компоненты вектора скорости находятся со вторым порядком.

5. Применяя технологию визуализации, разработанную для системы MAP, по предложению ЗапСибРВЦ Росгидромета подготовлена система САК95 визуализации авиационных прогностических карт, включающая графический процессор, оконный пользовательский интерфейс и управляющую программу. В настоящее время система визуализации САК95 передана в ЗапСибРВЦ для испытания.

4. Заключение

Проведенная верификация компонентов системы MAP, в том числе и основной ее подсистемы, позволяющей получить пространственно-временное распределение метеополей, показала эффективность разработанной системы MAP. В настоящее время идет работа по подготовке и проведению вычислительного эксперимента с переносом примесей, исследованию методов усвоения метеоинформации с применением фильтра Калмана, новым методам инициализации, уточнению модели атмосферы (в том числе увеличению пространственного разрешения), расширению возможностей блока визуализации.

Развиваемая система моделирования позволит выполнять разнообразные вычислительные эксперименты как по сценарному моделированию различных стрессовых воздействий на атмосферу (извержение вулканов, ядерная война и т.д.), так и по описанию распространения аэрозоля и адекватному восстановлению метеополей.

1. Куценогий К. П. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1015–1021.

2. Шокин Ю. И., Ривин Г. С., Хакимзянов Г. С., Чубаров Л. Б. // Вычислительные технологии. Т. 1. № 3. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1992. С. 12–33.

3. Ривин Г.С., Слуднов А.В. Модули доступа к данным DST-6 и ПГЭП на ЭВМ ЕС. Москва, 1982. 23 с. (Препринт / Отдел вычислительной математики АН СССР, N 29).
4. Ривин Г.С., Слуднов А.В. // Первый глобальный эксперимент ПИГАП. Т. 8. Общая циркуляция атмосферы и численные эксперименты по данным ПГЭП. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 23–25.
5. Research Activities in Atmospheric and Oceaning Modeling /Ed. A. Staniforth. WMO, Rep. 21, 1995, WMO/TD–No. 665. 412 p.
6. Климова Е.Г., Ривин Г.С. // Вычислительные технологии. Т. 2. N 4. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1993. С. 235–240.
7. Воронина П.В., Климова Е.Г., Куликов А.И., Медведев С.Б., Ривин Г.С., Фомин В.М. // Вычислительные технологии. Т. 3. N 8. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1994. С. 27–44.
8. Ривин Г.С., Климова Е.Г., Медведев С.Б., Фомин В.М., Воронина П.В., Куликов А.И. // Математические проблемы экологии. Новосибирск: ИМ СО РАН, 1994. С. 90–95.
9. Климова Е.Г., Ривин Г.С. // Метеорология и гидрология. 1992. N 3. С. 16–23.
10. Ривин Г.С., Медведев С.Б. // Метеорология и гидрология. 1995. N 5. С. 13–22.
11. Ривин Г.С., Куликов А.И. // Вычислительные технологии. Т. 2. N 4. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1993. С. 155–161.
12. Ривин Г.С., Климова Е.Г., Воронина П.В., Куликов А.И. // Вычислительные технологии. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1995. В печати.
13. Климова Е.Г., Ривин Г.С. // International conference AMCA-95: Advanced Mathematics, Computations and Applications. Novosibirsk, June 20–24, 1995 (Abstracts). NCC SB RAS Publisher. Novosibirsk, 1995. P. 172–173.
14. Климова Е.Г., Воронина П.В. // Метеорология и гидрология. 1994. N 1. С. 18–24.

Институт вычислительных технологий СО РАН,
Новосибирск

Поступила в редакцию
26 января 1996 г.

G.S. Rivin. Numerical Modeling of Background Atmospheric Processes and the Problem of the Aerosol Transfer in Siberian Region.

The modern state of the MAP system for modeling the atmospheric processes and the aerosol transfer in the Siberian region designed at the Institute of Computational Technologies SB RAS for carrying out the expert estimates by means of observations of the meteorological data and the contaminants ejections into the atmosphere is described in the paper.