

## Усвоение почвенных и приземных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды\*

Н. Н. БОГОСЛОВСКИЙ, М. А. ТОЛСТЫХ

*Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия*

*ГУ “Гидрометцентр России”, Москва, Россия*

e-mail: dorgun@mail.ru, tolstykh@inm.ras.ru

А. В. ШЛЯЕВА

*ГУ “Гидрометцентр России”, Москва, Россия*

e-mail: shlyaeva@gmail.com

This paper considers the data assimilation schemes for the surface temperature, relative humidity, and the soil variables (including surface soil temperature, deep soil temperature, surface and deep soil water content). Variational assimilation is used for temperature analysis at 2 m depths, while the analysis of 2-meter relative humidity is carried out via optimal interpolation method. The implementation of these schemes along with the improvement of the NWP model resulted in reduction of the 2-meter temperature and relative humidity analysis and forecast errors.

### Введение

Одной из важнейших задач метеорологии является повышение качества численного прогноза погоды. Существует несколько путей повышения точности прогноза: повышение точности решения уравнений гидротермодинамики атмосферы, улучшение описания физических процессов подсеточного масштаба, улучшение оценки начального состояния атмосферы. Все направления связаны между собой, развитие и улучшение только в одном из них не обязательно приведет к лучшим результатам. Поэтому выбран комплексный подход.

В модели ПЛАВ-2005 [1] реализована новая параметризация физических процессов подсеточного масштаба на поверхности суши с учетом растительности ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere), которая разработана во Французской метеослужбе [2]. Но, как показывают проведенные эксперименты по чувствительности [3], основанные на 72 часовых прогнозах, при использовании данной параметризации очень важно качественное задание начальных данных для влагосодержания и температуры почвы. Была реализована согласованная со схемой параметризации ISBA-схема задания начальных значений почвенных переменных [4]. Так как в этой схеме используется анализ температуры и относительной влажности на уровне 2 м, соответственно ошибки анализа на уровне 2 м влияют на ошибки задания почвенных переменных. Для улучшения исследования приземных метеополей реализованы анализ приземной влажности на базе

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 06-05-08109 и № 07-05-00893).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

метода оптимальной интерполяции и анализ приземной температуры на основе вариационного метода, соответствующие современному уровню знаний в области физики взаимодействия суши и атмосферы, а также современным вычислительным технологиям. Выполнены эксперименты, показывающие преимущества использования данных подходов.

## 1. Схема коррекции почвенных переменных

Схема, предложенная [4], инициализирует следующие переменные: поверхностную температуру почвы ( $T_s$ ), температуру глубинного слоя почвы ( $T_p$ ), влагосодержание приповерхностного ( $\omega_s$ ) и глубинного ( $\omega_p$ ) слоев почвы. Данная схема основывается на коррекции температуры и влагосодержания в зависимости от ошибки прогноза температуры и относительной влажности на высоте 2 м.

Для коррекции температуры почвы в каждой точке сетки применяются следующие формулы:

$$\Delta T_s = \Delta T_{2m}, \quad \Delta T_p = \Delta T_{2m}/2\pi, \quad (1)$$

где  $\Delta$  — инкремент, т.е. разность между значением анализа и значением поля первого приближения (шестичасовой прогноз, стартовавший 6 ч назад). Коррекция для  $T_s$  и  $T_p$  производится всегда.

Для коррекции влагосодержания поверхностного и основного слоев почвы используется метод, предложенный в [4]:

$$\Delta \omega_s = \alpha_s^T \Delta T_{2m} + \alpha_s^H \Delta RH_{2m}, \quad \Delta \omega_p = \alpha_p^T \Delta T_{2m} + \alpha_p^H \Delta RH_{2m}, \quad (2)$$

где  $RH_{2m}$  — инкремент анализа относительной влажности. Коэффициенты  $\alpha_s^T$ ,  $\alpha_s^H$ ,  $\alpha_p^T$ ,  $\alpha_p^H$  зависят от структуры почвы, локального солнечного времени, зависящего от склонения солнца и абсолютного солнечного времени (т.е. от даты, долготы и широты) и характеристик подстилающей поверхности [5]. Аналитические выражения для коэффициентов приведены в работе [4].

Существующая в рамках системы усвоения данных СУД ИОИ ГУ “Гидрометцентр России” схема записывается следующим образом (далее — оперативная схема):

$$\Delta T_s = 0,5\Delta T_{2m}, \quad \Delta T_p = 0, \quad \Delta \omega_s = 0, \quad \Delta \omega_p = 0,$$

т.е. коррекция влагосодержания почвы и температуры глубинного слоя почвы не производится.

## 2. Объективный анализ относительной влажности

Для поля относительной влажности на высоте 2 м реализован объективный анализ на основе схемы оптимальной интерполяции. В качестве входной информации используются наблюдаемые данные SYNOP, и SHIP, и поле первого приближения, являющееся шестичасовым прогнозом модели ПЛАВ-2005, стартующим с предыдущего цикла анализа. Алгоритм анализа соответствует алгоритмам, применяемым в ECMWF [6] и в модели HIRLAM [7]. В отличие от используемого оперативно анализа СУД ИОИ [8], в

описываемом методе ковариационная матрица ошибок содержит зависимость не только от расстояния по горизонтали, но и от разности высот. Функция корреляции имеет следующий вид:

$$\mu_{ij} = \exp \left( -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{r_{ij}}{R} \right)^2 + \left( \frac{z_{ij}}{Z} \right)^2 \right] \right), \quad (3)$$

т. е. учитывается анизотропия ошибок полей первого приближения. Здесь  $r_{ij}$  — расстояние между точками  $i$  и  $j$ ;  $z_{ij}$  — разность высот между точками  $i$  и  $j$ ;  $R$  — коэффициент, задающий радиус корреляции;  $Z$  — максимальная разность высот коррелирующих между собой точек. По сравнению с применяемым ранее анализом используется большее число наблюдений в каждом узле сетки (число станций ограничено пятьюдесятью, а не восемью). Для близко расположенных станций генерируется так называемое супернаблюдение, являющееся средним арифметическим наблюдений, находящихся друг от друга на расстоянии меньше заданного. Еще одним отличием анализа от анализа СУД ИОИ является использование наблюдений на суше (море) для анализа только в точках сетки, которые расположены над сушей (морем). Кроме того, в качестве переменной для анализа приземной влажности используется относительная влажность, вычисляемая на основании данных температуры на высоте 2 м и температуры точки росы (в отличие от дефицита точки росы в анализе СУД ИОИ).

### 3. Вариационное усвоение приземной температуры

Рассмотрим основные особенности дискретного алгоритма вариационного усвоения данных. Пусть  $x$  есть вектор-столбец истинных значений состояния атмосферы в узлах сетки. Через  $x_b$  обозначим вектор-столбец поля первого приближения (шестичасовой прогноз, стартовавший с анализа предыдущего цикла усвоения) и через  $x_a$  — вектор-столбец анализируемых значений атмосферных величин,  $y$  — вектор-столбец наблюдений. Размерность вектора наблюдений  $y$  и векторов  $x$ ,  $x_b$  различается на несколько порядков, и векторы могут соответствовать различным характеристикам атмосферы. Например,  $x$  может быть относительной влажностью на уровне 2 м, а вектор наблюдений  $y$  — температурой точки росы на том же уровне. Для перехода из модельного пространства в пространство наблюдений используется оператор  $H$ , называемый оператором наблюдений.

Сделаем следующие предположения.

- $H$  можно линеаризовать для любого  $x$ , достаточного близкого к  $x_b$ .
- Ковариационные матрицы  $B$  и  $R$  — симметричные, положительно определенные.
- Средняя ошибка прогноза и средняя ошибка наблюдений равны нулю.
- Ошибки первого приближения и наблюдений не коррелируют между собой.
- Предполагается, что все наблюдения сделаны в один момент времени, т. е. в момент времени  $t_0$  (в часах), когда делается усвоение, берутся все наблюдения, которые попали в интервал времени  $[t_0 - 3, t_0 + 3]$ .

Тогда вектор объективного анализа состояния атмосферы получается из условия минимума следующего функционала:

$$J(x_a) = \frac{1}{2} (x_a - x_b)^T B^{-1} (x_a - x_b) + \frac{1}{2} (H(x_a) - y)^T R^{-1} (H(x_a) - y). \quad (4)$$

При реализации данного метода использовались следующие упрощения. Предполагалось, что ошибки наблюдений в двух разных точках не коррелируют между со-

бой, поэтому ковариационная матрица ошибок наблюдений  $R$  является диагональной. Для задания ковариационной матрицы  $B$  в случае глобального усвоения использовать функцию (3) нельзя, так как в сферических координатах она не является положительно определенной. Для это использовалась функция (5). Функция такого вида предложена в [9], но для учета разности высот двух точек введено дополнительное слагаемое:

$$\rho_{\lambda\theta} = \left(1 + \mu \frac{\sin(\theta/2)}{\sin(\lambda/2)}\right) \max\left[0, 1 - \frac{\sin(\theta/2)}{\sin(\lambda/2)}\right]^\mu \left(1 + \mu \frac{z}{Z}\right) \max\left[0, 1 - \frac{z}{Z}\right]^\mu, \quad (5)$$

где  $\lambda$  — коэффициент, задающий радиус корреляции;  $\theta$  — угловое расстояние между двумя точками в радианах;  $z$  — разность высот между двумя точками;  $Z$  — максимальная разность высот коррелирующих между собой точек;  $\mu \geq 4$  — масштабирующий параметр.

#### 4. Результаты

Рассмотренные выше методы реализованы для полулагранжевой глобальной модели прогноза погоды [1]. Разрешение данной модели составляет  $0.9^\circ$  по долготе,  $0.72^\circ$  по широте; вертикальное разрешение 28 уровней. В качестве начальных данных для величин, которые рассмотренные схемы не инициализируют, использовались анализы, полученные в результате работы системы усвоения данных СУД ИОИ ГУ “Гидрометцентр России” на базе данной модели [8].

Тестирование методов проводилось в полном цикле усвоения. Выполнена оценка качества анализа при использовании метода оптимальной интерполяции и вариационного усвоения (2dvar). В качестве оценок выбраны средняя и среднеквадратическая ошибки температуры и относительной влажности на уровне 2 м относительно данных наблюдений SYNOP.

На рис. 1 приведены графики среднего отклонения (два нижних графика) и среднеквадратической ошибки (два верхних графика) шестичасового прогноза температуры

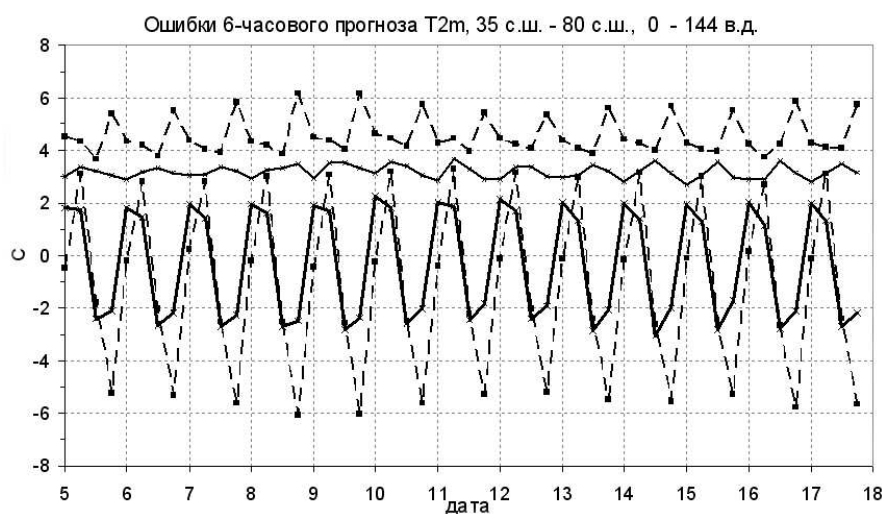


Рис. 1. Оценка шестичасового прогноза для  $T_{2m}$  относительно данных наблюдений за 5–17 июня 2007 г.: сплошные линии — новая параметризация ISBA + новая схема задания начальных данных; штриховая линия — старая параметризация и старая схема усвоения

на высоте 2 м в полном цикле усвоения. Данный шестичасовой прогноз является полем первого приближения для следующего цикла работы системы усвоения данных. По оси абсцисс отложены сроки старта усвоения, для которых проводились оценки. В сутки выполнено четыре цикла усвоения в 0, 6, 12 и 18 ч. Как видно из графика, применение новой схемы привело к уменьшению среднего отклонения и среднеквадратической ошибки. Оценки по остальным регионам показывают аналогичное улучшение качества прогноза.

Теперь обратимся к результатам тестирования разработанных объективных анализов для  $RH_{2m}$  и  $T_{2m}$ . На рис. 2 представлены графики отклонения и среднеквадратической ошибки анализа относительно данных наблюдений. Применение описанных методов позволяет значительно уменьшить ошибки анализа, в особенности среднее отклонение.

Кроме того, выполнены расчеты 48-часовых прогнозов для летней ситуации. На рис. 3 приведены ошибки численного прогноза погоды на срок 48 ч для температуры на уровне 2 м, осредненные за 5–17 июня 2007, при применении всех новых подходов, а также при использовании старой параметризации и данных системы усвоения СУД ИОИ. Два верхних графика соответствуют среднеквадратическому отклонению, а два ниж-

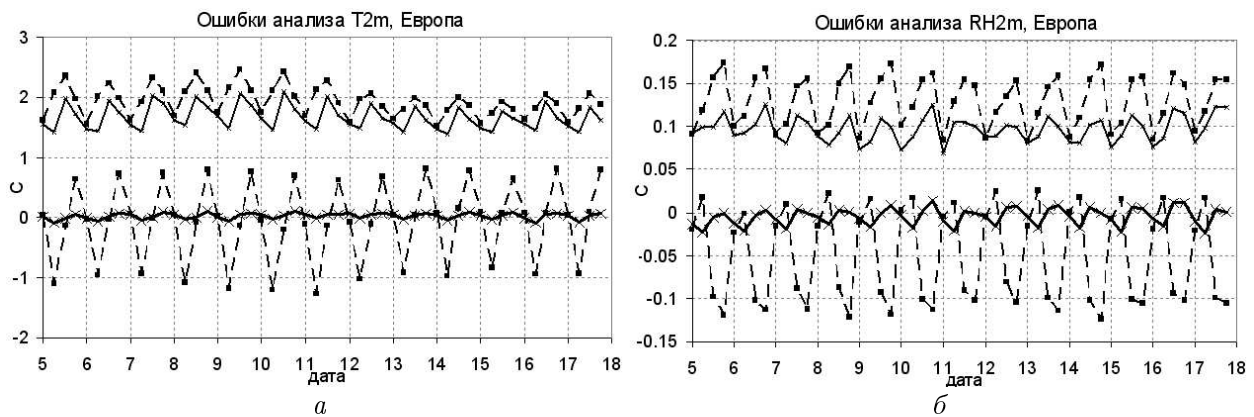


Рис. 2. Оценка анализа  $T_{2m}$  (а) и  $RH_{2m}$  (б) относительно данных наблюдений за 5–17 июня 2007 г.: сплошная линия —  $2dvar$  (а) и оптимальная интерполяция (б); штриховая линия — схема усвоения, применяемая в ГУ “Гидрометцентр России”

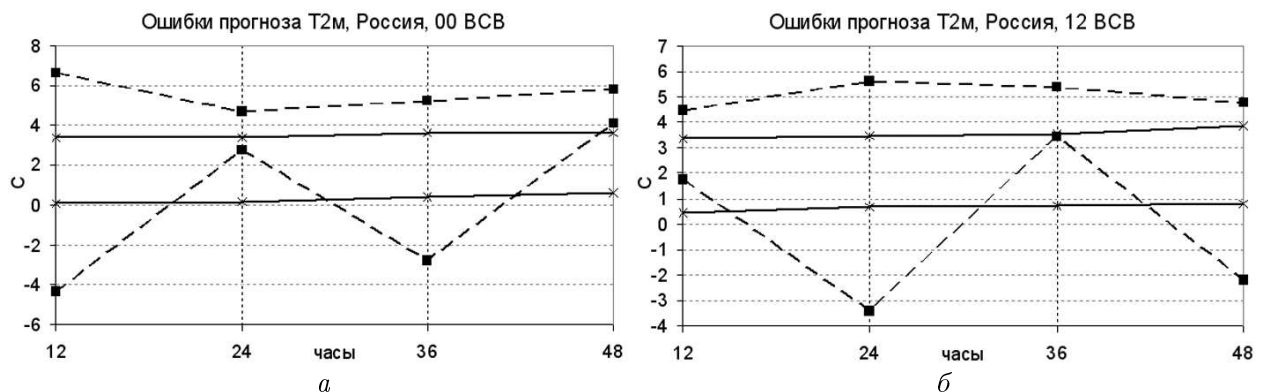


Рис. 3. Оценки прогноза  $T_{2m}$  на 48 ч, стартовавшего в 00 ВСУ (а) и 12 ВСУ (б) относительно данных наблюдений, осредненные за 5–17 июня 2007 г.: сплошная линия — применение новых схем задания начальных данных и новой параметризации; штриховая линия — старая параметризация + схема усвоения СУД ИОИ

них — средней ошибке. Видно, что применение новых схем дает меньшие ошибки. Это показывает эффективность новой параметризации и хорошо согласованной с ней системы усвоения данных наблюдений. Среднеквадратическая ошибка прогноза  $T_{2m}$  по Европе уменьшилась на 0.3, по всем регионам она в среднем уменьшилась на 1.5 град.

## Заключение

Результаты расчетов показали, что применение вариационного метода для анализа температуры на уровне 2 м и усовершенствованного метода оптимальной интерполяции для анализа относительной влажности позволяет получить объективный анализ с меньшими ошибками. Совместное использование нового анализа, параметризации ISBA и схемы коррекции для почвенных переменных позволило улучшить прогноз температуры и относительной влажности на уровне 2 м. С 1 июля 2007 г. реализация модели [1] с применением новой параметризации, анализа  $T_{2m}$  и  $RH_{2m}$ , коррекции почвенных переменных проходит оперативные испытания в ГУ “Гидрометцентр России”.

Для повышения эффективности расчетов алгоритм 2dvar распараллелен с использованием технологии OpenMP и MPI. Это позволяет применять его на современных многопроцессорных многоядерных системах. Ускорение при использовании технологии OpenMP при расчетах на четырех двухъядерных процессорах с общей памятью составило 6.2, ускорение при использовании MPI — 8.1. Уменьшение времени расчетов позволяет применять вариационное усвоение данных в оперативных расчетах.

## Список литературы

- [1] TOLSTYKH M.A. Semi-Lagrangian high-resolution atmospheric model for numerical weather prediction // Russ. Meteorology and Hydrology. 2001. N 4. P. 1–9.
- [2] NOILHAN J., MAHFOUF J.-F. The ISBA land surface parameterisation scheme // Global Planet. Change. 1996. Vol. 13. P. 145–149.
- [3] GIARD D., BAZILE E. Assimilation of soil temperature and water content with ISBA in arpege: Some new developments and tests // HIRLAM Newsl. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 1996. N 24. P. 10–12.
- [4] 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.
- [5] БОГОСЛОВСКИЙ Н.Н., ТОЛСТЫХ М.А. Реализация схемы усвоения для почвенных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11. Спецвыпуск. Ч. 3. С. 20–25.
- [6] IFS Documentation CY31R1. Part II: Data assimilation.  
<http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY31r1/ASSIMILATION/IFSPart2.pdf>
- [7] NAVASCUES B. Analysis of 2 meter temperature and relative humidity // HIRLAM Technical Report. N 28. Norrkoping, Jan. 1997.
- [8] 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.
- [9] TILMANN GNEITING. Correlation functions for atmospheric data analysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1999. Vol. 125. P. 2449–2464.

*Поступила в редакцию 21 февраля 2008 г.*