

В.С. Барабанов, М.В. Шокуров

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

СИСТЕМА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ

Разработана полностью автоматизированная система оперативного диагноза и прогноза погоды в Черноморском регионе на базе мезомасштабной модели атмосферной циркуляции *MM5* версии 3.7. Описаны программные решения автоматизации системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черноморский регион, атмосферная циркуляция, математическое моделирование, модель MM5.*

Введение. Региональные модели атмосферной циркуляции в настоящее время широко применяются для расчета погоды и климата с учетом воздействия подстилающей поверхности на атмосферную циркуляцию. Режим работы этих моделей определяется целями исследования. Так, в системах прогноза погоды проводится расчет на срок до 7 дней, начальные и граничные условия берутся из массивов данных, полученных в результате работы одной из глобальных прогностических моделей (чаще всего используется свободно доступный американский массив *GFS*). В исследованиях климата расчет производится на длительные сроки с подстановкой только граничных условий, полученных из полей реанализа, таких как массивы *NCEP/NCAR* или *ERA-40*. В режиме анализа используются как поля анализа глобальных моделей (массив *GDAS* и др.), так и данные наблюдений, включая спутниковые. В этом случае расчет предполагает не только решение системы так называемых «примитивных» уравнений термо- и гидродинамики с заданными граничными условиями, но и выполнение процедур усвоения данных, позволяющих оптимальным образом приблизить расчетные поля к наблюдаемым.

Система прогноза погоды Морского гидрофизического института НАН Украины разрабатывалась с целью получения граничных условий на поверхности для моделей циркуляции вод моря. Она основана на свободно распространяемой мезомасштабной модели *MM5*, адаптированная версия которой с успехом используется в МГИ НАН Украины в течение ряда лет. Расчетная область данной модели, показанная на рис. 1, была выбрана специально с целью детального воспроизведения состояния атмосферы для экватории Черного моря. Целью данной работы является описание системы прогноза в ее современной полностью автоматизированной версии.

Модель. Нами использовалась версия 3.7 свободно распространяемой модели *MM5*. Это последняя версия модели, после выпуска которой в 2004 г. развитие этой модели было завершено. Шаг сетки по горизонтали составлял 10 км, по вертикали имелось 23 неравномерно расположенных уровня, со следующими значениями σ -координат: 0,995; 0,985; 0,970; 0,945; 0,910;

© В.С. Барабанов, М.В. Шокуров, 2011

0,870; 0,825; 0,775; 0,725; 0,675; 0,625; 0,575; 0,525; 0,475; 0,425; 0,375; 0,325; 0,275; 0,225; 0,175; 0,125; 0,075; 0,025.

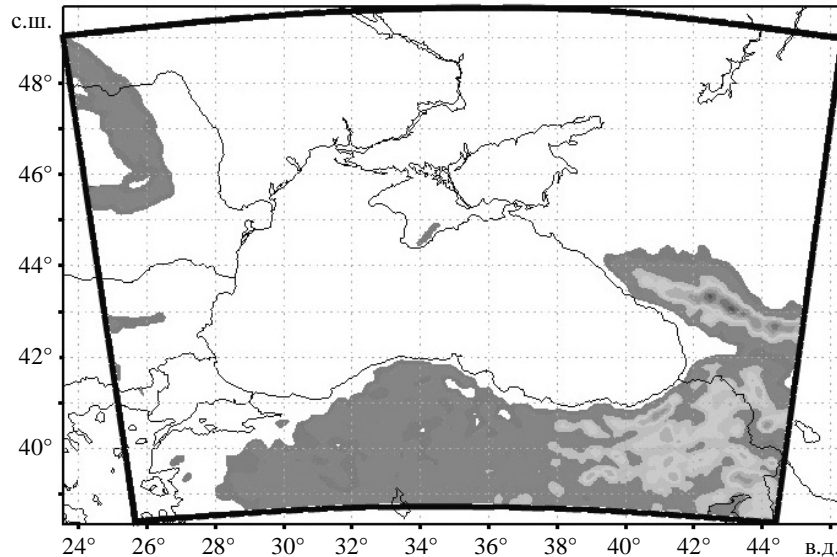


Рис. 1. Расчетная область модели.

Оперативный прогноз на трое суток организовывался с использованием в качестве начальных и граничных данных американского массива *GFS* с исходным разрешением $0,5^\circ$, имеющегося в открытом доступе на сервере <http://www.nomad3.ncep.noaa.gov>.

Граничное условие на подстилающей поверхности для акватории Черного моря бралось из пополняемого оперативного архива данных о глобальной температуре поверхности океана *Reynolds SST*, размещенного на сервере *NOMADS* – электронный адрес: <http://nomads6.ncdc.noaa.gov/pub/raid1c/sst>. Эти данные также имеют пространственное разрешение $1^\circ \times 1^\circ$ и обновляются раз в неделю. Для составления этого архива используются все имеющиеся оперативные измерения, включая спутниковые.

В модели *MM5* предусмотрены реализации различных схем параметризации подсеточных процессов, выбор которых осуществляется исходя из пространственного разрешения, географического расположения доменов и других особенностей конкретной реализации модели. Детальные сведения о реализованных параметризациях могут быть найдены в документации модели. Текущая комбинация параметризационных схем выбрана по следующей методике. Был проведен климатический реанализ атмосферной циркуляции над акваторией Черного моря с использованием в качестве входных данных массива *GDAS* с разрешением 1° на годичный срок с разными конфигурациями модели и исследована зависимость теплового баланса на поверхности Черного моря от выбора схем параметризации пограничного слоя, мелкой конвекции, а также модели почвы для побережий. Как оказалось, минимальный дисбаланс по тепловым потокам достигался при использовании конфигурации, включавшей: схему *MRF* для погранслоя, пяти-слойную модель почвы и отключение параметризации мелкой конвекции.

Ниже перечислены окончательно выбранные варианты параметризаций:

1. Для параметризации физических процессов в пограничном слое выбиралась схема *MRF*.
2. Для параметризации кучевой конвекции использовалась схема *Grell*.
3. Для расчета переноса излучения в атмосфере применялась схема *RRTM*.
4. Для расчета переноса гидрометеоров использовалась схема *Simple Ice* с одной формой льда в атмосфере.
5. Для расчета потоков тепла на поверхности суши использовалась пятислойная модель.

Автоматизация системы прогноза. Следует отметить, что модель *MM5* в исходном виде плохо приспособлена для работы в оперативном режиме. Полный цикл работы системы прогноза включает следующие этапы:

1. Загрузка исходных данных в формате *GRIB2* (прогнозов *GFS* и данных *Reynolds SST*) по каналам Интернет.
2. Установка даты начала прогноза, выбор нужных сроков и переменных в исходных данных, считывание данных и конвертация их во внутренний формат модели, запуск программы аппроксимации данных для расчетной сетки модели.
3. Запуск непосредственно мезомасштабной модели *MM5*.
4. Конвертация внутреннего формата данных в стандартный, пригодный для передачи в морские модели и для работы систем визуализации (с использованием готовых свободно распространяемых программ *MM5toGrADS* и *mm5tonetcdf*).
5. Отрисовка карт прогнозов по основным метеорологическим параметрам (система визуализации *GrADS*), копирование готовых карт на *Web*-сайт, копирование результатов расчета в стандартном формате для дальнейшего использования в морских моделях.

Ранее нами была проведена частичная автоматизация системы прогноза [1], не включавшая этап перекачки и конвертации данных в формате *GRIB2*. В настоящее время все перечисленные этапы последовательно обрабатываются разработанной автоматизированной системой, включающейся в заданное время (8 утра по местному времени, после появления на сайте *NOMADS* глобального прогноза *GFS*) стандартным средством *Unix*-подобных систем *cron*. Предусмотрена также возможность работы в полуавтоматическом режиме, когда оператор выполняет скачивание вручную с использованием интерактивных элементов сайтов *nomad* (выборки области и нужных переменных, что сокращает объем необходимых для копирования данных), например, по адресу http://nomad1.ncsr.noaa.gov/cgi-bin/ftp2u_gfs0.5.sh, а остальные этапы работы системы прогноза выполняются автоматически.

При конвертации результатов расчетов в форматы, удобные для использования в моделях циркуляции вод моря, были проведены также некоторые преобразования данных с целью обеспечить более полную информацию о потоках количества движения, тепла и влаги на поверхности моря. Данные выводились с дискретностью 1 ч, как в стандартном формате *NetCDF*, так и в текстовом, включая следующие параметры:

Стандартные для модели *MM5* выходные данные включают в себя следующие параметры:

- *LAT*: широта для каждого узла сетки;
- *LON*: долгота;
- *U10*: зональная компонента скорости ветра на высоте 10 м, в м/с;
- *V10*: меридиональная компонента скорости ветра;
- *SHFLUX*: поток явного тепла, в Вт/кв. м;
- *LHFLUX*: поток скрытого тепла;
- *UST*: скорость трения, в м/с;
- *SWDOWN*: падающая на поверхность коротковолновая радиация (в Вт/кв. м);
- *LWDOWN*: падающая на поверхность длинноволновая радиация;
- *NET RAD*: суммарный радиационный поток;
- *T2*: температура в К на высоте 2 м;

Дополнительно рассчитанные данные включают в себя следующие параметры:

- *LWUP*: исходящая с поверхности длинноволновая радиация, Вт/кв. м (расчет выполнялся по формуле Стефана-Больцмана);
- *EVAP*: испарение, мм/сут, рассчитывалось пропорционально *LHFLUX*;
- *RAIN*: осадки, суммарно конвективные и крупномасштабные, за текущий час;
- *TAUX*: зональная компонента напряжения ветра;
- *TAUY*: меридиональная компонента напряжения ветра.

Эти расчеты проводились с помощью скриптов системы *GrADS*, которая кроме визуализации данных позволяет проводить их обработку на основе довольно развитого скриптового языка. Командный файл осуществляет конвертацию выходных данных модели (файл *MMOUT_DOMAIN1*) в стандартный формат *NetCDF* (*MMOUT_DOMAIN1.nc*) с одновременной аппроксимацией на сетку $0,1^\circ$, затем запускает скрипт *GrADS* для вывода данных в бинарном формате и расчета дополнительных параметров, таких, как *TAUX* и *TAUY*, затем переводит данные в текстовый формат и производит вывод всех требуемых переменных, а также осуществляет графическое представление данных в виде карт и копирование их на сайт системы прогноза через *ftp*-протокол.

С сентября 2010 г. осуществлен переход на полностью автоматический режим работы, включая копирование входных данных, преобразование их в стандартные форматы, запуск модели, подготовку графических материалов и массивов данных с результатами расчетов и копирование полученных файлов на сайт.

Благодаря переходу на автоматический режим готовый прогноз выставляется на сайт не позднее 8 часов утра по местному времени. Была обновлена стартовая страница сайта для обеспечения быстрого доступа к прогностическим картам.

Внешний вид стартовой страницы рассматриваемой системы прогноза показан на рис. 2.



3-day weather forecast over the Black Sea

Marine Hydrophysical Institute, Atmosphere-Ocean Interaction Department, Sevastopol

2m temperature, deg.C	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
10m wind, m/s	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
10m wind streamlines	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
precipitation rate, mm/3hr	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
wind wave height, m	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
sensible heat flux, W/m ²	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
latent heat flux, W/m ²	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
T and geopotential at 850 mb	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
low clouds	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
mid clouds	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
high clouds	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
sea level pressure	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
2m specific humidity	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
2m relative humidity	03	06	09	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72

MM5 v.3.7 mesoscale model www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html

Current resolution 10x10km, 23 levels, domain, input data: Global Forecast System 0.5x0.5 GFS

PARAMETERIZATION SCHEMES:

- boundary layer - MRF
- soil - 5-layer land surface model
- cumulus convection - Grell
- radiation - RRTM
- moisture - simple ice
- shallow convection - off

Wind wave model - WAM, resolution 10x10km



Рис. 2. Стартовая страница на Web-сайте системы прогноза.

В набор прогностических карт, представленный на сайте МГИ НАН Украины (<http://www.vao.hydrophys.org>), были добавлены карты геопотенциала и температуры на уровне 850 гПа, облачности на трех уровнях, давления, приведенного к уровню моря и влажности. Общее число метеорологических параметров, прогнозы по которым могут быть получены на сайте, составило 14. В результате за период с 1 августа по 1 ноября 2010 г. наблюдается заметный положительный тренд в числе посещений (число посетителей увеличилось более чем в два раза).

Оценки качества прогнозов совпадают с данными работы [1]. Например, коэффициенты корреляции по приповерхностному ветру между рядами данных прибрежных метеостанций и прогнозами для первых суток составляют от 80 % в зимний период до 50 – 60 % в летний. С увеличением заблаговременности прогноза до трех суток этот показатель падает примерно вдвое.

Заключение. Разработанная автоматическая система прогноза атмосферной циркуляции является надежным источником данных о погоде в Черноморском регионе, обеспечивающим в оперативном режиме расчет данных о потоках тепла, влаги и количества движения на морской поверхности с высоким пространственным разрешением. Данные краткосрочных прогнозов, накапливаемых в ходе работы системы, могут быть использованы при проведении климатических и других исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барабанов В.С., Ефимов В.В., Шокуров М.В.* Автоматизированная система анализа и прогноза атмосферной циркуляции для Черноморского региона // Вестник СевНТУ, Вып. 95: Автоматизация процессов и управление. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2009. – С. 3-6.

Материал поступил в редакцию 30.11.2010 г.

После доработки 15.03.2011 г.