

В.С. Барабанов

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ С УСВОЕНИЕМ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Описана реализация усвоения данных методом *3DVAR* в региональной модели атмосферной циркуляции на основе *WRF*. Показано, что усвоение данных наблюдений приводит к заметным изменениям полей приводного ветра, что особенно важно для анализа экстремальных погодных явлений, таких, как квазитропический циклон над Черным морем в сентябре 2005 г.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Черное море, циркуляция, приводный ветер, математическое моделирование.*

**Введение.** Мезомасштабные модели атмосферной циркуляции (*MM5*, *WRF* и аналогичные) в настоящее время достаточно широко применяются в научных и практических целях, обеспечивая повышение пространственного разрешения прогнозных полей метеорологических параметров за счет детального учета взаимодействия воздушных потоков с подстилающей поверхностью. Для исследования регионального климата эти модели обычно применяются в режиме «даунскейлинга», когда входными данными служат поля реанализа с невысоким пространственным разрешением (массивы *NCEP/NCAR Reanalysis*, *ECMWF ERA-40* или *JRA-25*). В моделях решается полная система уравнений гидротермодинамики с начальными и граничными условиями, полученными аппроксимацией входных данных на более детальную сетку, причем в течение месяца и более происходит только подкачка граничных условий. В этом режиме во внутренней части расчетной области модель не корректируется данными наблюдений и в некоторых случаях может давать результаты, довольно сильно отличающиеся от реальной погоды. В частности, ранее проводившиеся нами расчеты на длительные сроки с использованием модели *MM5* показали, что коэффициент корреляции приповерхностного ветра с измерениями составляет около 80 % для зимы, но резко (до 40 – 60 %) падает в летний период, что связано с развитием короткоживущих мелкомасштабных конвективных процессов с характерной для них низкой предсказуемостью. Этот эффект не удается преодолеть простым уменьшением шага сетки или подбором параметризационных схем. Режим даунскейлинга, достаточно хорошо зарекомендовавший себя в климатических исследованиях, оказывается непригодным для изучения отдельных мезомасштабных явлений.

В ряде случаев можно получить качественные результаты, применяя короткий срок моделирования – до трех суток (на такой срок обычно рассчитывается оперативный прогноз, поэтому соответствующий режим работы будем называть квазипрогностическим). Так, в работе [1] исследовалось формирование квазитропического циклона, т.е. мезомасштабного вихря, близкого

по некоторым показателям к тропическому урагану, в юго-западной части Черного моря в сентябре 2005 г. Основным исследовательским инструментом была модель *MM5*. Сравнение результатов расчета с наблюдениями приводного ветра спутниковым скаттерометром *QuikSCAT* показало, что квазипрогностический режим дает достаточно хорошие результаты. Однако, было замечено, что в случае подстановки начальных данных за срок более суток положение циклона предсказать не удастся, что связано с необходимостью наличия «затравки» в поле ветра в момент начала расчета. Очевидно, однако, что при необходимости исследования всех мезомасштабных явлений в атмосфере региона за длительный срок нет возможности проводить отдельное моделирование каждого явления.

Для обеспечения более надежного расчета в данном случае можно использовать режим усвоения (ассимиляции) данных наблюдений, включая спутниковые. Этот режим используется при построении полей реанализа. Насколько нам известно, реанализ с усвоением данных на основе региональной модели для Черного моря пока не проводился. Поэтому целью данной работы был запуск и предварительная настройка системы регионального реанализа на основе модели *WRF* с подсистемой усвоения *WRFDA*.

**Современные методы ассимиляции данных наблюдений.** Будем использовать общепринятые в литературе обозначения для полей первого приближения  $\mathbf{x}^b$ , данных наблюдений  $\mathbf{y}^o$ , результатов анализа  $\mathbf{x}^a$ . Как известно, усвоение данных состоит в оптимальной коррекции полученных в результате работы прогностических моделей полей ( $\mathbf{x}^b$ ) по данным наблюдений:  $\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{K}(\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}^b)$ , где оператор  $\mathbf{H}$  формирует на основе полученного прогноза поле тех переменных и в тех координатных точках, которые соответствуют данным наблюдений, после чего можно найти расхождение прогностических данных с наблюдениями просто как  $\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}^b$ . Матрица  $\mathbf{K}$  задает весовые коэффициенты, с которыми вносятся поправки в поле  $\mathbf{x}^b$ . Поскольку измерения и сами содержат ошибки, метод прямой подстановки, при котором, очевидно,  $\mathbf{K} = \mathbf{H}^T$ , в практических целях не используется. Оптимальные значения весов соответствуют  $\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T)^{-1}$ , где  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{R}$  – матрицы ошибок прогноза и наблюдений соответственно. Рассмотрим подробнее задачу расчета  $\mathbf{B} = \langle (\mathbf{x}^b - \mathbf{x}^t), (\mathbf{x}^b - \mathbf{x}^t)^T \rangle$ . Поскольку истинное значение  $\mathbf{x}^t$  неизвестно, матрицу  $\mathbf{B}$  приходится как-то оценивать по имеющимся данным. Например, можно считать, что  $\mathbf{x}^b - \mathbf{x}^t$  примерно равняется расхождению двух прогнозов на данный срок с разной заблаговременностью, или же, при ансамблевом прогнозе, отклонению от среднего по ансамблю. Оба эти метода часто используются в системах анализа и прогноза погоды. В данной работе использовалась оценка  $\mathbf{B}$  по парным прогнозам с заблаговременностью 12 и 24 ч. Процедура расчета  $\mathbf{B}$  таким способом предполагает наличие большого количества прогнозов за разные сроки, которые получаются в ходе работы прогностической системы на базе мезомасштабной модели.

Решение задачи ассимиляции непосредственно на основе расчета матрицы  $\mathbf{K}$  получило название метода оптимальной интерполяции. Лоренц показал, что вместо этого расчета можно применять вариационный подход,

дающий тот же результат. Такой способ, получивший название *3D-Var*, реализован в системе *WRFDA*. Более совершенные методы, такие, например, как *4D-Var*, учитывают также изменение ошибок прогноза во времени, оценивая их на каждом шаге, но они гораздо более требовательны к вычислительным ресурсам и в данной работе не рассматриваются.

**Модель и система усвоения.** Основной моделью, использовавшейся для воспроизведения мезомасштабных атмосферных циркуляций в данной работе была модель *WRF (ARW-WRF* версии 3.1) [2]. По сравнению с ранее применявшейся нами моделью *MM5*, модель содержит ряд усовершенствований: численные схемы изменены на более точные (С-сетка Аракавы и схема Рунге-Кутты), добавлены новые варианты параметризаций подсеточных процессов, есть возможность учета влияния урбанизированных территорий, данные выводятся в стандартизированных форматах *NetCDF* и *GRIB2*, улучшен пользовательский интерфейс. В проводившихся тестах была выбрана расчетная область (домен), включавшая западную и центральную часть Черного моря и Крым, с шагом сетки по горизонтали 20 км и 28 неравномерно расположенными уровнями по вертикали. Моделировались погодные условия с 20 по 30 сентября 2005 г. Выбор параметризаций подсеточных процессов производился на основе рекомендаций, данных в документации модели, включая: погранслои по модели университета *Yongsei*, схему *Dudhia* для коротковолновой радиации (с учетом облачности), схему *Eta* для длинноволновой радиации, пятиуровневую модель почвы, учет гидрометеоров по схеме *Class 3* и параметризацию кучевой конвекции *Kain-Fritsch2*.

Описание системы усвоения данных содержится в работе [3]. Схема работы этой системы приведена на рис. 1, в ней использованы стандартные обозначения для полей первого приближения, анализа, наблюдений и матрицы ошибок. Цикл расчетов с усвоением включает коррекцию как начальных данных по всему домену, так и граничных условий. Сама коррекция производится вариационным методом. Матрица ошибок была рассчитана нами предварительно по данным за месячный срок.

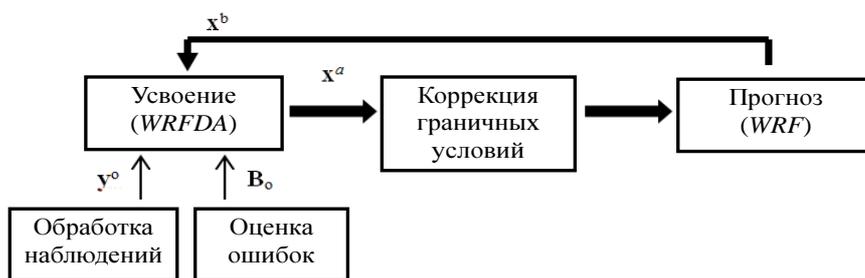


Рис. 1. Схема работы системы в режиме усвоения данных.

Источником данных для усвоения является массив *ds337.0*, доступный по адресу <http://dss.ucar.edu/datasets/ds337.0>. Этот массив включает данные измерений, выполняемых на метеостанциях, получаемых с помощью зондов, буев, судовых и авиационных измерительных систем, а также данные

спутниковых наблюдений за погодой с 1997 г. по настоящее время. Основным преимуществом данного массива по сравнению с другими источниками данных является единый стандартный формат *PrepBUFR*, использование которого предусмотрено в системе усвоения *WRFDA*. На рис. 2 показано расположение в Черноморском регионе точек, в которых были доступны для использования данные в исследуемый промежуток времени.

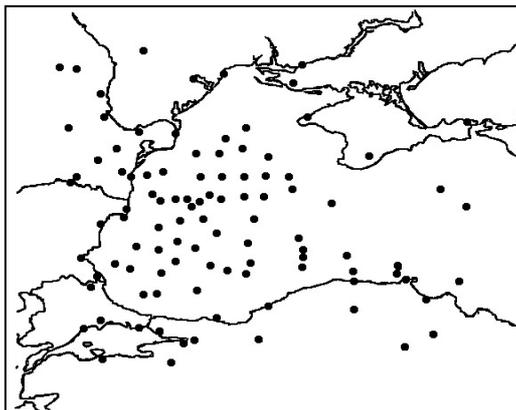


Рис. 2. Схема расположения точек с данными наблюдений в расчетной области в массиве ds337.0.

Информация о поле ветра над Черным морем была получена со спутника *QuikSCAT*, функционировавшего в 1999 – 2009 гг. На суше имеющиеся данные по всем метеорологическим параметрам получены с метеостанций, включенных в международную систему обмена метеоинформацией. Например, для Крыма это станции Симферополя (код 339 240), Черноморского (код 339 240) и Керчи (код 339 830).

**Результаты.** На рис. 3 представлены карты приповерхностного ветра за 24 сентября, 18:00 *UTC*. В трехчасовое временное окно для этого срока попадали не только данные прибрежных метеостанций, но и спутниковые наблюдения. В результате, как видно из сравнения поля первого приближения с полем анализа, проводилась заметная коррекция данных в Крыму, в северо-западной части домена, а также непосредственно над морем. Не очень большие по величине (менее 3 м/с) изменения в поле ветра (см. рис. 3, б), привели к смещению центра циклона.

Изменились и другие поля метеорологических параметров. Например, на рис. 4 представлена разность поля первого приближения и поля анализа для температуры на уровне 2 м над поверхностью.

При постоянной работе системы в режиме усвоения данных (см. рис. 1) происходит модификация не только начальных, но и граничных условий; в результате имеется непрерывный ряд данных (в нашем случае с дискретностью 1 ч). В случае квазитропического циклона можно, например, проследить во времени, как происходит изменение его формы и перемещается центр.

**Применение в системах прогноза.** Системы ассимиляции данных в настоящее время используются не только в реанализах, но и в прогностических расчетах. Поскольку для получения качественного краткосрочного

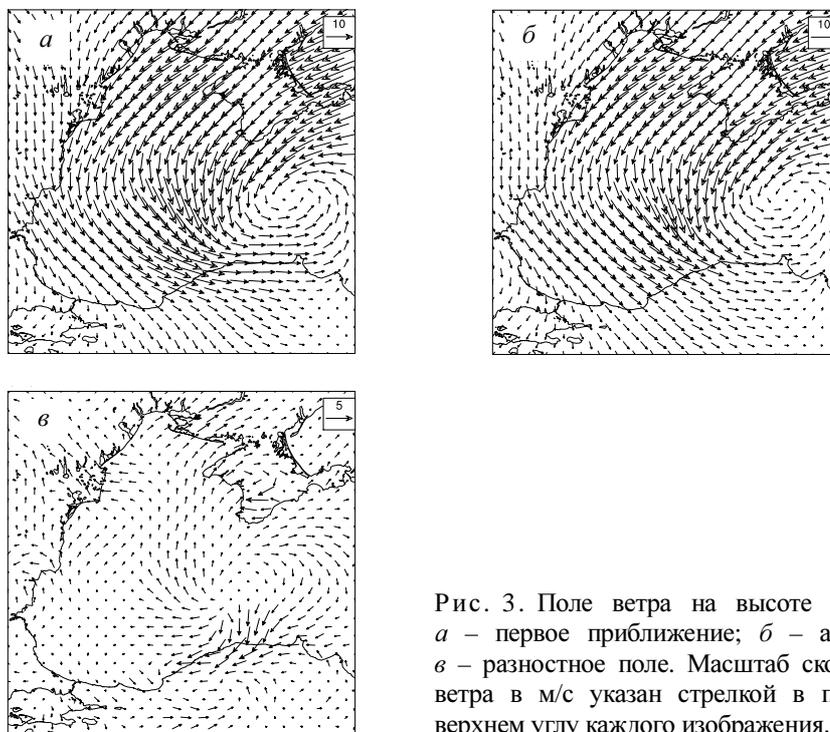


Рис. 3. Поле ветра на высоте 10 м: *a* – первое приближение; *б* – анализ; *в* – разностное поле. Масштаб скорости ветра в м/с указан стрелкой в правом верхнем углу каждого изображения.

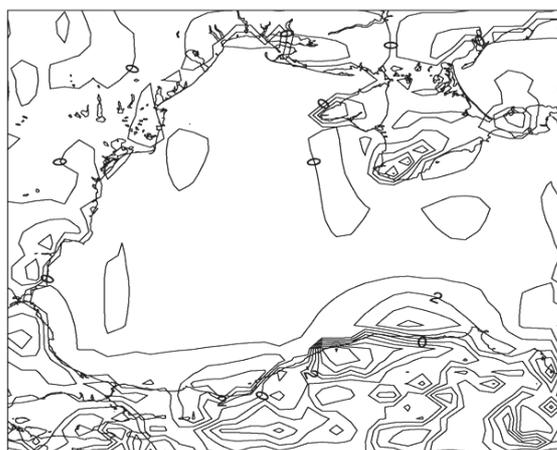


Рис. 4. Разностное поле температуры (°C) на высоте 2 м над поверхностью.

прогноза необходимо использовать как можно более точные начальные данные, система коррекции этих данных, полученных из глобальных моделей, может улучшить прогноз на более мелкой сетке мезомасштабной модели. Следует, однако, отметить рост требований к вычислительным ресурсам при таком режиме работы. Описанная выше схема работы предполагает двукратное проведение моделирования, общее время расчета увеличивается более чем вдвое, так как определенное время требуется и для проведения

собственно усвоения. Из литературы известно, что более совершенная методика усвоения *4D-Var* требует еще больших вычислительных затрат. В этой связи особое значение приобретает возможность эффективного распараллеливания вычислительных процессов и использование кластерных систем. В настоящее время модель *WRF* и подсистема *WRFDA* установлены на кластере МГИ НАН Украины. На рис. 5 приведены зависимости относительного времени тестового расчета для модели *WRF* в зависимости от числа процессорных ядер, задействованных на кластере. При полной загрузке кластера используется 64 ядра. Как видно из рис. 5, в текущей конфигурации системы прогноза не наблюдается заметного повышения скорости вычислений (сокращения времени расчетов) при увеличении числа ядер выше 32.

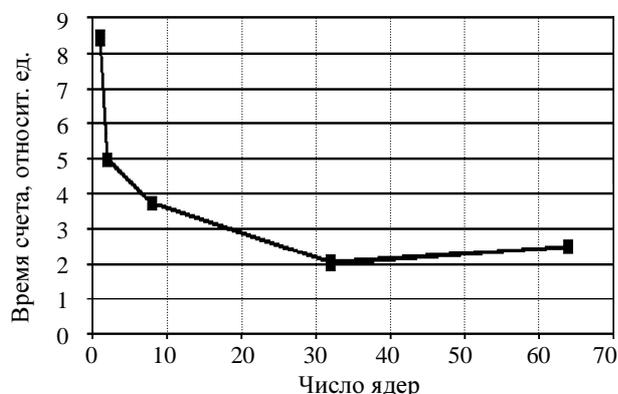


Рис. 5. Относительное время тестового расчета моделью *WRF* для разного числа процессоров на кластере МГИ НАН Украины.

**Заключение.** Осуществлен запуск и предварительная настройка, включающая расчет матрицы ошибок, системы усвоения данных *WRFDA*. Опробована на примере квазитропического циклона в сентябре 2005 г. совместная работа мезомасштабной модели *WRF* и *WRFDA* с использованием массива данных наблюдений ds337.0. Было показано, что в результате работы системы усвоения данных методом *3DVAR* результаты расчетов заметно корректируются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яровая Д.А., Ефимов В.В и др. Квазитропический циклон над Черным морем: наблюдение и численное моделирование // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 3. – С. 41-55.
2. Skamarock W.C., Klemp J.B. et al. A description of the Advanced Research WRF Version 3 / NCAR Technical Note. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center of Atmospheric Research. – 2008. – 113 p.
3. Barker D.M., Huang W., Guo Y.-R., Xiao Q.N. A Three-Dimensional (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5: Implementation and Initial Results.// Mon. Wea. Rev. – 2004. – 132. – P. 897-914.

Материал поступил в редакцию 30.11.2010 г.

После доработки 15.05.2011 г.