

СИСТЕМА ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ WRF-УКРАИНА

Abstract: *The software system of numerical weather prediction for Ukrainian territory is presented. The computational kernel of the system is the numerical weather prediction model WRF. The developed software includes automated means of visualization of the results of calculations and their statistical postprocessing and correction with the use of neural network and measurements.*

Key words: *numerical weather prediction, software system.*

Аноація: *Представлена програмна система чисельного прогнозування погоди WRF-Україна. Обчислювальним ядром цієї системи є модель чисельного прогнозу погоди нового покоління WRF. Розроблений комплекс програмних засобів містить автоматизовані засоби візуалізації результатів розрахунків та їх статистичної обробки й уточнення з використанням нейромереж і даних вимірювань.*

Ключові слова: *чисельний прогноз погоди, програмна система, нейромережа.*

Аннотация: *Представлена программная система численного прогнозирования погоды WRF-Украина. Вычислительным ядром этой системы является модель численного прогноза погоды нового поколения WRF. Разработанный комплекс программных средств включает в себя автоматизированные средства визуализации результатов расчетов, их статистической обработки и уточнения с использованием нейросетей и данных измерений.*

Ключевые слова: *численный прогноз погоды, программная система, нейросеть.*

1. Введение

Во всем мире в гидрометеорологических службах используются численные модели прогноза погоды для прогнозирования детальных распределений метеорологических элементов (скорости и направления ветра, осадков и др.) во времени и пространстве. Эти модели используются не только для прогнозирования погоды, но и для принятия решений в различных отраслях, таких как авиация, реагирование на стихийные бедствия и другие.

В 2000 – 2003 гг. в Украине впервые создана система численного прогноза погоды MM5-Украина на основе американской региональной модели MM5 [1] и разработан соответствующий программный комплекс [2]. Результаты оперативных прогнозов погоды системы MM5-Украина доступны на Интернет сайте МЕТЕОПРОГ [3]. Система MM5-Украина неоднократно использовалась для прогнозирования наводнений в Закарпатье [4], распространения радионуклидов в атмосфере [5] и др. При этом была выявлена важность повышения точности прогнозирования.

Точность прогнозирования метеорологических моделей сложным образом зависит от многих факторов. Среди них самыми важными являются: а) разнообразие физических процессов, которые описываются уравнениями модели, и соответствующие физические параметризации; б) точность и детальность входных данных; в) возможность усвоения (ассимиляции) данных измерений в расчетах модели.

В настоящее время дальнейшая разработка метеорологической модели MM5 прекращена, поскольку при поддержке Национального центра атмосферных исследований США разработана новая численная метеорологическая модель – WRF [6], которая так же, как и MM5, свободно распространяется в Интернете. В модели WRF используются более современные, чем в MM5, физические параметризации и методы усвоения данных измерений, что создает потенциальную возможность улучшения качества прогнозов на сайте МЕТЕОПРОГ с помощью использования

модели WRF. Однако для реализации этой возможности должна быть создана программная система, позволяющая не только получать и визуализировать результаты расчетов, но и производить сравнения этих результатов, во-первых, с данными измерений, а, во-вторых, с расчетами MM5, полученными для аналогичных условий. В последующих разделах описывается созданная для этих целей программная система WRF-Украина.

2. Программная система WRF-Украина

2.1. Метеорологическая модель WRF

В трехмерной численной метеорологической модели WRF [6] численно решается полная система уравнений гидротермодинамики атмосферы, которая включает в себя уравнения неразрывности, переноса импульса (с учетом эффектов сжимаемости и негидростатичности), переноса влаги и внутренней энергии. Пользователю модели предлагается библиотека различных параметризаций процессов в пограничном слое атмосферы, формирования облачности и осадков. В модели реализованы возможности создавать вложенные вычислительные области и использовать алгоритмы усвоения данных наблюдений. В WRF используется σ -система вертикальных координат, которая позволяет описывать сложный рельеф, и «шахматная» сетка по горизонтали. При интегрировании уравнений гидродинамики используется расщепление по направлениям (в горизонтальных направлениях используется явная схема, а при вычислении вертикальных потоков и скоростей – неявная) и по физическим процессам. WRF является региональной моделью, поэтому для ее инициализации и задания граничных условий необходимы результаты расчетов глобальной модели численного прогноза погоды. Цикл работы модели WRF состоит из подготовки данных, включая их горизонтальную и вертикальную интерполяцию на сетку модели, улучшение интерполированных данных с помощью усвоения наблюдений метеостанций и радиозондов и численное интегрирование.

2.2. Адаптация модели WRF к условиям Украины

Расчеты WRF-Украина проводятся в области размером 3000x3000x10 км, с центром в точке: 47,3° с.ш. и 32,4° в.д. Таким образом, вычислительная область целиком покрывает всю территорию Украины. Горизонтальное разрешение модели: 100 узлов с запада на восток и 106 с севера на юг, шаг сетки по этим направлениям одинаков, и равен 30 км (в MM5-Украина используется горизонтальный шаг сетки 27 км). Вертикальное разрешение модели – 14 уровней; минимальный вертикальный шаг сетки у поверхности Земли \approx 50 м.

Для решения задачи метеорологического прогноза система уравнений гидротермодинамики атмосферы должна быть дополнена начальными и граничными условиями. В качестве начальных условий должны задаваться трехмерные распределения полей трех компонент скорости, температуры, давления и влажности. В качестве граничных условий должны задаваться значения температуры, влажности и компонент скорости на боковых и на верхней границах области, а также значения потоков тепла, влаги и импульса на нижней границе области, прилегающей к поверхности Земли.

Начальные распределения в принципе можно построить с помощью интерполяции имеющихся измерений на территории Украины, а в качестве граничных условий на боковых и на верхней границах задавать постоянные значения переменных. Однако такой способ не учитывает влияние глобальной циркуляции атмосферы на развитие метеорологических полей в пределах Украины. Поэтому для задания начальных условий и условий на боковой и верхней границах целесообразно использовать данные прогнозов модели глобальной циркуляции атмосферы. В MM5-Украина для этой цели используются данные оперативных прогнозов Национального центра прогнозирования атмосферы NCEP (США) (Куцан и др, 2005). Прогностические поля модели NCEP сроком на 168 ч. прогнозного времени определяют начальные и граничные условия для метеорологических переменных и в WRF-Украина. Граничные условия на подстилающей поверхности зависят от свойств подстилающей поверхности. Используются следующие данные о подстилающей поверхности: высота поверхности над уровнем моря, категория подстилающей поверхности в соответствии с классификацией Геологической службы США USGS (например, лес, водная поверхность, и т.д.), тип растительности, тип почвы, средняя сезонная температура, среднемесячное альбедо. Соответствующие данные, как и для MM5-Украина, брались с сайта USGS.

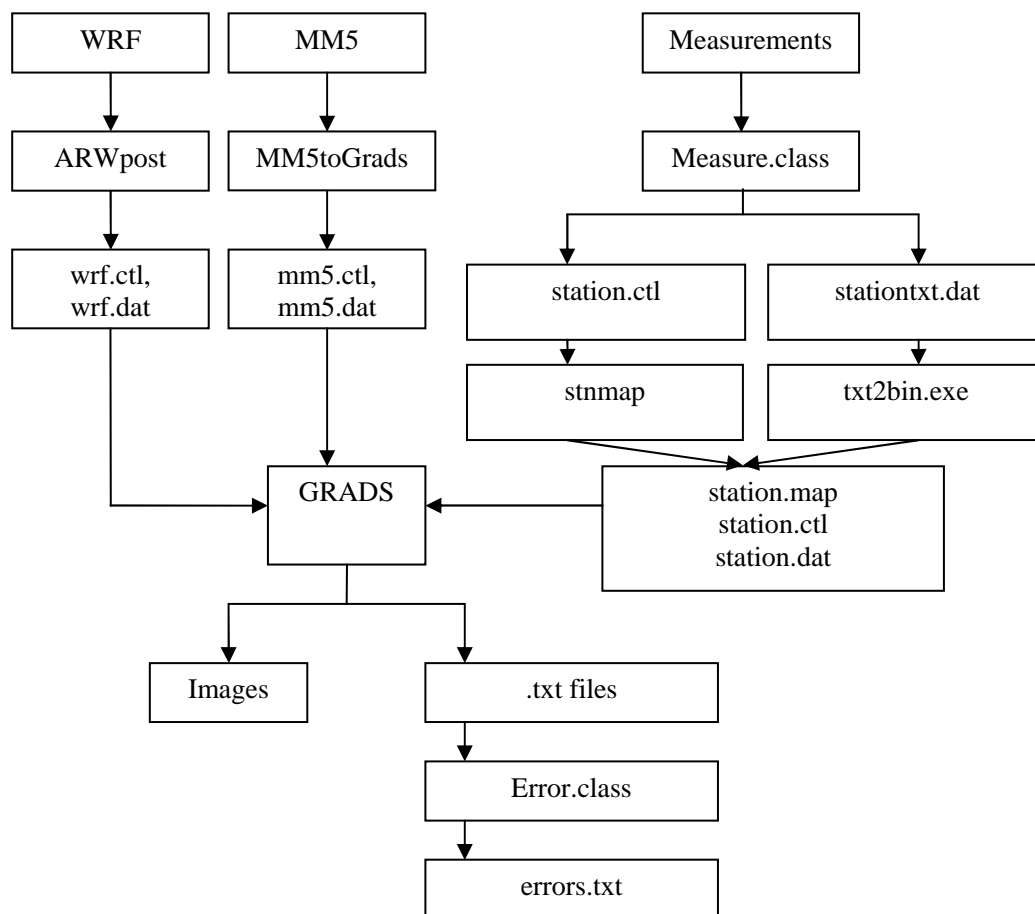


Рис. 1. Схема подсистемы визуализации и обработки данных численного прогноза погоды и измерений

2.3. Подсистема визуализации и обработки результатов

Разработана программная подсистема, позволяющая визуализировать и сравнивать данные измерений и результаты работы моделей WRF-Украина и MM5-Украина. На вход системы подаются данные измерений и выходные файлы моделей WRF-Украина и MM5-Украина. На выходе генерируются графики с результатами прогнозов и измерений, а также текстовый файл с погрешностями расчетов моделей MM5 и WRF. Подсистема позволяет также автоматически строить пространственные (двумерные) распределения метеорологических элементов по результатам расчетов и измерений. Возможны также построения продольных сечений метеорологических элементов. Работа проводилась в ОС Suse Linux 10.1. Интегральные осадки за время от начала прогноза, рассчитываемые моделями WRF и MM5, а также измеренные, для удобства сравнения преобразуются в скорости выпадений (мм/ч) и интерполируются по времени. Программа txt2bin создает бинарный файл с данными измерений в соответствии с форматом GRADS и данными, записанными в station.ctl. GRADS scripts – читают входные .ctl, .dat, и .mar файлы и создают графики зависимости переменных от времени и текстовые файлы со значениями переменных. Объект класса Error – читает текстовые файлы, вычисляет погрешности и записывает их в файл errors.txt. Для разработки системы были использованы средства свободно распространяемой программы GRADS (скрипты для построения графиков и интерполяции), а также Java SDK, C. На рис. 1 представлена схема работы подсистемы визуализации и обработки результатов. Объект класса Measure обрабатывает файл с измерениями, записывает результат в выходной файл stationtxt.dat и создает файл station.ctl, в котором находится описание содержимого файла station.dat.

2.4. Подсистема постобработки результатов нейросетью

Постобработка архива прогнозов и измерений является перспективным средством уточнения дальнейших прогнозов [7]. В настоящей работе разработана подсистема постобработки результатов для уточнения прогнозов температуры и осадков по пункту с использованием нейронной сети. Подсистема реализована в среде MATLAB 7.0. Используется нейросеть прямого распространения с двумя скрытыми слоями (15+1 нейрон в каждом из слоев). У первого функция активации $\tan sig(x) = 2/(1 + e^{-2x}) - 1$, у второго $purelin(x) = x$. На вход подаются данные прогноза системы MM5-Украина на 48 часов, при этом на выходе сети получается вектор, состоящий из прогноза температуры (или 6-часовых сумм осадков) на 48 часов, для выбранной станции. При обучении выход формировался из данных измерений.

Опишем структуру входной матрицы P .

$$\begin{aligned} P &= [V_1, V_2, V_3, \dots, V_N], \\ V_i &= [mm, dd, hh, nh, M_1, M_2, \dots, M_K], \\ M_j &= [landuse, tc, dt, rh, grt, u, v, rain], \end{aligned} \quad (1)$$

где N – кол-во моментов времени, для которых нужен прогноз, V_i – входной вектор для своего момента времени, mm, dd, hh, nh – месяц, день месяца, час дня от 0 до 23, час от начала

прогноза соответственно, M_i – часть входного вектора, которая соответствует данным модели для одного узла вычислительной сетки, $landuse, tc, dt, rh, grt, u, v, rain$ – землепользование, температура на высоте 2 м, точка росы, относительная влажность воздуха, температура поверхности земли, x, y – компоненты скорости, накопленные осадки.

Таким образом, предполагается существование функциональной зависимости между прогнозируемыми значениями в четырех ближайших узлах и истинными. Эта зависимость может быть более сложной, чем просто линейная зависимость, соответствующая линейной интерполяции вследствие подсеточных процессов, возникающих из-за влияния на значения метеорологических элементов в точках локальных особенностей подстилающей поверхности. Аппроксимация этой зависимости с помощью нейронной сети является целью обучения. Процедура обучения 'trainlm' – обратное распространение ошибки, где минимизация квадратичной функции отклонения от целевого результата производится с помощью известного алгоритма минимизации Левенберга-Марквардта.

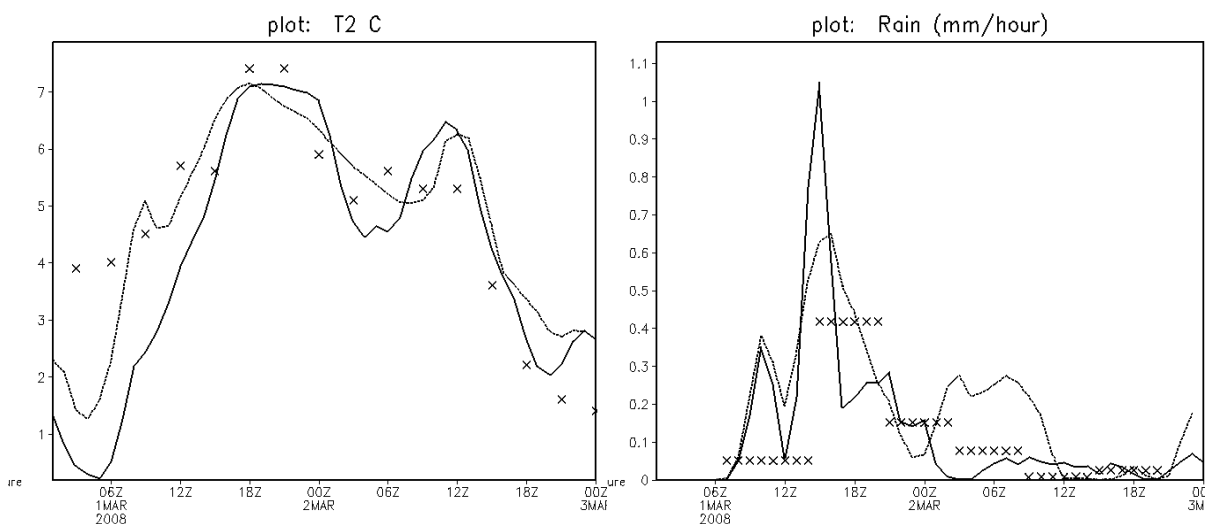


Рис. 2. Зависимость от времени интенсивности осадков (мм/ч, справа) и приземной температуры (°C, слева) в Киеве по результатам прогнозов WRF-Украина, MM5-Украина и измерений от 1 Марта 2008 г. 00 ч. Черная сплошная линия – WRF, пунктир – MM5, точки – измерения

3. Результаты расчетов

Для демонстрации возможностей системы WRF-Украина и сравнения с MM5-Украина приведем примеры расчетов прогнозов WRF-Украина с датами начала расчетов 29 Января 2007 г., 00 ч., 1 Марта 2008 г., 00 ч. и 22 Апреля 2008 г. 00 ч. Прогнозы рассчитывались на 48 ч. Для сравнения прогнозов с данными измерений подсистемой визуализации и обработки результатов было обработано 107 наземных метеорологических станций в Украине. Данные моделей линейно интерполировались в точки расположения метеостанций, и для каждой станции строилось 3 графика, соответствующих прогнозу MM5-Украина, прогнозу WRF-Украина и результатам измерений. Например, на рис. 2 представлены рассчитанные и измеренные временные зависимости скорости выпадения осадков и температуры в Киеве. Аналогичные графики могут быть построены для произвольной точки, в которой расположена метеостанция. Примеры

рассчитанных среднеквадратических ошибок по всем станциям для различных метеорологических элементов и различных сроков прогноза приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, результаты WRF-Украина не обнаруживают определенного преимущества этой модели по сравнению с MM5-Украина. Конечно, полноценное сравнение двух моделей требует накопления более полного архива вычислений. Однако приведенные данные позволяют предположить, что улучшения результатов WRF-Украина по сравнению с MM5-Украина можно достичь лишь с использованием новых средств усвоения данных, таких как 3DVAR, которые не включались в полном объеме в поставку MM5.

Таблица 1. Примеры рассчитанных с помощью подсистемы визуализации и обработки результатов среднеквадратических ошибок прогнозов приземной температуры (С), абсолютной величины скорости ветра (м/с), интенсивности осадков (мм/ч) для различных сроков прогноза

| Суммарная дисперсия (WRF) | | Суммарная дисперсия (MM5) | |
|------------------------------------|-------|---------------------------|-------|
| Прогноз от 29 Января 2007 г. 00 ч. | | | |
| Скорость ветра (м/с) | 2,368 | Скорость ветра | 2,233 |
| Температура (К) | 2,382 | Температура | 2,884 |
| Интенсивность осадков (мм/ч) | 0,045 | Интенсивность осадков | 0,036 |
| Прогноз от 1 Марта 2008 г. 00 ч. | | | |
| Скорость ветра (м/с) | 3,376 | Скорость ветра | 3,273 |
| Температура (К) | 1,829 | Температура | 1,797 |
| Интенсивность осадков (мм/ч) | 0,373 | Интенсивность осадков | 0,345 |
| Прогноз от 22 Апреля 2008 г. 00ч. | | | |
| Скорость ветра (м/с) | 2,574 | Скорость ветра | 2,603 |
| Температура (К) | 3,025 | Температура | 2,493 |
| Интенсивность осадков (мм/ч) | 0,819 | Интенсивность осадков | 0,644 |

Как пример использования системы постобработки результатов с помощью нейросети приведем результаты, полученные в результате обучения нейросети на данных архива MM5-Украина с 1 Января 2007 года по 30 Марта 2008 года. Обучение проводилось для каждой из приведенных станций в отдельности, при этом 20% обучающих векторов, выбранных случайным образом, использовались для проверки на этапе обучения и своевременного прекращения обучения. Тестирование сети производилось на данных за Апрель 2008 года. Вычислялись среднеквадратические (rms) и систематические (bias) отклонения прогнозируемой температуры за весь срок тестирования (30 дней, см. табл. 1) и для каждого 48-часового срока прогноза в отдельности. В табл. 2 представлены также результаты обработки данных линейной интерполяции расчетов MM5-Украина в точке измерения из четырех ближайших узлов. При линейной интерполяции учитывается разность высот станции и узлов сетки (температуры приводятся к одной высоте, считается, что вертикальный градиент температуры -6 К/км), отбрасываются узлы, находящиеся над водной поверхностью.

Предварительные результаты говорят о том, что нейронная сеть приводит к некоторому ухудшению по сравнению с линейной интерполяцией, когда качество линейной интерполяции

хорошее ($rms < 2K$), например, для Ровно, Николаева, Черкасс. Можно надеяться, что это ухудшение будет преодолено за счет обучения на более длительных сроках.

Таблица 2. Среднеквадратические и систематические ошибки прогнозируемой приземной температуры за Апрель 2008 для различных станций при использовании нейронной сети и линейной интерполяции

| Станция | Лин. инт. (rms, K) | Нейросеть (rms, K) | Лин. инт. (bias, K) | Нейросеть (bias, K) |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Киев | 2,12 | 1,9 | -0,56 | 0,1 |
| Рахов | 2,32 | 2,04 | -0,79 | -0,4 |
| Черкасс | 1,85 | 1,98 | 0,22 | 0,33 |
| Никополь | 1,87 | 1,90 | -0,01 | 0,24 |
| Алушта | 3,34 | 2,42 | 1,63 | 0,1 |
| Межгорье | 2,36 | 2,14 | 0,50 | 0,49 |
| Николаев | 1,90 | 2,2 | 0,12 | 0,66 |
| Одесса | 2,96 | 2,11 | 1,32 | 0,95 |
| Пожежевка | 2,35 | 1,75 | 0,70 | 0,58 |
| Ровно | 1,64 | 1,75 | -0,26 | -0,6 |
| Селятин | 3,05 | 2,40 | 1,37 | 0,68 |
| Турка | 2,56 | 2,02 | 0,36 | 0,43 |
| Донецк | 1,77 | 1,70 | -0,1 | 0,0004 |
| Запорожье | 1,84 | 2,11 | 0,09 | 0,45 |
| Коломыя | 1,97 | 2,13 | 0,19 | -0,31 |
| Севастополь | 2,32 | 1,83 | 0,42 | 0,39 |
| Ангарский перевал | 2,24 | 2,0 | -0,55 | 0,1 |
| Беловодск | 3,05 | 2,63 | 0,45 | -0,29 |
| Дебальцево | 1,82 | 1,97 | -0,11 | 0,14 |
| Джанкой | 1,7 | 1,89 | 0,25 | 0,6 |
| Изюм | 2,42 | 2,44 | -0,11 | 0,32 |
| Керчь | 1,58 | 1,65 | 0,27 | 0,25 |
| Кировоград | 1,66 | 1,62 | 0,17 | 0,51 |
| Луганск | 2,1 | 2,12 | -0,09 | 0,35 |
| Нижний Студеный | 2,17 | 1,96 | 0,16 | 0,19 |
| Плай | 2,39 | 1,78 | 0,87 | 0,5 |
| Славское | 2,48 | 2,29 | 0,54 | 0,25 |
| Сватово | 2,7 | 2,44 | -0,4 | -0,1 |
| Яремча | 2,40 | 1,88 | -1,29 | -0,18 |
| Евпатория | 1,88 | 1,7 | 0,057 | 0,5 |

Однако, когда качество линейной интерполяции плохое ($rms < 2K$), использование нейронной сети приводит к улучшению, которое особенно заметно в случае прибрежных станций (Алушта, Одесса, Севастополь) и в случае горных станций (Рахов, Межгорье, Селятин, Пожежевка, Плай и др.). На рис. 3 представлены примеры графиков оправданности 48-часовых прогнозов за Апрель 2008 г. для нескольких станций из приведенных в табл. 2. Заметное улучшение качества прогноза с нейронной сетью в случае прибрежных станций, по всей видимости, объясняется слишком грубой аппроксимацией береговой линии на 30 км сетки ММ5, в то время как вблизи береговой линии суточный ход температуры на станции чрезвычайно чувствителен к расстоянию от берега. Аналогично, для горных станций суточный ход температуры чувствителен не только к высоте станции над уровнем моря, которая явным образом учитывается в линейной интерполяции ММ5-Украина, но и к ориентации склонов, на которых расположены станции (Bellasio R., et al., 2005).

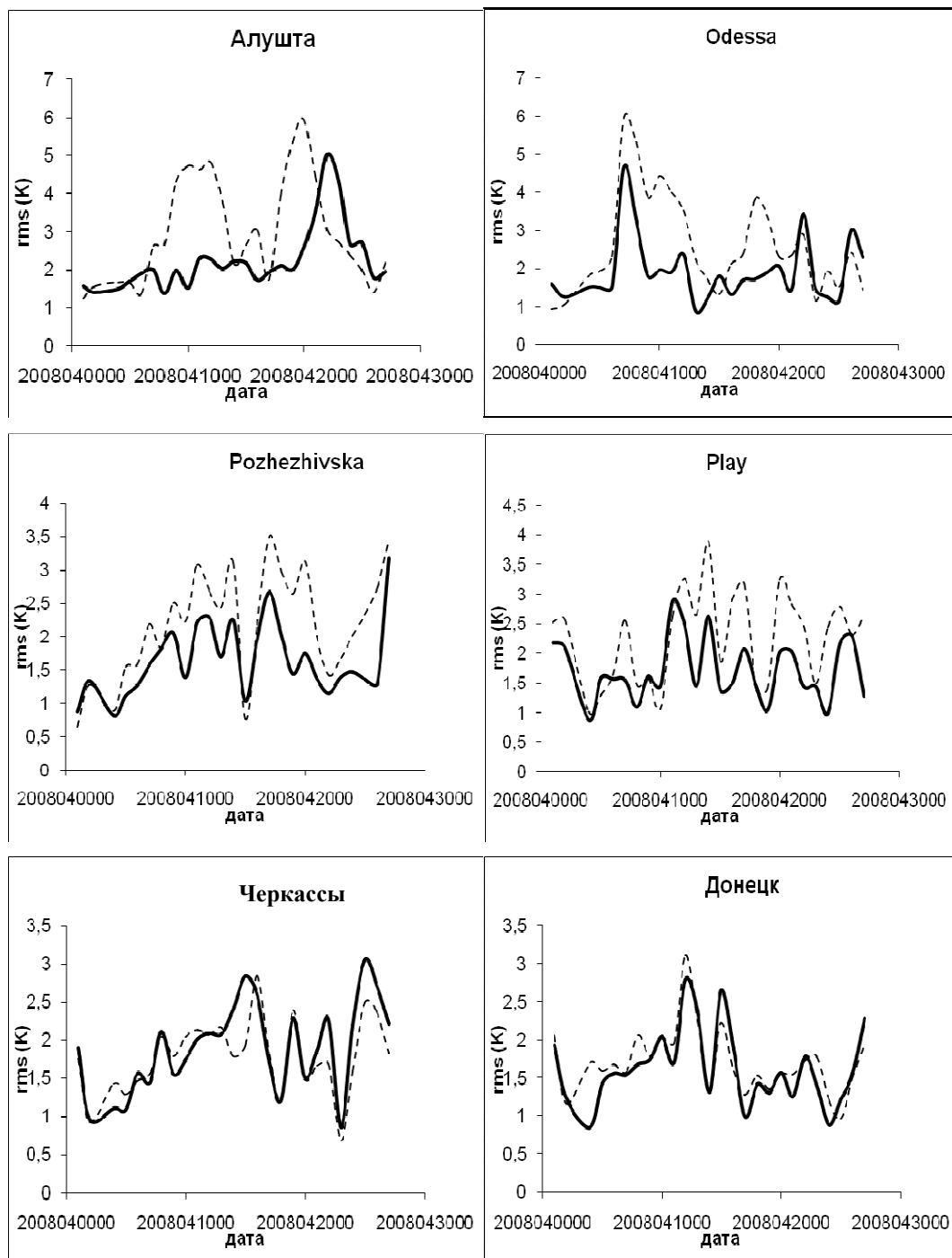


Рис. 3. Среднеквадратические ошибки 48-часовых прогнозов приземной температуры для каждого 48-часового срока прогноза за Апрель 2008 года с использованием линейной интерполяции (линия пунктиром) и с использованием нейронной сети (черная сплошная линия)

4. Выводы

Разработана система численного прогнозирования метеорологических полей в Украине WRF-Украина, в основе которой лежит современная численная метеорологическая модель WRF. Для расчета метеопрогнозов в WRF-Украина используются прогностические поля модели глобальной циркуляции атмосферы NCEP. Разработана подсистема визуализации и обработки результатов, позволяющая автоматизировать процесс верификации системы WRF-Украина, и сравнения

результатов расчетов этой системы с расчетами имеющегося в Украине аналога – системы численного прогноза погоды MM5-Украина [2], [3]. Для нескольких дат было проведено сравнение оправдываемости моделей MM5 и WRF, которое не показало существенного улучшения оправдываемости расчетов новой модели WRF. Однако подробное сравнение качества прогнозирования MM5 и WRF требует самостоятельного исследования.

Создана подсистема постобработки архива прогнозов и измерений на основе использования нейронной сети. Было проведено обучение нейронной сети на архивных данных измерений и прогнозов MM5-Украина с января 2007 по март 2008 года. Верификация нейронной сети на основе данных за апрель 2008 года показала, что для станций, в которых среднеквадратическая ошибка температуры велика ($> 2K$), использование нейронной сети позволяет снизить ошибку прогноза температуры за апрель на 0,1–0,65 К. При этом снижение ошибки температуры для отдельных 48-часовых сроков прогноза может быть намного более существенным и достигать 4 К.

БЛАГОДАРНОСТИ

Представленная работа была поддержана грантом НАН Украины для молодых ученых “Вдосконалення системи чисельного прогнозування погоди MM5-Україна”, (2007 – 2008 рр.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Grell G.A., Dudhia J., Stauffer D.R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note NCAR/TN-398+STR. – 1994. – 117 p.
2. Кушан А.А. та інш. Програмний комплекс оперативного чисельного прогнозування погоди MM5-Україна / А.А. Кушан, М.І. Железняк, В.С. Мадерич // Зб. праць IV Міжнародної конференції “Геоінформатика – теоретичні та прикладні аспекти”. – Київ, 2005. – 30 березня-31 червня. – С. 327.
3. Веб портал МЕТЕОПРОГ www.meteoprog.com.ua.
4. Flood forecasting for the Ukrainian Part of the Tisza basin: linking with the Numerical weather forecasts / S. Belov, G. Donchytz, S. Kivva et al. // Comparative testing of distributed and Lumped models. Geophysical Research Abstracts. – 2004. – Vol. 5, N 08106.
5. Кількісна оцінка випадіння радіонуклідів внаслідок потенційного руйнування Нового Безпечного Конфайнменту під впливом смерчу класу F3 / В.І. Богорад, М.І. Железняк, І.В. Ковалець та інш. // Ядерна та Радіаційна Безпека. – 2006. – № 1. – С. 28–33.
6. A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Technical Note NCAR/TN-468+STR. / W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia et al. // National Center for Atmospheric Research. – 2005. – 88 p.
7. Stensrud D.J. Parameterization Schemes: Keys to Understand Numerical Weather Prediction Models. – Cambridge: University Press, 2007. – 459 p.
8. Bellasio R. et al. Algorithms to account for topographic shading effects and surface temperature dependence on terrain elevation in diagnostic meteorological models // Boundary Layer Meteorology. – 2005. – N 114. – P. 595 – 614.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2008