

Система усвоения атмосферных данных с переменным горизонтальным разрешением сетки анализа*

М.Д. ЦЫРУЛЬНИКОВ

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ

М.А. ТОЛСТЫХ

Институт вычислительной математики РАН

Р.Б. ЗАРИПОВ

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ

А.Н. БАГРОВ

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ

27 декабря 2003 г.

Описывается система усвоения данных (СУД) о состоянии атмосферы, основой которой служат разработанная в ИВМ РАН полулагранжева модель атмосферы с переменным горизонтальным разрешением и схема объективного анализа на базе оптимальной интерполяции, разработанная в Гидрометцентре РФ. Приводится описание методологии и технологических аспектов работы представляемой СУД, организации на ее основе расчетов прогнозов погоды (на срок до 5 суток). Необходимый для работы СУД объем вычислений разделен между ЭВМ CRAY-YMP и кластером из 4-х серверов, содержащих по 4 процессора Intel Itanium II. Помимо усвоения текущих данных наблюдений, разработанная СУД используется в качестве основы для исследований. Приводится описание проведенного исследования чувствительности качества анализов к ошибкам усваиваемых наблюдений.

1. Введение

Одной из важнейших задач метеорологии является численное восстановление четырехмерного состояния атмосферы по данным наблюдений. Повсеместно используемым средством решения этой задачи являются схемы циклического усвоения «анализ-прогноз» (см., например, работы [1–6]). В таких схемах на шаге анализа учитываются данные текущих наблюдений (непосредственно, с использованием метода оптимальной интерполяции (ОИ) или вариационных методов), а также данные предыдущих наблюдений (опосредованно, через так называемое первое приближение - поля численного прогноза, стартовавшего с анализа предыдущего цикла усвоения).

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 01-05-64582 и 03-05-06054мас) и Франко-российского Центра по информатике и прикладной математике им. А.М. Ляпунова (проект 02-05)

В данной статье описывается система усвоения данных (СУД), основой которой служат полулагранжева прогностическая модель атмосферы [7] и схема анализа наблюдений, использующая ОИ. Выбор метода оптимальной интерполяции обусловлен наличием у авторов оперативной схемы анализа Гидрометцентра РФ, использующей ОИ [8, 9] и тем обстоятельством, что переход от оптимальной интерполяции к более методически совершенным методам вариационного усвоения не сопровождается радикальным улучшением качества усвоения [2, 3]. В дальнейшем планируется перейти к использованию более современных подходов при усвоении наблюдений.

Проводимая работа представляет собой начальный этап проекта, конечной целью которого является создание СУД, не зависящей от продукции зарубежных метеорологических центров и ориентированной на территорию России и сопредельных государств. Для решения поставленной задачи планируется использование глобальных схем анализа и прогноза со сгущением узлов сетки в представляющем интерес регионе. Такое сгущение осуществляется путем поворота полюсов сферической системы координат и введением переменного разрешения по псевдошироте.

С конца 2002 года в режиме тестирования работает предварительный вариант СУД, использующий регулярную широтно-долготную сетку с шагом 1.40625° по долготе и 1.125° по широте. К моменту подготовки данной статьи (осень 2003 г.) в Сидрометцентре РФ ставится на испытания СУД с шагом сетки 0.9° по долготе и 0.72° по широте (400x257 узлов) и ведутся работы над системой «анализ-прогноз» со сгущением узлов сетки (также 400x257 узлов) в северном полушарии.

2. Анализ наблюдений

Из теории оптимальной линейной фильтрации (см., например, [10]) следует, что возможно оптимальное усвоение поступивших к сроку анализа наблюдений не только одновременно, но и блоками (при отсутствии корреляции ошибок наблюдений в разных блоках). При этом анализ на n шаге является первым приближением на $n+1$ шаге. В том случае, когда наблюдательная сеть имеет высокое пространственное разрешение и наблюдения однотипны, то можно показать (см. [11]), что обычно предполагаемая локальная однородность и изотропия ошибок первого приближения сохраняется после анализа таких наблюдений. Это означает, что для оптимального усвоения наблюдений на следующих шагах анализа не нужно явно вычислять ковариационную матрицу ошибок анализа, а достаточно лишь переопределить параметры ковариационной модели поля ошибок первого приближения.

В рассматриваемой СУД в качестве густой и однородной наблюдательной сети рассматривается сеть синоптических станций. После усвоения данных о приземном давлении (содержащих информацию и о высотных барических полях) модифицируется априорная ковариационная модель ошибок первого приближения геопотенциала.

Таким образом, анализ метеорологических полей ошибок состоит из нескольких последовательно выполняемых частных анализов, причем изменения полей первого приближения накапливаются от одного частного анализа к следующему. Приземные метеорологические поля и характеристики поверхности анализируются на модельной сетке с произвольным разрешением. Для сетки с переменным разрешением предусмотрено изменение параметров модели ОИ, в частности, уменьшение радиуса корреляции при уменьшении шага сетки.

Наблюдения в свободной атмосфере усваиваются на более редкой сетке с постоянным

горизонтальным разрешением ($2.5 \times 2.5^\circ$ или $1.8 \times 1.44^\circ$) на 16 стандартных изобарических поверхностях (от 1000 до 10 гПа). При этом используется инкрементный подход - т.е. на сетке анализа с помощью ОИ по наблюдениям вычисляются поправки (инкременты) к первому приближению, которые затем интерполируются на модельную сетку и добавляются к полям модели. При анализе полей геопотенциала и ветра в свободной атмосфере используется схема трехмерной локальной многоэлементной ОИ. Параметры трехмерной ковариационной модели были взяты из литературных источников, а затем по результатам работы СУД осуществлялась их настройка с учетом особенностей конкретных схем анализа и прогноза. Наблюдения усваиваются с шагом 6 часов.

Более детально процедура анализа наблюдений описана в работе [12].

3. Прогностическая модель

Используется глобальная полулагранжева конечно-разностная модель. Переменными модели являются вертикальная составляющая абсолютного вихря, горизонтальная дивергенция, температура, удельная влажность и приземное давление. Формулировка и алгоритмы, используемые в модели, допускают использование сферической системы координат с повернутыми полюсами, а также переменное разрешение по широте. Таким образом, удается достичь локально-высокого разрешения в регионе, представляющем интерес. Для аппроксимации неадвективных слагаемых применяются компактные разности четвертого порядка. Схема интегрирования по времени — двухслойная полу неявная, с экстраполяцией полей ветра и нелинейных слагаемых прогностических уравнений на промежуточный уровень по времени. Имеется версия модели, подготовленная для использования на массивно-параллельном компьютере с использованием технологии MPI.

Модель включает набор параметризаций процессов подсеточного масштаба, разработанный в метеорологической службе Франции для модели ARPEGE/IFS с некоторыми модификациями. Все используемые при усвоении данных версии модели (см. введение) имеют 28 неравномерно расположенных -уровней по вертикали.

Более полное описание модели приведено в работе [7].

4. Технология работы численного усвоения и численные эксперименты

Предварительный вариант СУД, использующий регулярную широтно-долготную сетку $1.40625 \times 1.125^\circ$, реализован на вычислительной системе CRAY-YMP и представляет собой комплекс программ, подготовленных на языке программирования Фортран 90. Программы объединены в единое целое управляющей программой в командах оболочки UNIX. Обмен данными между программами осуществляется посредством служебных файлов, в которых поля метеоэлементов хранятся закодированными в кодировке GRIB.

Предварительный вариант системы усвоения прошел детальную авторскую проверку, наиболее пристально (во многом по техническим причинам) рассматривался февраль 2000 г. Одной из основных характеристик качества усвоения повсеместно является отклонение полей первого приближения от данных наблюдений. На рис. 1 показаны среднеквадратичные ошибки первого приближения геопотенциала (6-часовые прогнозы) во внутритропической области Северного полушария для представляемой СУД (10–28 февраля)

и для двух зарубежных систем усвоения данных. Для сравнения были взяты результаты расчетов СУД, разработанной в Data Assimilation Office (ДАО) Годдаровского центра космических полетов (НАСА, США) ([2], работа 1998 г, используется трехмерное вариационное усвоение, рассматривается срок 20–29 февраля 1992 г), и Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) ([5], четырехмерное вариационное усвоение, период с 1 по 14 февраля 1997 г). В целом качество первого приближения разработанной СУД представляется приемлемым.

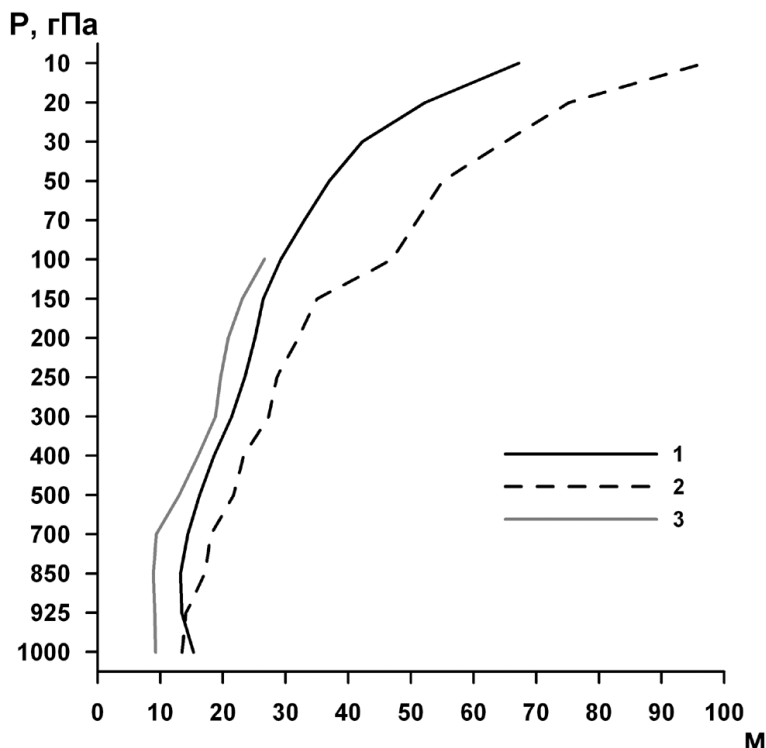


Рис. 1. Осредненные по внетропической области Северного полушария среднеквадратичные ошибки первого приближения геопотенциала по сравнению с данными радиозондирования: 1 — представляемая СУД, 2 — ДАО, 3 — ЕЦСПП

В таблице 1 приводится сравнение качества прогнозов с заблаговременностью 24 и 72 часа, стартовавших с анализа представляемой СУД (полулагранжева модель атмосферы) с качеством прогнозов зарубежных метеорологических центров.

Принимая во внимание тот факт, что в рассматриваемый период все зарубежные модели имели разрешение в 1,8-2,4 раза выше чем используемая полулагранжева модель (1,40625x1,125°), полученные результаты можно считать вполне удовлетворительными.

Версия модели с переменным разрешением (256x161 узлов) была проверена на данных анализа ЕЦСПП за 1996 год, некоторые результаты приводятся в таблице 2. По приведенным в таблице данным можно отметить, что использование переменного разрешения позволяет улучшить прогноз погоды на срок до 3-х суток.

Система, включающая в себя усвоение данных на сетке 400x257 узлов и численный прогноз погоды на срок до 5 суток, требует значительных вычислительных ресурсов. К моменту подготовки данной статьи система функционирует на нескольких серверах, содержащих по 4 процессора Intel Itanium II, соединенных сетью 1 Гб Ethernet. Один сервер

Таблица 1. Осредненные по области 20–90 с.ш. среднеквадратические ошибки прогнозов геопотенциала по данным представляемой СУД за период 10–25 февраля 2000 г. и прогнозов ведущих прогностических центров за февраль 2000 г.

СУД	H_{500} , (м)		H_{250} , (м)	
	24 ч.	72 ч.	24 ч.	72 ч.
Представляемая	19,0	42,3	23,9	55,9
США	13,7	39,1	18,3	51,2
Канада	17,1	41,9	24,6	55,7
Германия	18,0	42,7	23,5	54,3
ЕЦСПП	12,0	33,5	14,7	41,7

Таблица 2. Осредненные по области 50–90 с.ш. среднеквадратические ошибки прогноза геопотенциала для версий полулагранжевой модели с постоянным и переменным разрешением (среднее за 12 прогнозов с 15 числа каждого месяца 1996 г.)

Модель	H_{500} , (м)			H_{250} , (м)		
	24 ч.	48 ч.	72 ч.	24 ч.	48 ч.	72 ч.
С постоянным разр.	18,8	30,7	45,0	17,2	29,6	47,4
С переменным разр.	17,5	28,5	43,3	15,9	27,9	46,0

выделен под работу собственно системы усвоения (этот сервер является «управляющим»), прогнозы погоды на срок до 5 суток рассчитываются на одном из других серверов. Данные между серверами передаются с использованием стандартного протокола ftp, программы на произвольном сервере запускаются «управляющим» сервером с помощью команды gemsh. Подобный подход был выбран с тем, чтобы упростить передачу (в перспективе) части вычислений на другие вычислительные системы при использовании стандартных настроек сетевых устройств. Оперативные данные наблюдений, поступающих в Гидрометцентр России, пересылаются на «управляющий» сервер с одного из компьютеров, на котором функционирует оперативная база данных Гидрометцентра РФ (на данном этапе это CRAY-YMP) с помощью программы-клиента базы данных. Наблюдения пересылаются в виде заархивированных текстовых файлов — такой способ позволяет без затрат избежать проблем с разным представлением чисел на различных вычислительных системах. Данные наблюдений, поля анализов и прогнозов сохраняются на архивной системе, содержащей RAID- массив SCSI дисков, соединенный с библиотекой картриджей емкостью около 1 Тб.

5. Исследование влияния точности наблюдения в свободной атмосфере на качество усвоения

Ошибки в численном восстановлении четырехмерного состояния атмосферы определяются неточностью наблюдений, ошибками модели и несовершенством техники анализа. Используя описанную систему «анализ-прогноз» (версия с горизонтальным разрешением $1.40625 \times 1.125^\circ$) было проведено исследование роли несмещенных ошибок наблюдений в свободной атмосфере.

Для циклического усвоения скалярной величины при принятии ряда упрощающих

гипотез можно получить линейную зависимость дисперсии ошибки первого приближения от ошибок наблюдений:

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_a^2 + A\sigma_{obs}^2, \quad (1)$$

где σ_{tot}^2 — дисперсия ошибок первого приближения, σ_a^2 — вклад ошибки, обусловленной несовершенством технологии усвоения, σ_{obs}^2 — ошибка наблюдений. Имея значения σ_{tot}^2 при нескольких σ_{obs}^2 можно рассчитать коэффициент A и вклад ошибки, связанной с несовершенством методики анализа и прогноза.

Было проведено следующее исследование — к имеющимся данным наблюдений добавлялись псевдослучайные независимые нормально распределенные несмещенные возмущения, таким образом, чтобы дисперсия ошибок наблюдений возрастала в заданное число раз. Затем наблюдения усваивались и результаты сравнивались с невозмущенными наблюдениями. В качестве меры ошибки использовалась удельная энергия возмущений, предложенная в работе [13]:

$$E_{tot} = \frac{1}{2 \cdot M \cdot g} \iiint \left\{ \delta \vec{V}^2 + \left(\frac{R}{C_0} \delta T \right)^2 \right\} \cdot dP \cdot dS. \quad (2)$$

Здесь $\delta \vec{V}$ и δT — ошибки вектора скорости ветра и температуры, $C_0 = -RTP (d \ln \theta / dP)$ — параметр устойчивости, M — масса атмосферы. R — газовая постоянная сухого воздуха, P — давление.

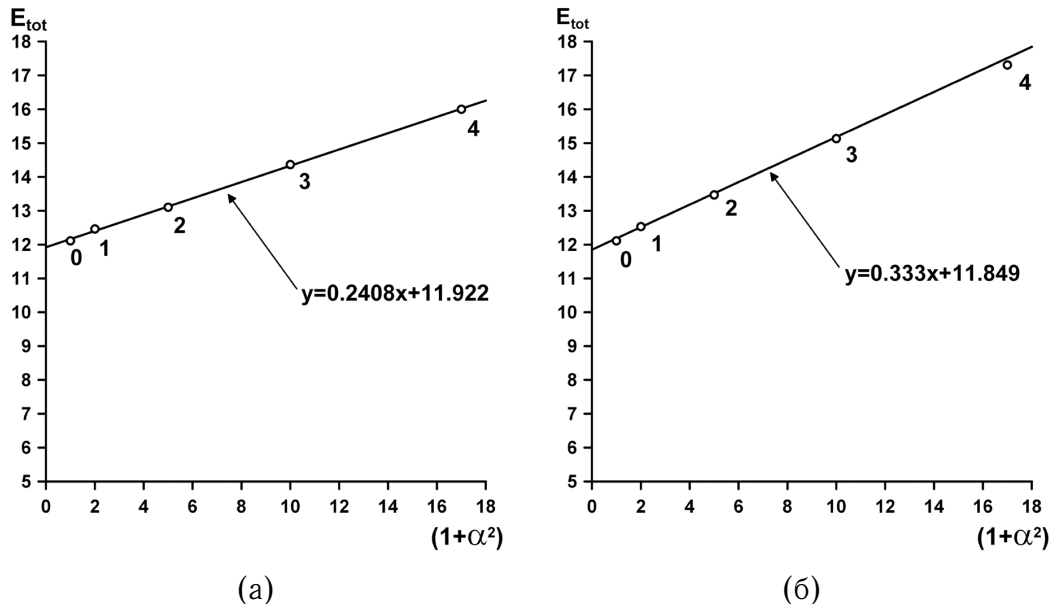


Рис. 2. Изменение энергии ошибок первого приближения при добавлении ошибок к наблюдениям. а) Возмущены данные радиозондирования; б) Возмущены все данные наблюдений в свободной атмосфере (радиозонды, спутниковые и самолетные наблюдения)

На рис. 2 показана зависимость энергии возмущений от полной (реальной + добавленной) дисперсии ошибок $(1 + \alpha^2)$ при возмущении только данных радиозондирования (рис. 2а) и при возмущении всех наблюдений в свободной атмосфере (рис. 2б). Приведены результаты для внетропической области Северного полушария, период осреднения 10–28 февраля 2000 г.

Из рис. 2 видно, что при увеличении точности имеющихся наблюдательных систем можно ожидать весьма незначительного улучшения качества восстановления состояния атмосферы. Поскольку известно, что переход от ОИ к вариационному усвоению не сопровождается радикальным улучшением качества полей анализа, то можно обобщить основной вывод исследования следующим образом: Не следует ожидать существенного положительного эффекта от увеличения точности имеющихся наблюдательных систем, гораздо больший эффект можно получить увеличивая их пространственное и временное разрешение, а также включая новые наблюдательные системы.

6. Заключение

Разработана глобальная система усвоения атмосферных данных «анализ-прогноз». Тестирование системы усвоения данных в режиме с постоянным разрешением по широте показало перспективность проводимых разработок.

В настоящее время основной задачей авторов является настройка и приведение к виду, пригодному для оперативного использования СУД на вычислительной сетке с переменным разрешением. Также одним из возможных направлений улучшения является расширение списка анализируемых полей и применение более развитой схемы контроля наблюдений. В более далекой перспективе планируется переход к вариационному усвоению в рамках кратко описанного выше последовательного подхода.

Список литературы

- [1] Фролов А.В., Важник А.И., Свиренко П.И., Цветков В.И. Глобальная система усвоения данных наблюдений о состоянии атмосферы // Гидрометеиздат. Санкт-Петербург. 2000.
- [2] COHN S.E., DA SILVA A., SIENKIEWICZ M., LAMICH D. Assessing the effects of data selection with the DAO physical-space statistical analysis system // *Mon. Weather Rev.* 1998. V. 126. P. 2913–2926.
- [3] COURTIER P., THERAUT J.-H., HOLLINGSWORTH A. A strategy for operational of 4D-Var using an incremental approach // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1994. V. 120, P. 1367–1387.
- [4] MITCHELL H.L., CHARETTE C., CHOUINARD C., BRASNETT B. Revised interpolation statistics for the Canadian data assimilation procedure, their derivation and application // *Mon. Weather Rev.* 1990. V. 118. N. 8, P. 1591–1614.
- [5] RABIER F., JARVINEN H., KLINKER E., MAHFOUF J.-F. AND SIMMONS A. The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I: Experimental results with simplified physics // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2000. V. 126. P. 1143–1171.
- [6] MCPHERSON R.D., BERGMAN K.H., KISTLER R.E. ET AL. The NMC operational global data assimilation system // *Mon. Weather Rev.* 1979. V. 107. P. 1445–1461.

- [7] Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // *Метеорология и гидрология*. 2001. N. 4. С. 5–16.
- [8] Багров А.Н., Шиляев В.Б., Локтионова Е.А. Оперативная схема объективного анализа метеорологических полей для численного гидродинамического прогноза погоды // *Труды Гидрометцентра СССР*. 1986. Вып. 280. С. 25–55.
- [9] Багров А.Н., Цырульников М.Д. Оперативная схема объективного анализа Гидрометцентра России // *Труды Гидрометцентра России*. 1999. Вып. 334, С. 59–69.
- [10] JAZWINSKY A.H. Stochastic processes and filtering theory // Acad. Press. New York and London. 1970.
- [11] TSYROULNIKOV M.D. Three-dimensional assimilation of observations with uniform coverage using optimal spatial filtering // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. WMO. 1999. Rep. N. 27. P. 1.40–1.41.
- [12] Цырульников М.Д., Толстых М.А., Багров А.Н., Зарипов Р.Б. Развитие глобальной системы усвоения данных с переменным разрешением // *Метеорология и гидрология*. 2003. N. 4. С. 5–22.
- [13] TSYROULNIKOV M.D. On the relative contribution of wind and mass observations in numerical weather forecasting. // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2003. V. 37. P. 89–112.