

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ WRF-ARW В ГИДРОМЕТЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

П.О. Лапно, В.Н. Шакур, М. Прохареня

*Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю
радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды,
Республика Беларусь, г. Минск*

Использование численных моделей в прогнозе погоды способствует усовершенствованию процесса оперативного прогнозирования. Увеличение временного и пространственного разрешений моделей помогает синоптику не только проследить эволюцию синоптических систем, но и идентифицировать развитие локальных атмосферных процессов. Конвективные процессы в мезомасштабных численных моделях представлены через схемы параметризации, т. к. данные процессы имеют разрешение меньше шага сетки глобальных моделей. Конвективные схемы параметризации представляют термические и динамические процессы, происходящие в подсеточных масштабах.

Мезомасштабная модель WRF-ARW является полностью сжимаемой, Эйлеровской и негидростатической моделью, которая имеет постоянно расширяющееся сообщество пользователей. Также тот факт, что модель WRF находится в открытом доступе, привлекает большое число пользователей.

Основной целью исследования является проверка прогнозов конвективных событий, сделанных с помощью модели WRF-ARW в теплый сезон. Точный прогноз опасных конвективных явлений, таких как грозы, град и шквалы, очень важен для Беларуси, особенно в теплый период, поэтому исследование было сосредоточено на оценке чувствительности работы модели с различными схемами

параметризации конвекции для определения наиболее точной конфигурации.

Использование модели WRF-ARW в Гидромете Беларуси

В 2014 г. Гидрометом начато использование модели WRF-ARW в составлении оперативного прогноза для территории Беларуси. Для моделирования мезомасштабных процессов используется модель WRF-ARW версии 3.7. Моделирование реализовано 3 раза в день за исходные сроки 00, 06 и 12 ч ВСВ. Для расчета прогнозов высокого разрешения используется суперкомпьютер Hewlett-Packard, HPBladeSystemC7000, который имеет вычислительную мощность около 5 TFlops.

Расчет осуществляется в двух пространственных разрешениях: 15 и 3 км с использованием принципа вложенной области. Каждый расчет составляет на 48 часов.

Для реализации системы оперативного прогноза мезомасштабных моделей была разработана технологическая схема [1]:

1. В качестве начальных данных для модели WRF-ARW используются данные глобальной модели GFS с шагом $0,25^\circ$.

2. Далее с помощью системы подготовки данных WPS происходит инициализация начальных данных и определение статических географических данных. На этом этапе используются подготовленные данные об абсолютных высотах с разрешением 3".

3. Третьим этапом является расчет модели WRF. Каждый раз осуществляется расчёт 8 случаев с различными схемами параметризации конвекции. Такой ансамбль включает расчеты для доменов с разным разрешением (15 и 3 км). Характеристика доменов приведена в табл. 1.

4. После расчета выходные данные визуализируются (карты, графики, метеограммы). Ежедневно синоптикам предоставляются карты приземной температуры воздуха, карты высот и температуры изобарической поверхности, скорости ветра и др.

5. Последним шагом каждого моделирования является проверка выходных результатов.

Таблица 1

Характеристики доменов для счета модели WRF-ARW

	Внешний домен	Вложенный домен
Шаг горизонтальной сетки	15 км	3 км
Разрешения (X,Y,Z)	250 / 240/ 27	586 / 586 / 27
Исходные данные	GFS 0,25°	GFS 0,25°
Граничные условия	GFS 0,25°	Прогноз внешнего домена WRF

Система верификации модели WRF-ARW

Для упрощения ежедневной оценки результатов прогнозов была разработана автоматизированная система верификации результатов, которая включает оценку полей метеорологических величин, а также оценку по данным наземных наблюдений.

Пакет MET (Model Evaluation Tools) был выбран для ежедневной верификации результатов моделирования [2]. Данный пакет предоставляет возможность верификации несколькими подходами:

- стандартная верификация результатов моделирования на сетке с координатной привязкой наблюдений;
- пространственный метод верификации, сравнивающий данные модели с наземными наблюдениями, объектно-ориентированный метод и другие.

Для комплексного анализа средних статистических показателей оценки прогноза за определенные временные периоды используется специально разработанное приложение.

В качестве переменных для верификации были выбраны следующие показатели: геопотенциальные высоты изобарических поверхностей 500, 700 и 850 гПа, температуры на этих же уровнях, приземное давление и температура на 2 м для проверки работы модели на сетке.

Оценка на основе наземных наблюдений производится для температуры на 2 м и количества осадков. Для данной оценки использованы наземные наблюдения в коде SYNOP.

Оценка производится для доменов 15 и 3 км. Рассчитываются стандартные статистические величины:

– средняя ошибка (*ME*) – разница между средним прогностическим и средним фактическим значениями. Вычисляется по формуле

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\Pi i} - X_{\Phi i}) = \bar{X}_{\Pi} - \bar{X}_{\Phi},$$

где *N* – количество пар значений наблюдение – прогноз (*i* = 1, 2, 3, ..., *N*); *X_{Φi}* и *X_{Πi}* – фактическое и прогностическое значения в *i*-ой паре соответственно; \bar{X}_{Φ} и \bar{X}_{Π} – среднее фактическое и прогностическое значения соответственно;

– средняя абсолютная ошибка (*MAE*) – среднее значение абсолютных значений отдельных ошибок прогнозов, вычисляемое по формуле

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{\Pi i} - X_{\Phi i}|;$$

– корень среднеквадратической ошибки (*RMSE*) – один из наиболее широко используемых показателей:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\Pi i} - X_{\Phi i})^2}.$$

Для статистической оценки вероятностных прогнозов осадков используется таблица сопряженности (табл. 2). В данной таблице представлены прогнозы и наблюдения. После нахождения соответствий вычисляется количество точных прогнозов обнаружения события, количество выявленных отсутствий события и количество ложных обнаружений.

Для верификации прогноза осадков вычислялись следующие количественные показатели:

POD – предупрежденность факта наличия события, вероятность обнаружения, вычисляется из таблицы сопряженности по формуле:

$$POD = \frac{n_{11}}{n_{01}} ;$$

– *PODN* – предупрежденность факта отсутствия события:

$$PODN = \frac{n_{22}}{n_{02}} ;$$

– *FAR* – коэффициент ложных тревог – отношение неоправданвшегося прогноза наличия события к числу случаев прогноза наличия события:

$$FAR = \frac{n_{12}}{n_{11} + n_{12}} = \frac{n_{12}}{n_{10}} ;$$

– *CSI* – индекс критический успешности также дает оценку угрозы:

$$TS = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{12} + n_{21}} .$$

Таблица 2

Таблица сопряженности для событий

Прогноз	Наблюдалось		Сумма
	событие	без события	
Событие	n_{11}	n_{12}	n_{10}
Без события	n_{21}	n_{22}	n_{20}
Сумма	n_{01}	n_{02}	n_{00}

Исследование конвективных схем

В течение двух лет было протестировано более 20 вариаций различных параметризаций физических процессов: параметризации пограничного слоя, параметризации микрофизики и параметризации конвекции.

Важной целью данной работы являлась проверка результатов моделирования, полученных с использованием различных схем параметризации конвекции в реальных условиях, включая случаи

сильной конвекции (грозы), а также работы данных схем в условиях антициклона. Используемые для расчётов параметризации приведены в табл. 3.

Таблица 3

Таблица используемых параметризаций физических процессов

Исследуемые параметризации	Фиксированные параметризации
Конвекция: <ul style="list-style-type: none"> • Каина-Фритша (KF); • Грелл 3D; • Беттса-Миллера-Янича (BMJ); • Занг-МакФарлан (ZM). 	Поверхность: <ul style="list-style-type: none"> • NOAHLSM (включает 4 почвенных слоя)
Микрофизика: <ul style="list-style-type: none"> • WRF Одномоментная 6-классовая схема (WMS6) • Томпсона 	Пограничный слой: <ul style="list-style-type: none"> • схема Меллора-Ямада-Янича (MYJ)
	Поверхностные слои: <ul style="list-style-type: none"> • Eta
	Радиация: <ul style="list-style-type: none"> • RRTM (коротко- и длиноволновая)

Рассматриваемый в данном исследовании период – с 1 апреля по 1 августа 2015 года. Для верификации по наземным наблюдениям были выбраны 49 пунктов наблюдений.

В табл. 4 и 5 представлены результаты верификации по полю и для пунктов наблюдений.

Результаты верификации результатов моделирования с различными схемами параметризации конвекции были получены по результатам сравнения индексов и статистических показателей.

По результатам анализа статистических показателей были выявлены следующие особенности:

1. Прогнозы на нижних уровнях значительно более сложны. Самым успешным для прогнозирования температуры и высот

геопотенциальных поверхностей было сочетание схемы микрофизики Томпсона и Грелл 3D параметризации конвекции. Обе эти схемы широко используются для моделирования с высоким разрешением в теплый период года. Параметризация Томпсона позволяет смоделировать микрофизические процессы в атмосфере и включают лед, снег и крупу. Схема конвективных процессов Грелл 3D представляет собой ансамбль, который включает в себя 144 подсчетных члена.

Таблица 4

Значения ME ($RMSE$) для прогноза температуры, давления на уровне моря, геопотенциальных высот на 24 часа с исходным сроком 00 ч ВСВ, домен 15 км

Параметры	Уровень (гПа)	КФ (15 км)	ВМЖ (15 км)	Грелл 3D (15 км)	ZM (15 км)	КФ с уточненными данными (15 км)
Т (°C)	500	-0,1 (0,62)	-0,08 (0,6)	0,01 (0,63)	0 (0,63)	0,21 (0,7)
	700	0,04 (0,76)	0,37 (1,05)	0,32 (0,86)	0,27 (0,86)	0,68 (1,06)
	850	0,32 (0,89)	0,34 (1,4)	-0,15 (0,86)	0,06 (0,98)	0,51 (1,06)
	2 м	1,84 (1,97)	1,79 (2,9)	1,53 (2,72)	1,6 (2,77)	0,47 (1,97)
Z (м)	500	0,01 (0,86)	0,04 (1,23)	-0,04 (0,86)	0,04 (0,87)	0,36 (0,87)
	700	0 (0,83)	-0,09 (1,05)	-0,23 (0,88)	-0,11 (0,81)	-0,1 (0,78)
	850	-0,14 (0,91)	-0,36 (1,08)	-0,36 (0,99)	-0,27 (0,92)	-0,5 (1,04)
Давление на уровне моря (гПа)	Уровень моря	-0,46 (1,38)	-0,62 (1,77)	-0,33 (1,35)	-0,33 (1,37)	-1,11 (1,79)

Таблица 5

Значения *CSI*, *POD*, *PODN*, *FAR*, рассчитанные для прогноза интенсивности осадков более 0,05 мм/12 ч, на 24 часа по исходным данным 00 ч ВСВ

Параметры	KF (15 км)	BMJ (15 км)	Грелл 3D (15 км)	ZM (15 км)	KF с уточненными данными (15 км)
<i>CSI</i>	0,47	0,42	0,47	0,5	0,5
<i>POD</i> (%)	78	79	87	83	76
<i>PODN</i> (%)	82	79	75	80	85
<i>FAR</i>	46	53	50	44	40

2. Результаты верификации осадков показали отличную от температуры и давления информацию. Сочетание микрофизики Томпсона и конвективной параметризации Грелл 3D показали высокую вероятность обнаружения осадков. Но вариант параметризации конвекции Каина–Фритша дал лучший результат по вероятности выявления отсутствия осадков, а также коэффициента ложных тревог [4].

Исследование использования уточненных геоданных

Весной 2015 года начата работа по внедрению статических геоданных высокого разрешения в систему предварительной обработки WPS. На данный момент абсолютная высота местности с разрешением 3" усвоена для всей территории Беларуси, а также приграничных территорий. Для уточнения были использованы данные о топографии для территории Европы с разрешением 3" по данным SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), которые являются данными международного исследовательского проекта по созданию самой полной цифровой топографической базы высокого разрешения.

Результаты моделирования по данным с уточненным рельефом были проанализированы по созданной системе верификации. Для верификации результатов моделирования с усвоенными данными о топографии использованы данные вложенного домена 3 км. Полученные результаты представлены в табл. 6, 7.

По результатам оценки моделирования случаев с ассимилированными уточненными данными и без них достаточно сложно сделать однозначный вывод. При анализе результатов прогнозов температуры и высоты геопотенциальной поверхности проследить однозначное улучшение в прогнозах с уточненными данными сложно. Но при оценке результатов прогноза осадков возможно сделать вывод.

Конфигурация модели WRF-ARW с уточненными данными об абсолютных высотах рельефа имеет более высокий индекс критического успеха, а также более высокую вероятность обнаружения события, кроме того, данный вариант показал более низкий показатель ложных тревог [4].

Таблица 6

Значения статистических показателей ME ($RMSE$) прогноза температуры, давления на уровне моря, геопотенциальных высот на 24 часа за исходный срок 00 ч ВСВ, для домена 3 км с уточненными данными рельефа и без уточнения

Параметры	Уровни (гПа)	КФ (3 км)	КФ с уточненными данными (3 км)
T (°C)	500	0,15 (0,64)	0,15 (0,62)
	700	0,36 (0,81)	0,41 (0,83)
	850	0,18 (0,89)	0,2 (0,91)
	2 м	0,23 (2,11)	0,26 (2,09)
Z (м)	500	0,27 (0,72)	0,33 (0,71)
	700	-0,03 (0,55)	0,03 (0,48)
	850	-0,25 (0,65)	-0,21 (0,57)
Давление на уровне моря (гПа)	Уровень моря	-0,55 (1,1)	-0,54 (1,07)

Таблица 7

Значение *CSI*, *POD*, *PODN*, *FAR*, рассчитанные для прогноза интенсивности осадков более 0,05 мм/12 ч, на 24 часа по исходным данным 00 ч ВСВ, с уточненными данными о рельефе и без уточнения

Параметры	КФ (3 км)	КФ с уточненными данными (3 км)
<i>CSI</i>	0,43	0,45
<i>POD</i> (%)	81	83
<i>PODN</i> (%)	74	75
<i>FAR</i>	52	50

Общие выводы

Верификация результатов является неотъемлемой частью любого моделирования. Для оценки и корректировки работы модели WRF-ARW в Гидромете Республики Беларусь для каждого расчета производится расчет набора статистических параметров.

Основной целью данного исследования была проверка конфигураций модели для выявления наиболее точной схемы параметризации конвекции в модели WRF-ARW для того, чтобы в последующем использовать наиболее стабильную версию в оперативной работе. Верификация проводилась для двух доменов: 15 и 3 км. Для анализа результатов прогноза температуры и давления были выбраны следующие статистические характеристики: средняя ошибка (*ME*) и корень среднеквадратической ошибки (*RMSE*). Для оценки вероятности прогноза осадков анализировались такие статистические показатели, как индекс критической успешности (*CSI*), вероятность обнаружения события (*POD*), вероятность обнаружения отсутствия события (*PODN*), коэффициент ложных тревог (*FAR*).

Наилучшие результаты для области 15 км были получены в сочетании параметризации микрофизики Томпсона и схемы параметризации конвекции Грелл 3D. Оценка прогноза количества осадков показала две наилучшие конфигурации: параметризация Каина–Фритша дала лучший результат по коэффициенту ложных тревог и вероятности обнаружения отсутствия события; конфигурация Грелл 3D показала наилучший результат по вероятности обнаружения события. Проведенный анализ результатов показал, что наилучшим вариантом является использование вышеописанных конфигураций конвекции в объединенном ансамбле.

Оценка ассимилированных уточненных топографических данных дала положительный результат в прогнозе осадков. Тем не менее следует отметить, что значение результатов верификации будет более точным при накоплении большего ряда смоделированных данных.

Список использованных источников

1. Определение набора параметров верификации рабочей версии программно-методического комплекса мезопрогнозирования атмосферных процессов : отчёт о НИР (заключ.), 23.12.2014 г., отв. исп. И.А. Деменцова. – Минск: Респ. Гидрометеорол. Центр, 2014. – 87 с. – № ГР 20130940.
2. Model Evaluation Tools Version 4.1. User's Guide. – Developmental Testbed Center, Boulder, Colorado, USA, March 2009. – 226 p.
3. Programme, Abstracts, Participants. A Doctoral Students Conference Challenges for Earth system science in Baltic Sea region: From measurements to models. University of Tartu and Vilsandi Island, Estonia, 10-14 August 2015 // International Baltic Earth Secretariat Publication № 5. – August 2015. – P. 6.
4. *Stensrud D.J.* Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models. – Cambridge Press, 2007. – 460 p.

Поступила в редакцию 04.09.2015 г.