

В.В. Пененко, Е.А. Цветова

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ REANALYSIS

ИВМ и МГ СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 3.03.99 г.

Принята к печати 15.03.99 г.

Описана структура алгоритмов для перевода данных со стандартной системы представления информации Reanalysis NCEP/NCAR на сеточные области переменной структуры в базовых моделях гидротермодинамики и переноса примесей в атмосфере. Для восстановления детальной пространственно-временной структуры полей разработан алгоритм усвоения данных, обеспечивающий «гидротермодинамическую» интерполяцию с помощью базовых моделей. Предусмотрены варианты восстановления данных для прямого и обратного моделирования.

Введение

В задачах природоохранного проектирования и оценки экологической перспективы индустриальных регионов всегда возникает вопрос о подходящем выборе способов описания фоновых гидрометеорологических ситуаций. По существу, ставится проблема долгосрочного прогнозирования экологической обстановки в условиях неопределенности входных данных и внешних воздействий.

Логично было бы использовать сценарный подход, который, при подходящем выборе совокупности сценариев, может с достаточной степенью достоверности обеспечить решение проблемы на уровне детерминированного описания.

Для реализации сценарного подхода имеется несколько путей. Один из них состоит в использовании для прогностического описания поведения атмосферы моделей гидротермодинамики. Естественно, в таком случае необходимо ответить на вопросы о предсказуемости этих моделей с учетом имеющихся неопределенностей. Это очень интересная научная проблема, но вопрос о ее решении пока остается открытым.

Если принять гипотезу об относительной устойчивости климата, то для формирования сценариев атмосферной циркуляции можно воспользоваться ретроспективной гидрометеорологической информацией. Широкие возможности для этого дает база данных Reanalysis NCEP/NCAR [1], которая содержит систематизированную информацию по наиболее важным компонентам функции состояния атмосферы за 40 лет. В зависимости от масштабов изучаемых явлений используется декомпозиция функций состояния на фон и возмущения. Тогда фоновые процессы генерируются по архивным данным, а детальная пространственно-временная структура полей восстанавливается с помощью моделей, учитывающих многообразие действующих естественных и антропогенных факторов и работающих в режиме усвоения.

База данных реанализа представляет собой хорошо структурированную и организованную на современном уровне информационную систему, ориентированную на обеспечение научных исследований и практические применения в области физики атмосферы и экологии. Все сведе-

ния о составе, структуре полей, системах координат и т.д. содержатся в описании проекта [1].

Нас интересует вопрос, как использовать эти данные в наших интересах. Другими словами, цель состоит в построении методики восстановления по ним пространственно-временной структуры полей функций состояния атмосферы с заданным разрешением на сеточных областях, принятых в наших базовых моделях гидротермодинамики и переноса загрязняющих примесей [2–4]. Операцию восстановления необходимо осуществлять без потери информативности исходных данных. Эта задача – интересный пример применения методики усвоения данных с помощью моделей и совместного использования моделей и данных наблюдений [2].

Таким образом, можно сформулировать концепцию построения модели атмосферы информационного типа, основанной на методах усвоения данных и интерполяции с помощью базовой модели исследуемых процессов. В ней данные реанализа вместе с другой доступной фактической информацией участвуют в качестве усваиваемого фона, а детальная структура полей рассчитывается с помощью базовой модели, выступающей в роли пространственно-временного интерполянта.

Такие модели удобны для изучения природных объектов, находящихся под воздействием атмосферы. Их использование целесообразно для генерирования фона в мезомасштабных моделях гидротермодинамики и при моделировании процессов переноса и трансформации загрязняющих примесей, когда непосредственный вклад обратной связи от этих процессов в динамику атмосферы незначителен. В то же время их опосредованное влияние учитывается косвенно через фоновые данные о реальной атмосфере. В тех случаях, когда эффекты обратной связи значительны, базовые модели должны работать в режиме прогноза без усвоения.

Системная организация моделей информационного типа

Опишем идею и общую схему алгоритмов для построения модели информационного типа. Следуя [2], сформулируем целевой функционал

$$\Phi_0^h(\Phi) = \alpha_1 [(S\Phi - \Phi_R)^T M_1 (S\Phi - \Phi_R)]_{D_t^R}^h + \alpha_2 [(\Phi - \Phi_a)^T M_2 (\Phi - \Phi_a)]_{D_t^R}^h + [I^h(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y})]_{D_t^R}^h; \quad (1)$$

$$\Phi \in Q(D_t), \quad \Phi^* \in Q^*(D_t); \quad \mathbf{Y} \in R(D_t).$$

Здесь приняты следующие обозначения и определения: Φ – функция состояния атмосферы; Φ^* – произвольная, достаточно гладкая функция, играющая роль обобщенного множителя Лагранжа, которая вводится для учета базовой модели как совокупности ограничений на функцию состояния; \mathbf{Y} – вектор параметров модели; $Q(D_t)$ – пространство функций состояния, удовлетворяющих краевым условиям модели; $Q^*(D_t)$ – сопряженное ему пространство; $R(D_t)$ – множество допустимых значений параметров модели; $D_t = D \times [0, t]$, D – область изменения пространственных координат, $[0, t]$ – интервал изменения времени; Φ_R – вектор значений функций состояния атмосферы из базы данных реанализа, Φ_a – априорная оценка функций состояния в D_t ; M_1, M_2 – положительно определенные весовые матрицы, верхний индекс T обозначает операцию транспонирования, а h отмечает дискретный аналог соответствующих объектов; D_t^R – дискретная сеточная область, на которой представлены данные реанализа; D_t^h – сеточная область для конструирования дискретных аналогов базовой модели и для формирования дискретных аппроксимаций искомой функции состояния атмосферы; S – оператор перевода информации с сетки D_t^h на сетку D_t^R . Заметим, что для того чтобы не потерять точность, данные реанализа берутся на их собственных сетках.

Первое слагаемое в (1) выражает меру отклонений искомых значений функции от данных реанализа, а второе – меру отклонений от априорной оценки. Параметры α_1 и α_2 задают относительный вес этих функционалов. Третье слагаемое представляет собой дискретный аналог интегрального функционала в вариационной формулировке базовой модели. Если имеется дополнительная фактическая информация на интервале времени $[0, t]$, то она включается дополнительным слагаемым по типу первых двух, представленных выше.

В качестве базовой берется модель, описанная в [3]. В ней, в частности, используется гибридная система координат (p -сигма): выше уровня 500 мбар – изобарические координаты, а ниже – следящие за рельефом поверхности Земли. Она обеспечивает компромисс между предписанным способом представления данных реанализа и потребностями описания процессов в моделях гидротермодинамики и переноса примесей с учетом рельефа.

Функционал (1) порождает структуру алгоритмов для информационной модели динамики атмосферы. Он аппроксимируется с использованием техники вариационного исчисления в комбинации с методами расщепления и декомпозиции. Вычислительные схемы и алгоритмы реализации получаются из условий стационарности функционала $J(\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y})$ к вариациям сеточных компонент функций Φ и Φ^* в узлах сетки D_t^h . Опорный интервал времени для реализации одного цикла усвоения данных реанализа составляет одни сутки.

При этом участвуют два набора данных ООЗ анализа и еще один, промежуточный между ними, набор данных 12Z анализа (0.00 и 12.00 по среднеевропейскому времени) [1]. Количество суточных циклов усвоения задается как

входной параметр модели восстановления. Привязка рабочего интервала $[0, t]$ в пределах временного интервала реанализа и выделение самой области D внутри области D_t^R осуществляются также параметрически. В соответствии с задачами исследований предусматриваются режимы восстановления полей в режиме прямого и обратного моделирования.

Квазистационарные «гидродинамические» интерполянты

Для формирования вектора априорных оценок функции состояния атмосферы воспользуемся процедурами восстановления полей по вертикальной координате в предположении о квазистационарности. Эти процедуры базируются на аналитических решениях и дискретных аппроксимациях уравнений квазистационарной модели динамики атмосферы:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial p} = f(v - v_g) + K \frac{\partial^2 u}{\partial p^2}, \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial p} = -f(u - u_g) + K \frac{\partial^2 v}{\partial p^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial p} = 0, \quad (4)$$

$$\partial H / (\partial \ln p) = -R\theta. \quad (5)$$

Здесь u, v, w – компоненты вектора скорости в направлении координат x, y, p соответственно; u_g, v_g – составляющие геострофического ветра; H – геопотенциал; θ – температура; p – давление; f – параметр Кориолиса; K – коэффициент турбулентности по вертикали; R – универсальная газовая постоянная. Модель замыкается соответствующими краевыми условиями. Операторы модели входят в состав уравнений базовой модели атмосферы.

Уравнения (2)–(5) определяют структуру интерполянтов «гидродинамического» типа. Они позволяют эффективно восстанавливать значения полей метеозлементов (компоненты вектора скорости, температуры, геопотенциала) на вертикальной p -сигма сетке в D_t^h по данным реанализа на сетке D_t^R . Здесь могут быть применены различные модификации численных схем. Пример интерполяционных формул для геопотенциала и температуры, согласованных с помощью уравнения гидростатики (5), имеется в [5]. Процедура интерполяции горизонтальных составляющих вектора скорости с использованием данных о геопотенциале базируется на аналитических решениях уравнений (2), (3). Метод построения таких решений и их конкретное представление даны в [6]. После восстановления u и v рассчитывается вертикальная скорость w с помощью уравнения неразрывности (4) в p - σ -координатах совместно, в режиме усвоения, с данными реанализа о поле вертикальных скоростей. Интерполяция по горизонтальным координатам выполняется с использованием процедур, имеющих порядок точности аппроксимации не ниже второго.

По восстановленным таким образом полям на сетке D_t^h рассчитываются фоновые значения для мезорегиональных моделей динамики атмосферы. По ним также формируется вектор априорных оценок функции состояния во

втором слагаемом в (1). Процедуры вертикальной интерполяции в совокупности участвуют при формировании оператора S для перехода с D_t^h на D_t^R в первом слагаемом (1).

Одним из природных объектов, для исследования которого используется информационная модель атмосферы этого типа, является озеро Байкал [3]. Сравнительные оценки масштабов формирования процессов в озере и атмосфере региона показывают, что характерные масштабы времени для озера превосходят характерные масштабы периода предсказуемости численных моделей циркуляции атмосферы. Этот факт говорит о предпочтительности использования, где это возможно, информационных моделей.

На базе модели переноса примесей в атмосфере, скомбинированной с информационной моделью атмосферы, проведены сценарные расчеты областей влияния и функций опасности загрязнения региона и озера Байкал за счет атмосферных переносов от источников примесей, расположенных в Северном полушарии. Результаты расчетов подтверждают выводы о величине характерных масштабов по пространству и времени в системе «атмосфера – озеро» и о влиянии Саяно-Алтайского циклогенеза на характер переносов в регионах юга Сибири [4].

Заключение

Информационная модель снимает вопрос о предсказуемости модели, описывающей поведение атмосферы. Она обладает свойствами обычной гидродинамической модели и позволяет восстанавливать структуру полей функции состояния атмосферы с заданным разрешением для любого региона Земли и в любом интервале времени в пределах временного интервала реанализа. Реализована первая версия модели такого типа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 97-05-96511, 98-05-65318, и Программы интеграционных исследований СО РАН (ИГ СО РАН-97 № 30).

1. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
2. Penenko V.V. // Bull. NCC. Num. Model. in Atmosph. 1996. N 4. P. 32–51.
3. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. N 6. С. 586–593.
4. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 6 (в печати).
5. Либерман Ю.М. // Метеорология и гидрология. 1986. N 10. С. 106–108.
6. Kao S.K. // J. Appl. Meteor. 1981. V. 20. P. 386–390.

V.V. Penenko, E.A. Tsvetova. Data Preparation for Ecological Investigations with Use of Reanalysis.

A structure of algorithms for transformation of Reanalysis NCEP/NCAR data from their standard system to the grid domains of variable structure, that are introduced in the basic models of hydrodynamics and transport of pollutants in the atmosphere, is presented. For reconstruction of the detailed time-space behavior of the fields the algorithm of data assimilation is developed. It provides a «hydrodynamical» interpolation of data with the help of basic models. The versions are foreseen for data reconstruction for direct and inverse modeling.