

УДК 551.501.81 PACS number: 93.85.Bc

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПРОГНОЗ ОСАДКОВ С АССИМИЛЯЦИЕЙ
РАДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МОДЕЛИ HARMONIE****С. В. Иванов**, д-р геогр. наук
И. Г. Рубан, канд. физ.-мат. наук
Ю. О. Паламарчук, канд. геогр. наук*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, svivo@te.net.ua*

Представлено дальнейшее развитие системы ассимиляции данных в оперативной численной прогностической конвективно-разрешающей модели HARMONIE за счет включения в нее радарных измерений. Основное внимание уделено, во-первых, общему вкладу ассимиляции радарных измерений в количественный прогноз осадков; во-вторых, сравнению результатов численных экспериментов с использованием различных методов предварительной обработки радиоэха в системе отслеживания измерений. Рассмотрены два способа пре-процессинга. Для сокращения объема входных данных применены методы “простого преживания” и “супернаблюдения”. Выполнено сравнение тестовых численных экспериментов с контрольным, в котором радарные измерения не включены в модуль ассимиляции данных. Результаты показали, что использование отражательных характеристик атмосферы на этапе формирования начальных условий модели позволяет повысить точность воспроизведения микрофизических процессов в атмосфере за счет коррекции величины содержания влаги в нижней тропосфере. В наиболее интенсивных очагах осадков тестовые эксперименты дали оценки на 10 мм/12 часов выше в сравнении с контрольными расчетами. Вертикальные профили содержания влаги в атмосфере показали, что основное увеличение расчетных значений имеет место в слое между 850 и 600 hPa. В очаге осадков такое увеличение интенсивности примерно соответствует значению 5-7 мм / час. Коррекция влагосодержания в средней тропосфере позволила увеличить количественные оценки осадков на поверхности и приблизить их к значениям ретроспективного анализа. Однако, результаты численных расчетов чувствительны к выбору метода пре-процессинга и внутренних параметров. Оптимизацию такого выбора с учетом разрешения модельной сетки и пространственных особенностей атмосферного потока предполагается выполнить на следующем этапе исследований.

Ключевые слова: модель атмосферы Harmonie, метеорадар, ассимиляция данных, осадки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс ассимиляции данных подразумевает приспособление модельных полей к доступным наблюдениям на момент начала интегрирования модели. Реализация этого процесса осуществляется через оператор наблюдений (*observation operator*), который также называют моделью наблюдений (*observation model*). Он обеспечивает прямое сравнение модельного состояния атмосферы с наблюдениями и включает, во-первых, преобразование измеряемых характеристик в соответствующие значения атмосферных величин, как их принято использовать в модели, и, во-вторых, согласовывает местоположение измерений с узлами модельной сетки. Данные дистанционного зондирования требуют дополнительных преобразований для перевода измеряемых технических характеристик в физические величины и единицы, что также выполняется оператором наблюдений. Точность всего комплекса преобразований оценивается ошибкой

наблюдений, состоящей из трех компонент: инструментальной, случайной и ошибки репрезентативности [1,2].

Настоящая работа сосредоточена на рассмотрении влияния процесса усвоения неоднородно распределенных измерений метеорологических радаров на результаты численных расчетов осадков. Предполагается, что использование дополнительной информации при формировании полей анализа должно сократить ошибку начальных условий модели и уменьшить скорость ее роста на протяжении интегрирования. В частности, наблюдения с высоким пространственным разрешением сокращают ошибку репрезентативности, которая возникает из-за рассогласования между непрерывным спектром масштабов атмосферных процессов, с одной стороны, и тем как они представлены сетью наблюдений и модельной сеткой, с другой [3,4].

Во втором разделе статьи представлены методы предварительной обработки радарных из-

мерений (*pre-processing*). В третьем разделе описана конфигурация оперативной численной модели высокого разрешения Harmonie-40h1.1, использованная в работе и постановка численных экспериментов с двумя методами предварительной обработки и ассимиляции радарных данных. В четвертом разделе обобщены результаты расчетов. Выводы и предполагаемые пути дальнейшему совершенствованию модулю ассимиляции радарных измерений представлены в пятом разделе.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА РАДАРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Методы предварительной обработки дистанционных измерений включают регистрацию сигнала во времени и пространстве, удаление выбросов, калибровку радиолокационной ошибки, сжатие и архивацию данных. Эти технологические шаги являются зоной ответственности производителей радарных систем и не будут рассматриваться в данной статье. Основное внимание будет уделено следующему этапу препроцессинга, на котором привлекается многоцелевая система отслеживания наблюдений, устанавливающая соответствие измерений модельному состоянию потока. Выбор системы координат, способа преобразования и представления измерений непосредственно влияет на точность результатов и вычислительные затраты.

Оптимальной для минимизации ошибки интерполяции можно считать конфигурацию, при которой разрешения сети наблюдений и модельной сетки близки друг другу, и, при этом, они позволяют отслеживать интересующие энергоносители масштабы атмосферного потока.

В этом смысле, радарные измерения, выполняемые по современным технологиям, привносят одновременно две проблемы противоположного характера. Во-первых, накапливается чрезмерно избыточная информация в окрестности места расположения радара. Во-вторых, с удалением от радара измерения становятся редкими. В результате такого зондирования получают неоднородное информационное покрытие трехмерной области с заполнением 7-10 % в зависимости от длины импульса, азимутального угла и количества вертикальных углов сканирования. В свою очередь, это ведет к неоднородному вкладу ассимилируемых в модель данных. При этом, роль чувствительности начальных условий модели к ошибке репрезентативности и последующего модельного решения возрастает при повышении разрешения модельной сетки. Как пока-

зали тестовые эксперименты с методом “обобщенного взаимного обоснования” (*Generalized Cross-Validation (GCV)*, [5] для идеализированного набора данных высокого разрешения, использование полного разрешения может формировать поля анализа с большей ошибкой, чем в анализе с более грубым разрешением. Другими словами, чем больше рассогласование между разрешением сети наблюдений и модельной сеткой, тем больше вклад ошибки репрезентативности в общую ошибку прогноза, в том числе за счет используемых алгоритмов ассимиляции данных.

Наиболее простой способ сократить объем данных состоит в прореживании исходных радарных измерений. Однако, такой способ не решает проблему неоднородного пространственного распределения информации и, кроме того, может искажать пространственные характеристики атмосферных структур на масштабах, близких к коэффициентам прореживания.

Альтернативой прореживанию может быть осреднение измерений в пределах трехмерного объема заданных размеров с формированием нового значения, отнесенного к центру выделенного объема. В этом случае выполняется также осреднение ошибок измерений, что, в предположении случайной природы, минимизирует их вклад [2]. Метод получил название “супернаблюдение” (*superobbing*) и впервые был применен в дистанционных методах зондирования для вектора атмосферного потока [6] и радиальной скорости ветра в Допплеровских радарах [7]. Метод заключается в осреднении инноваций (*innovations*), т. е., разницы между векторами наблюдений и фоновых значений (*background*) [8]. Для этого в точках измерений путем интерполяции рассчитываются модельные значения соответствующих атмосферных величин, которые усредняются в пределах выделенной ячейки. Полученное “супернаблюдение” корректирует модельные значения. Как и в первом методе, оптимизация процесса формирования “супернаблюдения” для больших массивов данных является компромиссом между двумя факторами: глубиной сглаживания полей при осреднении и необходимостью сохранения атмосферных структур тонкого масштаба.

В представленной работе основное внимание уделено, во-первых, общему вкладу ассимиляции радарных измерений в количественный прогноз осадков с использованием оперативной численной модели высокого разрешения Harmonie. Во-вторых, сравниваются результаты численных экспериментов, полученные с ис-

пользованием двух методов предварительной обработки данных радаров, а именно, “просеивания” и “супернаблюдения”. Анализ выполняется в контексте того, каким образом ошибка репрезентативности может быть уменьшена за счет оптимизации параметров предварительной обработки данных для более корректного представления масштабов атмосферного потока. При этом систематическая ошибка модели предполагается постоянной во всех экспериментах.

3. КОНФИГУРАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В МОДЕЛИ HARMONIE

Численные эксперименты по исследованию вклада ассимиляции радарных измерений в повышение точности количественных прогнозов осадков выполнялись на основе оперативной численной негидростатической конвективно-разрешающей модели Harmonie-40h1.1, созданной и непрерывно совершенствуемой европейским консорциумом HIRLAM [9]. Рассматривалось два метода предварительной обработки радарных измерений, которые позволяют существенно сократить объем данных для последующей ассимиляции. Оба метода продемонстрировали относительно небольшие вычислительные затраты, которые компенсируются существенным выигрышем на этапе трехмерного вариационного усвоения полного объема данных.

Прогностическая модель и система анализа использовали установленное по умолчанию пространственное разрешение 2.5 км и 65 уровней с гибридной системой координат по вертикали. Динамическое ядро модели основано на двухуровневой по времени полу-неявной полу-Лагранжевой схеме дискретизации полных эластичных уравнений [10].

Начальные и граничные условия получены из метеорологического архива MARS (*Meteorological Archival and Retrieval System*) Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды (*The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*), которые формируются на основе расчетов глобальной спектральной модели IFS (*Integrated Forecasting System*). Релаксация на боковых границах выполняется после расчета горизонтальной диффузии. Для нее адаптирована зона в 10 линий. На верхней границе накладывается условие нулевой вертикальной скорости.

В стандартной конфигурации модели ассимилируются следующие типы наблюдений: TEMP, SYNOP, AIREP, PILOT, SATOB, SHIP, DRIBU. Используется 3DVAR схема с условием анали-

тического баланса и статистическими характеристиками фоновых ошибок (систематических ошибок модели), рассчитанными по NMC (*National Meteorological Center*) методу.

Исходными данными для численных экспериментов с ассимиляцией радарных измерений послужили результаты полевого эксперимента BaltEx (<http://www.baltex-research.eu/>), прошедшие предварительный контроль качества. Критерии для контроля были разработаны в проекте BaltRad (2009-2014) (<http://baltrad.eu/>).

Численные эксперименты проводились над территорией Финляндии. Такой выбор основан на следующих критериях. Во-первых, эта область характеризуется однородной подстилающей поверхностью и сглаженной орографией, что существенно уменьшает воздействие на результаты локальных факторов из-за резких градиентов на границах различных типов или перепадов высот подстилающей поверхности. Во-вторых, южная часть Финляндии покрыта сетью радаров (рис. 1), тогда как северная часть оставалась не освещенной в период BaltEx эксперимента.

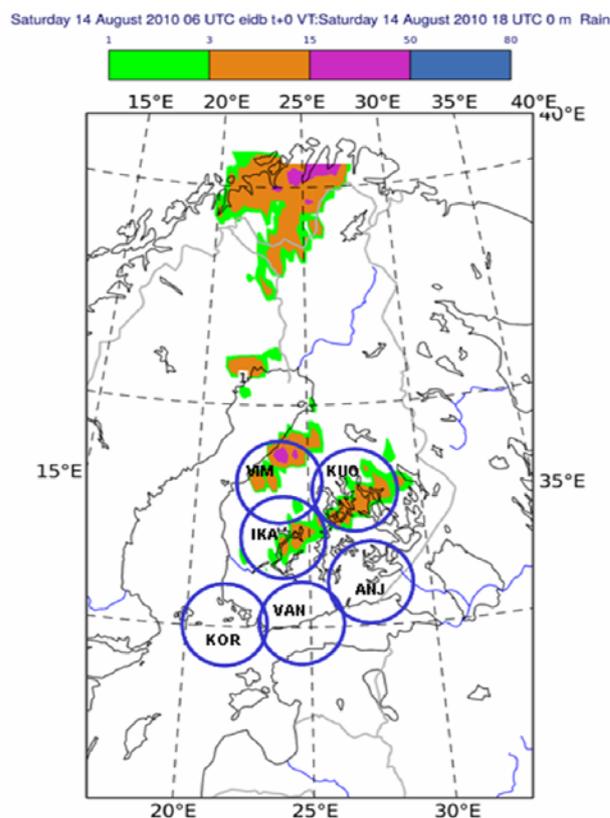


Рис. 1 – Карта осадков на 14 августа 2010 18 UTC и расположение радаров в эксперименте BaltEx. Цветовая шкала представлена в соответствии с действующей классификацией интенсивности осадков (мм/12 час). Окружностями обозначены области действия радаров.

Такой подход позволил в дальнейшем рассматривать две примерно одинаковые по размеру (~300×300 км) области с близкими типами подстилающей поверхности и орографии и сравнивать результаты по ним. В численную модель на этапе инициализации вводились данные шести радаров (Anjalankoski, Ikaalinen, Korpo, Kuopio, Vantaa, Vimpeli).

Рассматривался период с 03:00 14 по 05:00 15 августа 2010, когда над Скандинавией проходил глубокий циклон, сопровождавшийся интенсивными осадками. Было проведено три типа численных экспериментов с одинаковой конфигурацией модели, за исключением параметров усвоения данных.

Контрольный эксперимент (CNTR) включал ассимиляцию всех доступных над областью наблюдений в форматах SYNOP, TEMP и AIREP. В двух тестовых экспериментах кроме вышеперечисленных ассимилировались также радарные измерения, прошедшие просеивание на этапе предварительной обработки. В одном из этих экспериментов (RAD-th) выполнялось обычное прореживание с параметром 3 вдоль луча и сохранением азимутального шага. В другом эксперименте (RAD-so) просеивание выполнялось по методу “супернаблюдения”.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основное внимание в численных экспериментах сосредоточено на двух областях интен-

сивных осадков, проходивших над северной и центральной частями модельной области, которые соответствовали северной и южной частям Финляндии (рис. 2).

Сравнение результатов экспериментов между собой, а также с полями ре-анализа, показало значительный вклад ассимилированных радарных наблюдений на прогноз сильных осадков (рис. 3).

Как видно, различие в расчетах между контрольным и тестовыми экспериментами проявляется только в центральной части модельной области с радарным покрытием, тогда как в северной части различий не отмечается. В наиболее интенсивных очагах осадков над южной частью Финляндии количественные расчеты дают оценки на, примерно, 10 мм/12 часов выше в сравнении с контрольными расчетами, и они хорошо согласуются с данными ре-анализа.

Вертикальные профили содержания влаги в атмосфере в тестовых экспериментах оказывают, что основное увеличение расчетных значений имеет место в слое между 850 и 600 hPa. В очаге осадков такое увеличение интенсивности осадков примерно соответствует значению 5-7 мм/час.

Однако, влияние ассимиляции радарных измерений существенно зависит от выбора метода и параметров предварительной обработки данных.

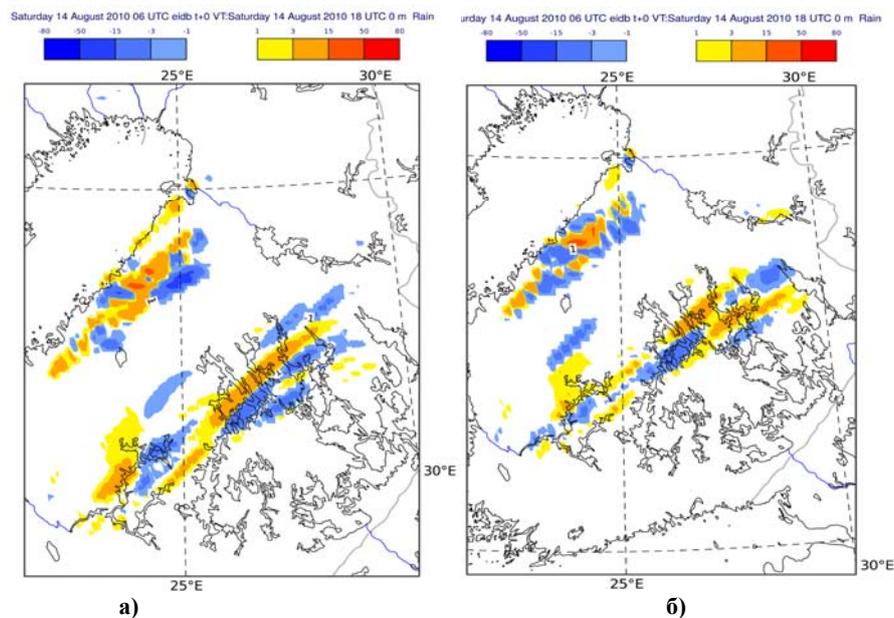


Рис. 2 – Разница в расчетных полях осадков между контрольным (без ассимиляции радарных данных, CNTR) и тестовыми экспериментами с усвоением радарных данных с различными типами предварительной обработки: (а) обычного прореживания (RAD-th) и (б) по методу “супернаблюдения” (RAD-so). Цветовые шкалы показывают разницу в расчетах осадков (мм/12 час). Теплые и холодные части шкал соответствуют положительным и отрицательным значениям.

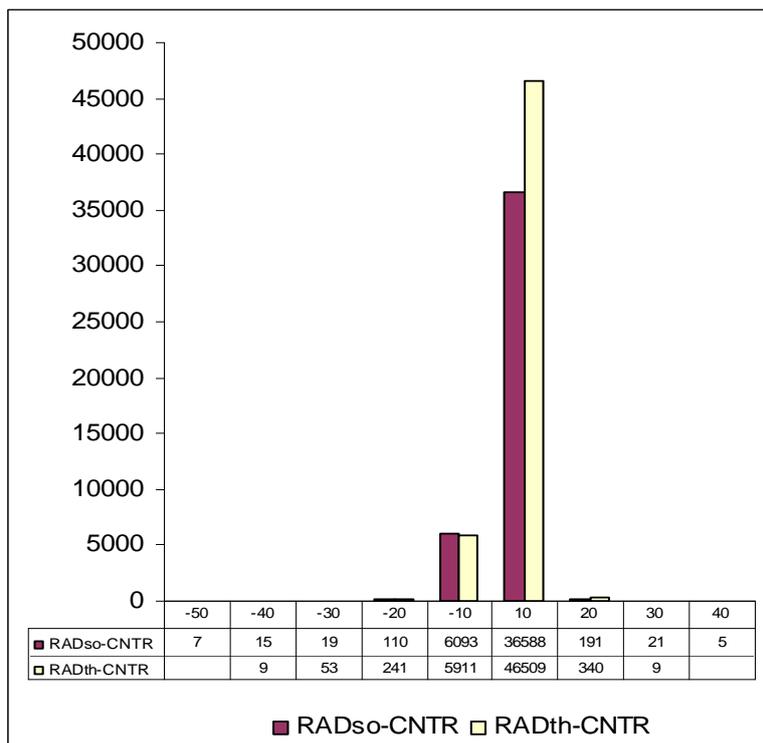


Рис. 3 – Гистограммы разницы в расчетных полях осадков между тестовыми и контрольным экспериментами, как описано на рис. 2

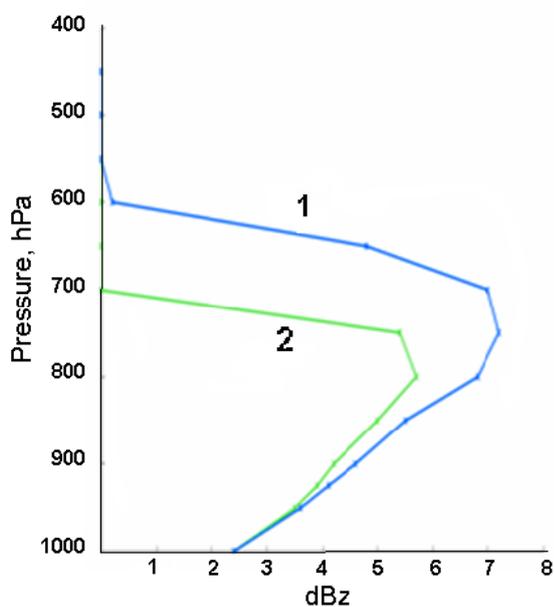


Рис. 4 – Вертикальные профили разницы в распределении содержания влаги в атмосфере между тестовыми и контрольным экспериментами: (1-синий) RADso-CNTR), (2-зеленый) RADth – CNTR

В частности, вариации внутренних параметров в методах пре-процессинга сохраняют общую картину влияния радарных измерений, но в значительной мере сказываются на высокочастотном спектре разрешаемых масштабов. В по-

лях разностей радарного эха проявляются мелко-масштабные ячейки, конфигурация, размер и знак которых меняются при изменении параметров прореживания и осреднения (рис. 4). Такой факт прежде всего обусловлен вычислительными особенностями обработки и преобразования полей, содержащих пространственные структуры различных масштабов. Минимизировать паразитарное влияние таких эффектов возможно заданием оптимальных значений параметров осреднения в алгоритмах просеивания. Эта задача является следующим этапом проводимых исследований.

ВЫВОДЫ

Система ассимиляции данных модели HARMONIE получила дальнейшее развитие за счет включения в нее радарных измерений. Рассмотрены два подхода пре-процессинга наблюдений для сокращения объема данных. Результаты показали, что использование радиоэха на этапе формирования начальных условий позволяет лучше воспроизводить микрофизические процессы в атмосфере с исходного момента интегрирования модели за счет коррекции величины содержания влаги в нижней тропосфере. Это позволяет увеличить количественные оценки осадков на поверхности и приблизить их к значениям

ретроспективного анализа. Однако, результаты чувствительны к выбору метода пре-процессинга и внутренних параметров. Оптимизацию такого выбора с учетом разрешения модельной сетки и пространственных особенностей атмосферного потока предполагается выполнить на следующем этапе исследований.

REFERENCES

1. Kalnay E. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003. 341 p.
2. Lorenc A. C. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 1986, no. 112, pp. 1177–1194.
3. Ivanov S., Palamarchuk J. Fine-scale precipitation structure of a cold front and the problem of the representativeness error. *Advances in Geosciences*, 2007, no. 10, pp. 3–8.
4. Liu Z. Q., Rabier F. The potential of high-density observations for numerical weather prediction: a study with simulated observations. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 2003, no. 129, pp. 3013–3035.
5. Desroziers G., Ivanov S. Diagnosis and adaptive tuning of information error parameters in a variational assimilation. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 2001, no. 127, pp. 1433–1452.
6. Berger H., Forsythe M., Eyre J., Healy S. Proceedings of the seventh international winds workshop. Helsinki, Finland, *EUM*, 2004, p. 42, pp. 119–126. www.eumetsat.int/Home/Main/Publications/
7. Seko H., Kawabata T., Tsuyuki T., Nakamura H., Koizumi K. Impacts of GPS-derived water vapor and radial wind measured by Doppler radar on numerical prediction of precipitation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 2004, no. 82, pp. 473–489.
8. Salonen K., Jarvinen H., Haase G., Niemela S., Eresmaa R. Doppler radar radial winds in HIRLAM. Part II: Optimizing the super-observation processing. *Tellus*, 2009, vol. 61 (2), pp. 288–295.
9. Bengtsson L., Andrae U., Aspeli T., Batrak Yu., Calvo J., de Rooy W., Gleeson E., Hansen-Sass B., Homleid M., Hortal M., Ivarsson K.-I., Lenderink G., Niemela S., Nielsen K.P., Onville J., Rontu L., Samuelsson P., Muñoz D. S., Subias A., Tijm S., Toll V., Yang X., Koltzow M. O. The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system. *Mon. Wea. Rev.*, 2017, no. 145, pp. 1919–1935.
10. Seity Y., Brousseau P., Malardel S., Hello G., Bénard P., Bouttier F., Lac C., Masson V. The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, no. 139, pp. 976–999.

QUANTITATIVE PRECIPITATION FORECAST WITH RADAR DATA ASSIMILATION IN THE HARMONIE MODEL

S. V. Ivanov, Dr Sci. (Geogr.)
I. G. Ruban, Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Yu. O. Palamarchuk, Cand. Sci. (Geogr.)

Odessa State Environmental University, 15,
Lvovskaya St., 65016 Odessa, Ukraine, svvivo@te.net.ua

The further development of the data assimilation system in the operational numerical convective-permitted HARMONIE model is presented. Radar measurements of reflectivity are included in the observational model. In the focus of the study is the following: firstly, the general contribution of radar data assimilation into quantitative forecasts of precipitation; secondly, comparison of the results of numerical experiments obtained with the use of various pre-processing methods of reflectivity in a measurement tracking system. Two methods of pre-processing, such as "simple thinning" and "superobservation" are applied for reducing the amount of input data. Comparison of test numerical experiments with radar data versus reference one, in which the radar measurements are not included in the data assimilation module, is performed. The results show that accounting reflective characteristics of the atmosphere at the model initial conditions allows to increase the accuracy of microphysical processes simulations due to correction of the moisture content in the middle troposphere. For a severe precipitation event, the test experiments provide estimates of 10 mm / 12 hours higher in comparing to the control one. Vertical profiles of moisture content show that the major changes occur in the layer between 850 and 600 hPa. In the precipitation core, rain rate increases roughly at a value of 5-7 mm / h. Correction of moisture content in the middle troposphere leads to increasing quantitative precipitation estimates at the surface and approaching them to retrospective analysis values. However, the results of numerical experiments are sensitive to the choice of a pre-processing approach and internal parameters. Optimization of this choice by accounting for the resolution of the model grid and spatial features of the atmospheric flow will be performed at the next stage of the study.

Keywords: atmospheric Harmonie model, precipitation, weather radar, data assimilation.

КІЛЬКІСНИЙ ПРОГНОЗ ОПАДІВ З АСИМІЛЯЦІЄЮ РАДАРНИХ ВИМІРЮВАНЬ В МОДЕЛІ HARMONIE

С. В. Иванов, д-р геогр. наук
І. Г. Рубан, канд. фіз.-мат. наук
Ю. О. Паламарчук, канд. геогр. наук

*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, svvivo@te.net.ua*

Представлено подальший розвиток системи асиміляції даних в оперативній чисельній прогностичній конвективно-роздільною моделі HARMONIE за рахунок включення в неї радарних вимірювань. Основну увагу приділено, по-перше, загальним внеском асиміляції радарних вимірювань в кількісний прогноз опадів; по-друге, порівняно результатів чисельних експериментів з використанням різних методів попередньої обробки радіоеха в системі відстеження вимірювань. Розглянуто два способи пре-процесингу. Для скорочення обсягу вхідних даних застосовані методи "простого проріджування" і "супернаблюдення". Виконано порівняння тестових численних експериментів з контрольним, в якому радарні вимірювання не включені в модуль асиміляції даних. Результати показали, що використання відбивних характеристик атмосфери на етапі формування початкових умов моделі дозволяє підвищити точність відтворення мікрофізичної процеси в атмосфері за рахунок корекції величини вмісту вологи в нижній тропосфері. У найбільш інтенсивних вогнищах опадів тестові експерименти дали оцінки на 10 мм / 12 годин вище в порівнянні з контрольними розрахунками. Вертикальні профілі вмісту вологи в атмосфері показали, що основне збільшення розрахункових значень має місце в шарі між 850 і 600 hPa. В осередку опадів таке збільшення інтенсивності приблизно відповідає значенню 5-7 мм / год. Корекція вмісту вологи в середній тропосфері дозволила збільшити кількісні оцінки опадів на поверхні і наблизити їх до значень ретроспективного аналізу. Однак, результати чисельних розрахунків чутливі до вибору методу пре-процесингу і внутрішніх параметрів. Оптимізацію такого вибору з урахуванням дозволу модельної сітки і просторових особливостей атмосферного потоку передбачається виконати на наступному етапі досліджень.

Ключові слова: модель атмосфери Harmonie, метеорадар, асиміляція даних, опади.

*Дата першого подання: 30. 08. 2017
Дата надходження остаточної версії: 03. 11. 2017
Дата публікації статті: 30. 11. 2017*