

АДАПТАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ WRF ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ВЕТРА ВОКРУГ РИВНЕНСКОЙ АЭС

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Киев, Украина

**ОП „Ривненская АЭС”, Кузнецовск, Украина

Анотація. Мезомасштабна метеорологічна модель WRF, налаштована для забезпечення системи ядерного аварійного реагування РОДОС оперативною метеорологічною інформацією для умов Рівненської АЕС, успішно верифікована на підставі даних вимірювань метеостанції РАЕС. Помилки розрахунку напрямку вітру поблизу РАЕС носять локальний характер і знижуються при поліпшенні якості даних топографії та категорій землекористування. Спільне використання деталізованої топографії SRTM і категорій землекористування MODIS з 15-секундним дозволом дозволило знизити систематичну помилку напрямку вітру більш ніж на 20%.

Ключові слова: прогноз погоди, атмосферний прибережний шар, системи аварійного реагування.

Аннотация. Мезомасштабная метеорологическая модель WRF, настроенная для обеспечения системы ядерного аварийного реагирования РОДОС оперативной метеорологической информацией для условий Ривненской АЭС, успешно верифицирована на основании данных измерений метеостанции РАЭС. Ошибки расчета направления ветра вблизи РАЭС носят локальный характер и снижаются при улучшении качества данных топографии и категорий землепользования. Совместное использование детализированной топографии SRTM и категорий землепользования MODIS с 15-секундным разрешением позволило снизить систематическую ошибку направления ветра более чем на 20%.

Ключевые слова: прогноз погоды, атмосферный пограничный слой, системы аварийного реагирования.

Abstract. Mesoscale WRF meteorological model, adapted to provide a system of nuclear emergency response RODOS with operational meteorological information for the conditions of Rivne NPP was successfully verified on the basis of the measurement data of RNPP meteorostation. Miscalculations of wind direction near RNPP are local in nature and reduce with improving the quality of the topography data and land use categories. Joint use of detailed SRTM topography and MODIS land-use with 15 second resolution allowed reducing bias error in wind direction more than by 20%.

Keywords: weather forecasting, atmospheric boundary layer, emergency response systems.

1. Введение

Одной из важнейших задач, возникающих при прогнозировании радиоактивного загрязнения окружающей среды, является оценка текущего и будущего состояния атмосферы. Особенно большое значение имеет точность оценки состояния пограничного слоя атмосферы, толщина которого колеблется в пределах 50 м – 2 км. В качестве модели численного прогнозирования метеорологических полей совместно с системой РОДОС используется мезомасштабная метеорологическая модель WRF [1], использующая свободно распространяемые данные глобального прогноза в качестве входных данных [2].

В 2012–2013 гг. для условий Ривненской АЭС (РАЭС) адаптирована система ядерного аварийного реагирования Евросоюза РОДОС [3]. Система РОДОС обеспечивается данными оперативного метеопрогноза для территории РАЭС с помощью системы WRF-Украина, ранее разработанной в ИПММС [4, 5] на основе модели WRF.

Верификация модели WRF с привязкой к конкретному месту использования (окрестности РАЭС) является одной из первоочередных задач при внедрении системы РОДОС. Целью настоящей работы является оценка достоверности метеорологических полей WRF,

анализ обнаруженных ошибок прогнозирования, а также снижение количества ошибок за счет уточнения входных географических данных модели.

2. Предварительная верификация WRF-Украина для района расположения РАЭС

Для проведения предварительной верификации был выполнен ряд тестовых расчетов WRF за декабрь 2013-го года и проведено сравнение с измерениями метеорологической станции РАЭС, расположенной в городе Кузнецовске. В расчетах использовалась стандартная конфигурация WRF, которая по умолчанию используется системой РОДОС для обеспечения цепочки моделей атмосферного переноса прогностическими метеорологическими полями в области до 100 км от точки выброса [5]. В данной конфигурации используются три вложенных области с горизонтальным пространственным разрешением 45 км, 15 км и 5 км и количеством узлов по горизонтальным направлениям в соответствующих областях: 45x45, 25x25, 49x49. Для задания начальных и граничных условий в оперативных расчетах WRF использовались данные глобальной модели прогноза погоды GFS Национального центра прогнозирования окружающей среды США (NCEP), представленные на сетке с пространственным разрешением 1 град. При проведении сравнений использовался непрерывный ряд 10-минутных средних значений соответствующих измерений. В табл. 1 представлен процент удовлетворительной оправдываемости для таких параметров, как ΔWS (разность между рассчитанной и измеренной скоростью ветра на высоте 10 м), ΔT (разность между рассчитанной и измеренной температурой воздуха на высоте 2 м), $\Delta WDir$ (разность между рассчитанным и измеренным направлением ветра на высоте 10 м), ΔR (разность между рассчитанной и измеренной интенсивностью осадков).

Следует отметить, что в данном случае скорость ветра на высоте 10 м вычислялась на основе данных WRF на первом расчетном слое, высотой z_1 , составляющей около 30 м по формуле

$$u(10) = \frac{u(z_1) \ln\left(\frac{10-d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1-d}{z_0}\right)}, \quad (1)$$

в которой параметр шероховатости z_0 и толщина вытеснения d подбирались на основе калибровки за период, длительностью около 2-х недель, предшествующий проведению сравнений, представленных в табл. 1. В отличие от данного подхода, в дальнейших результатах, представленных ниже, использовались значения 10-метровой скорости, непосредственно вычисленные WRF.

Таблица 1. Оправдываемость прогноза погоды по данным метеостанции РАЭС за период 2013.11.22–2014.01.14, %

Параметр	N, %	Параметр	N, %	Параметр	N, %	Параметр	N, %
$\Delta WS < 1 \text{ м/с}$	76,2	$\Delta T < 2^\circ\text{C}$	66,2	$\Delta WDir < 22^\circ$	69,2	$\Delta R < 0,2 \text{ мм/ч}$	93
$\Delta WS < 2 \text{ м/с}$	96,8	$\Delta T < 3^\circ\text{C}$	86	$\Delta WDir < 45^\circ$	93,5	$\Delta R > 0,5 \text{ мм/ч}$	3,2

Как видно из данных, представленных в табл. 1, для большинства метеоэлементов согласие прогнозных и измеренных значений удовлетворительно. В то же время оправдываемость прогноза направления ветра оставляет желать лучшего. Как будет показано ниже (табл. 2), для направления ветра были выявлены значительные систематические отклонения, связанные с влиянием подсеточных особенностей подстилающей поверхности.

3. Анализ причин систематической ошибки направления ветра

Для выяснения причин расчетных ошибок направления ветра было проведено сравнение результатов расчетов с измерениями метеостанций РАЭС и Ровенского аэропорта, расположенными в расчетной области WRF (табл. 2). В табл. 2 представлены также результаты сравнения с измерениями данных финального анализа NCEP. При этом вычислялись средняя систематическая (ME) и абсолютная (MAE) ошибки: $ME = \langle F_m - F_o \rangle$, $MAE = \langle |F_m - F_o| \rangle$.

Таблица 2. Средняя и средняя абсолютная ошибка направления ветра по данным WRF и финального анализа NCEP для метеостанций, расположенных в Кузнецовске и в Ровенском аэропорту (2013.12.01–2013.01.01)

Метеостанция	WRF		Финальный анализ	
	ME, град.	MAE, град.	ME, град.	MAE, град.
РАЭС	11,14	18,83	11,53	20,76
UKLR (Ровенский аэропорт)	0,90	12,04	5,67	13,23

Оказалось, что для метеостанции Ровенского аэропорта систематическая ошибка направления ветра значительно ниже, чем для метеостанции РАЭС. Это указывает, что имеет место локальный эффект искажения метеорологических полей, связанный с расположением метеостанции РАЭС на окраине Кузнецовска. Отметим также наличие соизмеримой систематической ошибки направления ветра в данных финального анализа NCEP, одноградусное разрешение которых заведомо не позволяет выявлять локальные эффекты, связанные с топографией, городской застройкой и подобными факторами.



Рис. 1. Роза ветров для метеостанций РАЭС (слева) и Ровенского аэропорта (справа) за 2006-й год, построенная по результатам расчета WRF (толстая красная линия) и по результатам измерений (черная тонкая линия)

Для дополнительного подтверждения высказанной гипотезы о локальном влиянии городской застройки на направление ветра вблизи РАЭС были построены диаграммы розы ветров на основе данных измерений и соответствующих расчетов WRF за 2006 г. Как видно из рис. 1, роза ветров, построенная на основе измерений метеостанции РАЭС, имеет ярко выраженные особенности, связанные с расположением близлежащих строений. Роза ветров, построенная по результатам расчета WRF, таких особенностей не имеет, что, в первую очередь, связано с шагом расчетной сетки WRF, не позволяющим достаточно детально учитывать особенности городской застройки, а также с качеством входных данных топографии и категорий землепользования, используемых в представленных расчетах WRF (см. ниже).

Роза ветров, построенная по результатам WRF для Ровенского аэропорта, не содержит подобных искажений по сравнению с розой ветров, построенной по данным соответствующих измерений. Это обстоятельство также позволяет утверждать, что систематическая ошибка рассчитанного направления ветра для РАЭС носит именно локальный характер, связанный с наличием городской застройки в непосредственной близости к месту измерений. В то же время эта ошибка не должна существенно сказываться при прогнозировании распространения загрязнений на расстояния от источника, большие характерных размеров городской зоны, вызывающих эти отклонения ($> 5-10$ км).

4. Улучшение качества расчета путем уточнения характеристик подстилающей поверхности

Ошибку расчета направления ветра вблизи РАЭС можно уменьшить за счет уменьшения шага дискретизации расчетной сетки до масштабов, много меньших по сравнению с размером особенностей топографии, вызывающих описанные выше отклонения направления ветра [6]. Поскольку характерный размер г. Кузнецовск ≈ 5 км, размер сетки WRF, который позволил бы описать локальные особенности направления ветра, должен быть не более ≈ 500 м. С учетом того, что один прогностический расчет на 96 ч на сетке с 5-км разрешением выполняется около 30 мин на двух 4-ядерных процессорах Intel(R) Xeon(R) CPU E5405 2.00Ghz, один прогностический расчет на сетке с разрешением 500 м длился бы 20 суток (время расчета зависит от горизонтального разрешения h как $1/h^3$). Таким образом, в рамках оперативного обеспечения системы РОДОС данными численного прогноза погоды технически невозможно реализовать расчеты WRF на сетке с разрешением, позволяющим точно описать локальные особенности поля ветра вблизи Ривненской АЭС. Одновременно, как будет показано ниже, ошибку направления ветра можно несколько уменьшить путем улучшения качества данных подстилающей поверхности.

Модель WRF поставляется совместно с архивом, содержащим стандартный набор данных о подстилающей поверхности Американской геологической службы USGS. Максимально возможное разрешение для топографических данных USGS в этом архиве – 30 секунд. В данное время свободно доступен набор радарных топографических данных (SRTM) с высоким разрешением 3 секунды [7]. Использование данных SRTM вместо стандартного набора топографических высот позволяет улучшить качество прогноза WRF. В данной работе была сформирована карта высот топографии на сетке WRF на основе среднеарифметического значения высот ячеек SRTM, попадающих в соответствующую ячейку сетки WRF. Подстановка уточненных топографических данных позволила снизить систематическую ошибку для направления ветра (табл. 3).

Наряду с топографией, одной из важнейших характеристик, влияющих на метеорологическое моделирование, являются категории землепользования (Land use). Препроцессор WPS модели WRF по умолчанию настроен на использование категорий землепользования USGS с максимальным разрешением 30 секунд. В то же время на сайте WRF доступен новый набор категорий землепользования, определенных на основе спутниковых данных MODIS с 15-секундным разрешением, позволяющий учесть наличие небольшого города, такого как Кузнецовск, и окрестных лесов.

К сожалению, WRF позволяет использовать категории землепользования MODIS исключительно совместно с одной из параметризаций подстилающей поверхности, что существенно ограничивает возможности пользователя в выборе оптимального набора физических параметризаций. Для исправления этого недостатка была написана программа, которая преобразует категории землепользования MODIS в соответствующие категории USGS. Произведенное таким образом уточнение категорий землепользования также привело к снижению систематической ошибки направления ветра (табл. 3).

На рис. 2 приведены значения измеренных и рассчитанных направлений ветра для декабря 2013-го года при стандартном наборе географических данных USGS и совместном использовании новой топографии и новых категорий землепользования. Из рисунка видно существенное улучшение качества прогнозирования направления ветра при уточненных данных подстилающей поверхности.

Таблица 3. Средняя и средняя абсолютная ошибки направления ветра (градусы), рассчитанные за период 2013.12.01–2013.01.01 с различными вариантами характеристик подстилающей поверхности: а) «стандартные» данные USGS; б) уточненная топография на основе данных SRTM и категории землепользования USGS; в) уточненная топография на основе данных SRTM и уточненные категории землепользования на основе данных MODIS

Метеостанция	Ошибка	Топография и категории землепользования USGS	Топография SRTM, категории землепользования USGS	Топография SRTM, категории землепользования MODIS
Метеостанция РАЭС	ME	11,14	9,00	8,70
	MAE	18,83	18,18	17,21
Ровенский аэропорт	ME	0,90	0,99	-0,14
	MAE	12,04	12,02	12,08

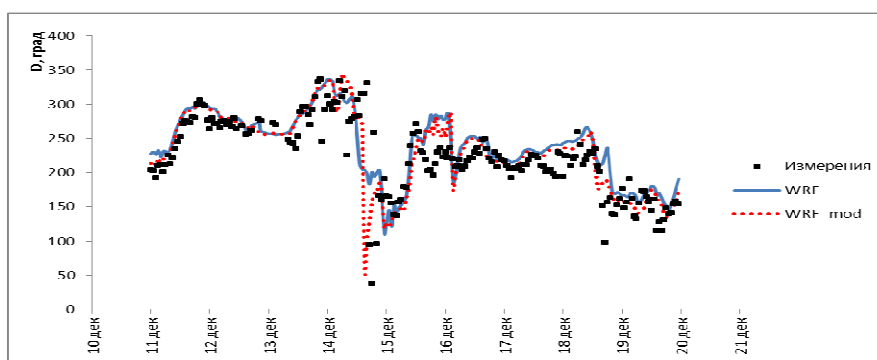


Рис. 2. Измеренное на метеостанции РАЭС и рассчитанное WRF со стандартной и уточненной подстилающей поверхностью направление ветра за период 2013.12.10–2013.12.20

4. Результаты расчетов характеристик ветра в пограничном слое атмосферы

Полная верификация метеорологической модели требует высотных данных измерений. Сеть таких измерений в Украине чрезвычайно редка и состоит из 2-3 радиозондов, запускаемых каждые 12 ч. При этом для задач прогнозирования распространения атмосферных загрязнений необходимо сравнить результаты прогнозирования полей ветра с высотными данными в нижнем 1000 м слое атмосферы. Для решения таких задач в мире используются акустические профилометры, например, содары [8]. На территории РАЭС функционирует содар производства фирмы Remtech, с данными которого проводились сравнения в настоящей работе.

В табл. 4, 5 представлены статистические характеристики сравнения рассчитанных и измеренных скорости и направления ветра на высоте 100 м. В дополнение к уже использованным характеристикам ошибок ME и MAE в табл. 4 представлены также относительные систематическая и абсолютная ошибки (выраженные в %): $RB = 100 \cdot \langle F_m - F_o \rangle / \langle F_o \rangle$, $MAPE = 100 \cdot \langle |F_m - F_o| \rangle / \langle F_o \rangle$. Расчеты проводились за 2006 г, поскольку в этом году, по сравнению с последующими годами, содар функционировал наибольшее количество дней (239). Отметим, что содар ночью не работал, поэтому представленные данные относятся к

измерениям, проводившимся в дневное время. В расчетах использовались уточненные данные подстилающей поверхности, описанные выше.

Как видно из результатов, представленных в табл. 4, модель завышает скорость приземного ветра. Относительная систематическая ошибка скорости ветра на высоте 100 м меняет знак по сравнению с ошибкой приземного ветра, а по абсолютной величине в 3 раза меньше ее. Как было отмечено ранее, систематическая ошибка приземного ветра успешно устраняется использованием соотношения (1). Значения абсолютной относительной ошибки скорости ветра соизмеримы для приземного и 100 м ветра.

Согласно табл. 5, среднее значение поворота ветра с высотой по результатам расчетов WRF значительно меньше, чем по результатам измерений. Это обстоятельство может быть связано с недостаточным вертикальным разрешением сетки WRF (в нижнем 100 м слое находятся всего 2 расчетных уровня WRF). Отметим также, что среднее абсолютное значение отклонения направления 100 м ветра от приземного значения согласно измерениям в 2,5 раза превышает систематическое отклонение. Это свидетельствует о том, что ветер часто поворачивает в антициклоническом направлении, хотя, согласно теории горизонтально однородного пограничного слоя, в северном полушарии ветер должен поворачиваться в циклоническом направлении.

Таким образом, горизонтальные неоднородности пограничного слоя и свободной атмосферы решающим образом сказываются на повороте направления ветра даже в нижнем 100 м слое атмосферы, для которого существует множество полуэмпирических параметризаций циклонического поворота ветра, в том числе используемых и в системе РО-ДОС [9, 10]. По сравнению с измерениями, WRF чаще предсказывает поворот ветра в циклоническом направлении, что, возможно, связано со сглаживанием горизонтальных градиентов метеорологических элементов в начальных и граничных условиях WRF, а также с ошибками измерений, которые могут быть существенны в случае содара [8].

На рис. 3 представлены примеры измеренных и рассчитанных вертикальных профилей скорости и направления ветра, которые свидетельствуют о том, что WRF обладает большим потенциалом для расчета особенностей вертикального распределения характеристик ветра в пограничном слое при условиях достаточного вертикального и горизонтального разрешения и хорошего качества входных данных.

Таблица 4. Статистические характеристики ошибок скорости ветра, рассчитанных WRF, по сравнению с данными измерений содара на высоте 100 м, и наземной станции за 2006 г.

Описание	Статистические характеристики			
	ME, м/с	MAE, м/с	RB, %	MAPE, %
100 метров (содар – WRF)	-1,03	2,28	-15,4	34,2
10 метров (наземная станция – WRF)	1,36	1,58	43,0	54,5

Таблица 5. Статистические характеристики ошибок направления ветра WRF на высоте 100 м (измерения содара) и на высоте 10 м (измерения наземной станции), а также характеристики поворота ветра с высотой в модели WRF и по результатам измерений за 2006 г.

Описание	ME, град.	MAE, град.
100 м (содар – WRF)	-4,17	38,19
10 м (наземная станция - WRF)	4,78	28,08
WRF (10 м – 100 м)	3,81	6,82
Содар (10 м – 100 м)	12,76	33,37

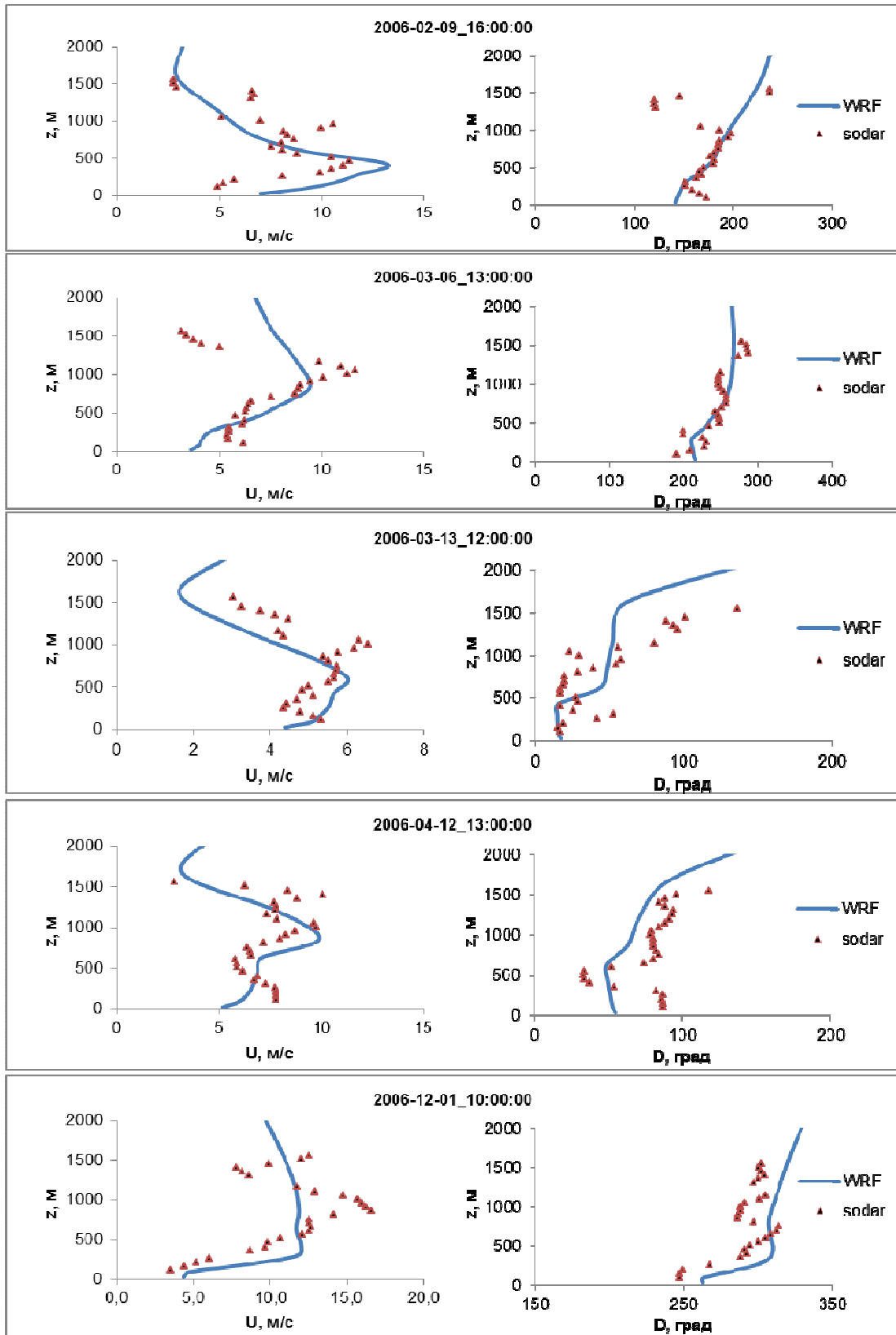


Рис. 3. Примеры вертикальных профилей скорости и направления ветра для РАЭС, построенных по измерениям содара и по результатам расчетов WRF

5. Выводы

В работе проведена верификация мезомасштабной метеорологической модели WRF, настроенной на обеспечение системы ядерного аварийного реагирования РОДОС оперативной метеорологической информацией для условий Ривненской АЭС. Результаты верификации на основе данных метеостанций РАЭС и Ровенского аэропорта показывают, что WRF применима для получения качественных приземных метеорологических полей, позволяющих оценивать распространение загрязнений. Показано, что существующие ошибки в прогнозировании направления ветра вблизи РАЭС носят локальный характер и не должны существенно сказываться при прогнозировании распространения загрязнений на значительные расстояния от источника (> 10 км). В то же время для детального учета влияния городской застройки на локальные особенности поля ветра вблизи РАЭС требуется проводить расчеты на сетке с пространственным разрешением около 500 м, что в настоящее время технически невозможно в рамках оперативного обеспечения системы РОДОС данными численного прогноза погоды. Показано, что ошибки расчета направления ветра вблизи РАЭС снижаются также при улучшении качества подстилающей поверхности. Совместное использование детализированной топографии SRTM и категорий землепользования MODIS с 15-секундным разрешением позволило снизить систематическую ошибку направления ветра более чем на 20%.

Впервые получены статистические характеристики сравнений результатов прогноза ветра на высотах 100-1000 м с измерениями над территорией Украины, которые показали, что WRF способна воспроизвести основные свойства атмосферного приземного и пограничного слоев при условиях достаточного вертикального и горизонтального разрешения и хорошего качества входных данных. Средняя абсолютная ошибка прогнозирования скорости ветра на высоте 100 м составляет 2,3 м/с. Помимо применения в системах поддержки решений в области экологической безопасности данный результат может быть использован для планирования деятельности по развитию и информационной поддержке ветроэнергетики в Украине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A description of the advanced research WRF version 3 [Электронный ресурс] / W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia [et al.] // NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. – USA, Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008. – 125 p. – Режим доступа: <http://wrf-model.org/>.
2. Rutledge G. NOMADS – a climate and weather model archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration / G. Rutledge, J. Alpert, W. Ebusizaki // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2006. – Vol. 87. – 341 p.
3. RODOS re-engineering: aims and implementation details / I. Ievdin, D. Trybushny, M. Zheleznyak [et al.] // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, N 5. – 190 p.
4. Система численного прогноза погоды WRF-Украина / А.М. Гузий, И.В. Ковалец, А.А. Кушан [и др.] // Математичні машини і системи. – 2008. – № 4. – С. 123 – 131.
5. Software tools and related documentation for the automatic downloading of global meteorological data and operation of the WRF meteorological modelling system / S. Didkivska, I. Ievdin, I. Kovalets [et al.] // Report of the EU FP7 NERIS-TP Project NERIS-TP(WP4)-(13)-02. – doi: 10.13140/2.1.3572.8002.
6. Pielke R.A. Mesoscale meteorological modelling / R.A. Pielke. – USA, San Diego: Academic Press, 2004. – 676 p.
7. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639 / E. Rodriguez, C.S. Morris, J.E. Belz [et al.] // Jet Propulsion Laboratory. – Pasadena, California, 2005. – 143 p.
8. Emeis S. Surface-based remote sensing of the atmospheric boundary layer / Emeis S. – Dordrecht: Springer, 2009. – 174 p.
9. Introduction of data assimilation procedures in the meteorological pre-processor of atmospheric dispersion models used in emergency response systems / I. Kovalets, S. Andronopolous, J.G. Bartzis [et al.] // Atmospheric Environment. – 2004. – Vol. 38, N 3. – P. 457 – 467.

10. Andronopoulos S. Model description of the RODOS meteorological pre-processor [Електронний ресурс] / S. Andronopoulos, J. Bartzis // Report RODOS (RA2)-TN(09)-02. – Greece, Athens: National Centre for Scientific Research, 2009. – 29 p. – Режим доступу: www.rodos.fzk.de.

Стаття надійшла до редакції 22.01.2015