

УДК 004.9:504:519.6

А.В. ХАЛЧЕНКОВ*, И.В. КОВАЛЕЦ*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕЛАКСАЦИИ В МОДЕЛИ WRF ДЛЯ АНАЛИЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В УКРАИНЕ ЗА ДЛИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

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

Анотація. Досліджена можливість використання методів сіткової й спектральної релаксації та інших опцій у мезомасштабній моделі WRF, що дозволяють виконувати тривалі неперервні розрахунки. Виконано ряд розрахунків із різними комбінаціями налаштувань та проведено порівняння обраних метеорологічних параметрів із наземними вимірами. Наведені базові рекомендації для вибору оптимальної комбінації параметрів розрахунку, що дозволяють отримувати неперервні метеорологічні поля за тривалий термін (декілька місяців), які добре узгоджуються з вимірами, зберігають великомасштабні синоптичні структури і мають відхилення від вимірів, співрозмірне з результатами короткострокового моделювання за відповідні періоди часу. Обрана оптимальна комбінація параметрів дозволила виконати неперервний розрахунок за період з 01.01.2019 по 06.11.2019 без накопичення відхилень. У тривалому розрахунку метеорологічних умов в Україні на сітці із просторовим дозволом $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ було отримано для температури на висоті 2 метри середню абсолютну помилку $\text{MAE}=2,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ при коефіцієнті кореляції $\text{Corr}=0,97$, для швидкості вітру на висоті 10 метрів $\text{MAE}=1,4\text{ м/с}$, $\text{Corr}=0,75$, для напрямку вітру на висоті 10 метрів $\text{MAE}=24,6$ $\text{Corr}=0,66$. У роботі досліджений вплив параметризацій підстилаючої поверхні і діяльного шару ґрунту на якість розрахунку метеорологічних полів. Використання опції оновлення температури водної поверхні дозволило зменшити MAE для температури з $2,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $2,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. У кожній з досліджуваних моделі поверхні були виявлені свої переваги та недоліки. Параметризації RUC і NOAH LSM показали гарне узгодження з вимірами по всіх досліджуваних параметрах і можуть бути рекомендовані для використання в тривалих неперервних розрахунках. Тривалий розрахунок з обраними параметрами дозволив вірно описати процес акумуляції та сходження сніжного покриву і вірно змодельювати температуру верхнього шару ґрунту. В роботі показано, що недоліком тривалого розрахунку є обмежені можливості у визначенні температури нижніх шарів ґрунту.

Ключові слова: WRF, rid nudging, spectral nudging, метеорологічні поля, тривалий неперервний розрахунок.

Аннотация. Исследована возможность использования методов сеточной и спектральной релаксации и других опций в мезомасштабной модели WRF, которые позволяют проводить длительные непрерывные расчеты. Выполнен ряд расчетов с разными комбинациями входных параметров и проведено сравнение выбранных метеорологических параметров с наземными измерениями. Приведены базовые рекомендации для выбора оптимальной комбинации параметров расчета, которые позволяют получить непрерывные метеорологические поля за продолжительный период (несколько месяцев), которые хорошо согласуются с наземными измерениями, сохраняют крупномасштабные синоптические структуры и имеют отклонение от измерений, соизмеримое с результатами краткосрочного моделирования за соответствующие временные промежутки. Выбранная оптимальная комбинация параметров позволила произвести непрерывный расчет за период с 01.01.2019 по 06.11.2019 без накопления ошибок. В продолжительном расчете метеорологических условий в Украине на сетке с пространственным разрешением $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ была получена для температуры на высоте 2 метра средняя абсолютная ошибка $\text{MAE}=2,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент корреляции $\text{Corr}=0,97$, для скорости ветра на высоте 10 метров $\text{MAE}=1,4\text{ м/с}$, $\text{Corr}=0,75$, для направления ветра на высоте 10 метров $\text{MAE}=24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{Corr}=0,66$. В работе исследовано влияние параметризации подстилающей поверхности и деятельного слоя почвы на качество расчета метеоро-

гических полей. Использование опции обновления температуры водной поверхности позволило уменьшить MAE для температуры с 2,17 °C до 2,05 °C. У каждой исследуемой модели поверхности были выявлены свои преимущества и недостатки. Параметризации RUC и NOAA LSM показали хорошее согласие с измерениями по всем исследуемым параметрам и могут быть рекомендованы для использования в продолжительных непрерывных расчетах. Длительный расчет с выбранными параметрами позволил правильно описать процесс аккумуляции и таяния снега и правильно воспроизвести температуру верхнего слоя грунта. В работе показано, что недостаток длительных расчетов – это ограниченные возможности в определении температур нижних слоев грунта.

Ключевые слова: WRF, grid nudging, spectral nudging, метеорологические поля, продолжительный непрерывный расчет.

Abstract. The possibility of using grid and spectral relaxation methods and other options in the WRF mesoscale model for long-term continuous calculations has been investigated. Results of comparison of selected meteorological parameters with surface measurements are presented. The basic recommendations for selecting the optimal combination of long-term calculation parameters are given. The use of the selected parameters allowed to obtain continuous meteorological fields over a long period (several months), which are well consistent with surface measurements, retain large scale synoptic structures and have a deviation from measurements commensurate with the results of short-term simulations over corresponding time period. The selected optimal combination of parameters allowed us to perform continuous calculation for the period from January 1, 2019 to November 6, 2019 without accumulating errors. In a long-run calculation of meteorological conditions in Ukraine with spatial resolution 0.15 deg. for a temperature at a height of 2 meters was obtained a mean absolute error of MAE=2,05 °C, a correlation coefficient of Corr=0,97, for a wind speed at a height of 10 meters of MAE=1.4 m/s, of Corr=0,75, and for a wind direction at a height of 10 meters of MAE=24,6 degrees, Corr=0,66. The influence of the parameterizations of the underlying surface and the active soil layer on the quality of calculation of meteorological fields is studied. Using the option to update the water surface temperature allowed to reduce the MAE for the temperature from 2,17 °C to 2,05 °C. Each of the investigated surface models showed its advantages and disadvantages. The parameterizations RUC and NOAA LSM showed good agreement with the measurements for all studied parameters and can be recommended for use in long-term continuous calculations. A long calculation made it possible to describe the process of accumulation and melting of snow correctly, and made it possible to reproduce the temperature of the upper soil layer correctly as well. The paper shows that the disadvantage of long-term calculations is the inability to determine the temperature of the lower layers of the soil correctly.

Keywords: WRF, grid nudging, spectral nudging, meteorological fields, long-term continuous simulation.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-2-30-42

1. Введение

Многие задачи по моделированию окружающей среды требуют наличия достоверных метеорологических полей за длительные периоды прошедшего времени. Одним из лучших и наиболее универсальных способов получения полей большинства метеорологических параметров для указанного региона с требуемым пространственным разрешением является использование метеорологической мезомасштабной модели WRF [1]. Модель WRF в качестве входных данных для построения начальных и граничных условий использует результаты расчета различных глобальных моделей (GFS FNL [2], ECMWF INTERIM, ECMWF ERA5 и пр.). Модель WRF хорошо себя зарекомендовала при краткосрочном моделировании (в пределах нескольких дней), но длительный непрерывный расчет WRF связан с рядом проблем. Например, модель не способна самостоятельно оценивать изменения температуры водной поверхности. Для температуры нижнего слоя грунта используется фиксированное (зависит только от координаты, но не зависит от времени) среднегодовое значение температуры и пр. Помимо подобных ограничений, в силу чувствительности решения уравнений мезомасштабной метеорологии к входным данным, при длительном расчете рассчитанная крупномасштабная структура метеорологических полей может значительно

отличаться от данных моделей глобальной циркуляции, которые используются для задания граничных условий. Указанные ограничения модели приводят к накоплению ошибок, которые при длительном расчете приводят к отклонению метеорологических полей от измеренного значения [3].

Одним из известных способов избежать этих проблем является замена продолжительного расчета рядом краткосрочных расчетов, то есть постоянная реинициализация модели с постоянным обновлением информации о начальных и граничных условиях из глобальной модели [3]. Но такой способ имеет ряд известных недостатков. Во-первых, вычислительные ресурсы нерационально используются на расчет некоего выбранного периода инициализации, который требуется для сглаживания известных начальных артефактов каждого отдельного расчета, обусловленных несогласованностью метеорологических полей в результате интерполяции данных глобальной модели. Во-вторых, требуется автоматизация, обеспечивающая возможность многократных запусков модели, а также усложняется постобработка результатов. В-третьих, полученные выходные метеорологические поля получаются разрывными, скачкообразно меняются при переходе от результатов одного расчета к результатам следующего расчета.

В настоящее время в модели WRF реализован ряд функций, которые позволяют улучшить результаты непрерывных расчетов за продолжительный период времени. Например, в модели реализована возможность использования методов сеточной [4] и спектральной релаксации [5], с помощью которых можно притягивать выбранные метеорологические поля WRF к соответствующим полям глобальных моделей, что гарантирует минимальное отклонение крупномасштабных характеристик полей, рассчитанных WRF от синоптических полей глобальных моделей. Кроме того, имеется возможность использовать опции обновления температуры водной поверхности с неким указанным шагом. Очевидно, что результаты длительного моделирования также существенно зависят от выбранных физических параметризаций, особенно от параметризации поверхности Земли (Land Surface Model – LSM), отвечающей за такие важные при продолжительном моделировании процессы, как изменение температуры грунта или воспроизведение снежного покрова.

Целью данного исследования является применение и тестирование методов сеточной и спектральной релаксации для долгосрочного моделирования метеорологических условий в Украине, а также определение путем варьирования выбранных параметров оптимального набора параметризаций и опций расчета, которые позволят максимально качественно воспроизводить метеорологические поля.

2. Настройка модели и описание численного эксперимента

Для построения начальных и граничных условий использовались данные глобальной метеорологической модели GFS FNL с пространственным разрешением 0,25 °С. Период моделирования ограничен временным диапазоном с 01.01.2019 по 06.11.2019. Выбранный период, с одной стороны, достаточно короток, чтобы можно было протестировать множество различных параметризаций, а с другой, включает холодный и теплый сезоны года, для которых характерны существенно разные характеристики метеорологических условий и процессов (наличие или отсутствие снежного покрова, наличие или отсутствие льда на поверхности водоемов, прогрев грунта, выпадение осадков различного типа и пр.). Конец расчета 06.11.2019 обусловлен тем, что в этот момент изменилось число вертикальных уровней в глобальной GFS-модели (в модели WRF нет возможности использовать граничные данные с разным количеством вертикальных уровней внутри одного непрерывного расчета). Область моделирования охватывала большой регион (120x80 узлов с шагом 0,15 °С), покрывающий всю Украину с центром в Киеве (рис. 1). Для получения информации о подстилающей поверхности использовался набор Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer [6] (modis_15s с 15-секундным разрешением) для определения категорий

землепользования и набор Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 [7] (topo_gmted2010_30s с 30-секундным разрешением) для определения топографических данных.

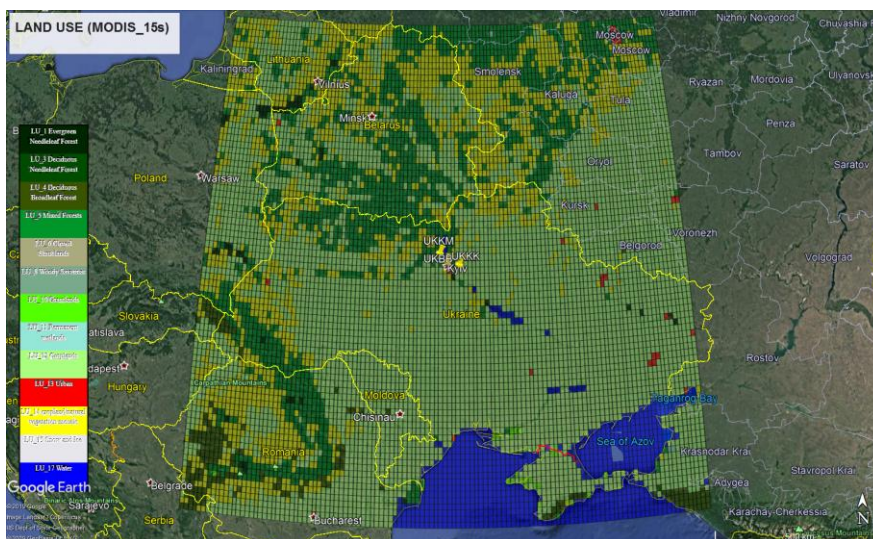


Рисунок 1 – Расчетная область. Доминантные категории землепользования

Модель WRF состоит из множества подмоделей, отвечающих за различные физические процессы [1]. Выбор, включение и выключение отдельных подмоделей зависят от выбранных параметров, указанных в настроечном файле namelist.input в разделе &physics [8]. Некоторые параметры, отвечающие за физические процессы, которые предположительно не должны существенно сказываться на отличиях долгосрочного и краткосрочного моделирования, были фиксированы во всех проведенных расчетах. Для длинноволновой радиации использовалась RRTM-схема, для коротковолновой радиации – Goddard Shortwave-схема, в качестве модели приземного слоя использовалась основанная на теории подобия Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme, для модели пограничного слоя использовалась параметризация Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE-scheme. Модель кучевой области Kain-Fritsch была включена только для внешней области и выключена для детализированной области. Все указанные физические параметризации надежно и многократно были проверены в многочисленных работах по моделированию метеорологических условий [9, 10].

В рамках данного исследования варьировались параметры, которые предположительно могут влиять на качество долгосрочного моделирования:

1. Обновление температуры поверхности воды по данным глобальной модели (sst_update=1). Модель WRF не способна самостоятельно рассчитывать температуру верхнего слоя воды. Очевидно, что при долгосрочном моделировании температура поверхности изменяется в широком диапазоне, что может приводить к существенным ошибкам. Чтобы учесть изменение температуры поверхности воды, специально для продолжительных расчетов в модели реализована возможность регулярного обновления температуры водных поверхностей в соответствии с данными глобальной модели.

2. Притягивание выбранных полей к полям глобальной модели. В модели WRF присутствуют два способа притягивания высотных данных: grid analysis nudging (grid_fdda=1) и spectral analysis nudging (grid_fdda=2), а также возможность притягивания поверхностных данных (grid_sfdda=1).

3. Модель поверхности земли (sf_surface_physics). Одна из наиболее важных опций при долгосрочном моделировании, поскольку отвечает за свойства подстилающей поверхности (температуру, влажность, альбедо, наличие/отсутствие снежного покрова и пр.).

Вначале исследовался отдельный и совокупный вклад таких общих параметров, как `sst_update`, `grid_fdda`, `grid_sfdda` (для модели поверхности земли и микрофизики использовались две различные комбинации: `sf_surface_physics=3`, `mp_physics=16` и `sf_surface_physics=2`, `mp_physics=6`). Дополнительно были проведены краткосрочные расчеты, полностью покрывающие выбранный период сравнения (длительность каждого отдельного расчета 54 часа, из которых первые 6 часов, потраченные на инициализацию, в сравнении не учитывались). Далее для выбранных оптимальных конфигураций общих параметров варьировались модели поверхности земли (`sf_surface_physics`). В табл. 1, 2 приведены все выполненные расчеты с указанием используемых параметров.

Таблица 1 – Расчеты, выполненные при варьировании общих параметров

ID	Название расчета	Опции WRF				
		<code>sf_surface_physics</code>	<code>mp_physics</code>	<code>sst_update</code>	<code>grid_fdda</code>	<code>grid_sfdda</code>
1	NOAH_48h restart_MP_6	2	6	1	1	0
2	NOAH_MP_6	2	6	0	0	0
3	NOAH_SST_UPDATE_MP_6	2	6	1	0	0
4	NOAH_GFDDA_MP_6	2	6	0	1	0
5	NOAH_GFDDA_SST_UPDATE_MP_6	2	6	1	1	0
6	NOAH_GFDDA2_SST_UPDATE_MP_6	2	6	1	2	0
7	NOAH_GFDDA_SFDDA_SST_UPDATE_MP_6	2	6	1	1	1
8	NOAH_GFDDA_SFDDA2_SST_UPDATE_MP_6	2	6	1	1	2
9	RUC_48h restart_MP_16	3	16	0	0	0
10	RUC+GFDDA_SST_UPDATE_MP_16	3	16	0	1	0

Таблица 2 – Расчеты, выполненные при варьировании модели поверхности земли (при фиксированных значениях: `mp_physics=6`, `sst_update=1`, `grid_fdda=1`)

ID	Название расчета	Опции WRF		
		<code>sf_surface_physics</code>	<code>num_soil_layers</code>	<code>grid_sfdda</code>
1	NOAH	2	4	0
2	RUC9	3	9	0
3	CLM	5	10	0
4	PLXU	7	2	0
5	NOAH_SFDDA	2	4	1
6	RUC_SFDDA	3	9	1
7	PLXU_SFDDA	7	2	1

3. Результаты варьирования общих параметров

Сравнение результатов расчетов проводилось с измерениями шести наземных метеостанций, расположенных в аэропортах: UKKK (Киев, Жуляны), UKBB (Борисполь), UKKM (Антонов, Гостомель), UKLR (Ровно), UKRR (Чернигов), UMGG (Гомель). Результаты сравнения рассчитанных и измеренных метеорологических параметров (приземные температура, скорость и направление ветра, осадки) приведены в табл. 3, 4. В таблицах приведены систематическая ошибка ME, средняя абсолютная ошибка MAE, среднеквадратическая ошибка RMSE, коэффициент корреляции Corr. Из таблиц видно, что включение автоматического обновления температуры водной поверхности положительно сказалось на модели-

ровании приземной температуры, и статистически незаметно при моделировании полей ветра.

Таблица 3 – Сравнение с измерениями приземной температуры (на высоте 2м) и аккумулярованных за 24 часа осадков

id	Вариант	Температура 2м, °C				Осадки, мм/24h			
		ME	MAE	RMSE	Corr	ME	MAE	RMSE	Corr
1	NOAH_48h restart_MP_6	-0,52	1,94	2,80	0,97	0,97	2,04	4,10	0,37
2	NOAH_MP_6	-0,49	2,17	2,96	0,97	1,38	2,34	4,89	0,36
3	NOAH+SST_UPDATE_MP_6	-0,82	2,06	2,87	0,97	1,48	2,42	5,05	0,35
4	NOAH+GFDDA_MP_6	-0,17	2,20	3,00	0,97	0,88	1,91	3,70	0,43
5	NOAH+GFDDA+SST_UPDATE_MP_6	-0,50	2,05	2,87	0,97	1,14	2,16	4,28	0,38
6	NOAH+GFDDA2+SST_UPDATE_MP_6	-0,68	2,06	2,90	0,97	1,18	2,16	4,36	0,38
7	NOAH_GFDDA_SFDDA_SST_UPDATE_MP_6	-0,47	1,70	2,27	0,98	2,74	3,48	6,80	0,25
8	NOAH_GFDDA_SFDDA2_SST_UPDATE_MP_6	-0,61	2,24	2,92	0,96	0,82	1,81	3,79	0,40
9	RUC_48h restart_MP_16	-1,82	2,48	3,26	0,96	1,65	2,55	5,24	0,37
10	RUC_GFDDA_SST_UPDATE_MP_16	-1,35	2,37	3,14	0,96	1,94	2,77	5,11	0,36

Таблица 4 – Сравнение с измерениями скорости и направления ветра

id	Вариант	Скорость ветра (10м), м/с				Направление ветра (10м), град			
		ME	MAE	RMSE	Corr	ME	MAE	RMSE	Corr
1	NOAH_48h restart_MP_6	0,93	1,40	1,82	0,74	3,85	24,69	38,72	0,63
2	NOAH_MP_6	1,45	1,79	2,29	0,67	5,93	28,08	43,03	0,61
3	NOAH+SST_UPDATE_MP_6	1,33	1,69	2,15	0,69	4,56	27,96	43,12	0,61
4	NOAH+GFDDA_MP_6	1,08	1,46	1,87	0,75	4,25	24,78	38,80	0,65
5	NOAH+GFDDA+SST_UPDATE_MP_6	0,99	1,40	1,80	0,75	3,55	24,59	38,59	0,66
6	NOAH+GFDDA2+SST_UPDATE_MP_6	0,96	1,40	1,80	0,75	2,54	25,49	40,25	0,66
7	NOAH_GFDDA_SFDDA_SST_UPDATE_MP_6	0,75	1,24	1,60	0,77	1,11	22,51	35,45	0,68
8	NOAH_GFDDA_SFDDA2_SST_UPDATE_MP_6	-0,12	1,23	1,58	0,67	-12,10	31,31	46,11	0,64
9	RUC_48h restart_MP_16	0,66	1,33	1,74	0,69	0,82	26,56	41,58	0,63
10	RUC_GFDDA_SST_UPDATE_MP_16	0,53	1,19	1,54	0,75	0,17	24,55	38,74	0,67

Применение сеточной релаксации (grid analysis nudging, опция grid_fdda=1) оказало заметный положительный эффект при моделировании полей ветра. Включение этой опции позволило снизить RMSE для скорости ветра с 2,29 м/с до 1,87 м/с и повысить коэффициент корреляции с 0,67 до 0,75. Для направления ветра RMSE уменьшилось с 43,03 градуса до 38,08 при увеличении коэффициента корреляции с 0,61 до 0,65. Кроме того, это позволило сохранить правильную структуру поля давлений при долгосрочном расчете. На рис. 2 показаны поля давлений, приведенные к уровню моря в долгосрочном расчете с включенной опцией grid_fdda=1 и в соответствующем краткосрочном расчете. Из рисунка видно, что эти поля весьма похожи между собой и близки к полю из финального анализа, что сви-

детельствует о воспроизведении крупномасштабной структуры метеорологических полей в долгосрочном расчете с сеточной релаксацией. В то же время, при долгосрочном расчете без включения релаксации, полученное поле давлений существенно отличается от остальных полей.

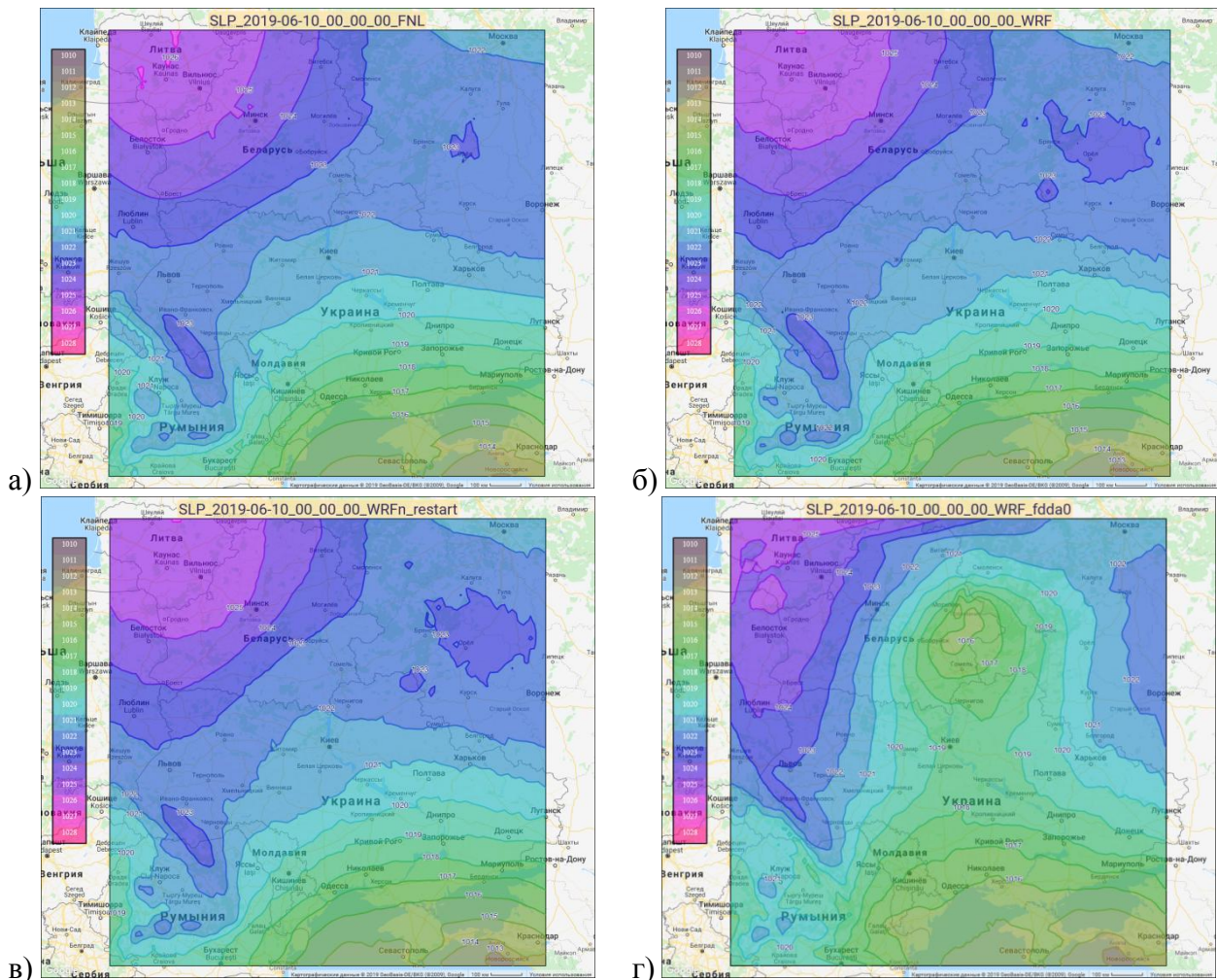


Рисунок 2 – Поле давлений на уровне моря: а) GFS FNL (образец); б) непрерывный полугодичный расчет с использованием сеточной релаксации (NOAH+GFDDA+SST_UPDATE_MP_6); в) краткосрочный расчет 30 часов с момента инициализации (NOAH_48h restart_MP_6); г) непрерывный полугодичный расчет без использования сеточной релаксации (NOAH_MP_6)

Использование методов спектральной релаксации (spectral analysis nudging, опция `grid_fdda=2`) привело к результатам, статистически очень близким к расчету с использованием сеточной релаксации, а также позволило сохранить правильную структуру поля давлений. При использовании методов спектральной релаксации в настройном файле для волновых чисел были заданы значения `xwavenum=3` и `uwavenum=3` (в соответствии с [11] типичное значение для волновых чисел выбирается в зависимости от размеров вычислительной области по формуле $wavenumber \sim \sim (\text{domain size})/1000 \text{ км}$). То есть, оба варианта притягивания метеорологических полей к полям глобальной модели, реализованные в модели WRF, позволяют улучшить результаты и рекомендуются для использования при долгосрочном моделировании метеорологических условий.

Включение притягивания поверхностных метеорологических полей (`grid_sfdda=1`) позволило существенно улучшить моделирование приземных метеорологических полей. В расчете с включенной опцией притягивания приземных данных получены максимальные

коэффициенты корреляции и минимальные характеристики ошибок для приземной температуры (RMSE=2,27 °C), скорости (RMSE=1,6 м/с) и направления ветра (MAE=22,51 °C) из всех проведенных расчетов. Вероятно, это объясняется тем, что данные глобальной модели (финального анализа) уже содержат те же измерения наземных станций, с которыми проводится сравнение. В то же время метод притягивания поверхностных метеорологических полей FASDAS (grid_sfdda=2, flux-adjusted surface data assimilation system) оказался статистически хуже ряда других расчетов.

В результате проведенных численных экспериментов была выбрана оптимальная конфигурация опций (sf_surface_physics=2, mp_physics=6, sst_update=1, grid_fdda=1), которая позволила при долгосрочном расчете получить минимальные ошибки в определении метеорологических полей, соизмеримые с ошибками, получаемыми при использовании серии коротких расчетов с регулярной реинициализацией.

Включение опции притягивания приземных метеорологических полей (grid_sfdda=1) заметно улучшает все статистические оценки приземных параметров, но неизвестно, насколько справедливы подобные утверждения для станций, измерения которых не обрабатываются при построении данных финального анализа.

4. Результаты варьирования модели земной поверхности (sf_surface_physics)

Тестирование моделей земной поверхности (sf_surface_physics) при долгосрочном расчете выполнялось с использованием методов сеточной релаксации (grid analysis nudging, опция grid_fdda=1), при включенном обновлении температуры водной поверхности (sst_update=1) и с использованием модели микрофизики WSM6 (mp_physics=6). В тестировании принимало участие четыре различные модели поверхности: NOAH LSM (четыре слоя грунта), RUC LSM (девять слоев грунта), CLM4 (десять слоев грунта), PLEIM-XIU (два слоя грунта). Статистические результаты сравнения расчетов с наземными измерениями приведены в табл. 5 и 6.

В процессе тестирования оказалось, что длительные расчеты, полученные с использованием модели земной поверхности RUC в WRFV3.9, приводят к значительной ошибке в прогнозировании приземной температуры (последняя строка в табл. 5).

Таблица 5 – Статистические характеристики ошибок для приземной температуры (на высоте 2 м) и аккумулярованных за 24 часа осадков при варьировании модели земной поверхности

ID	Case	Температура на высоте 2 м, °C				Осадки, мм/24 h			
		ME	MAE	RMSE	Corr	ME	MAE	RMSE	Corr
1	NOAH	-0,50	2,05	2,87	0,97	1,14	2,16	4,28	0,38
2	RUC9 (WRFV 3.8.1)	-1,35	2,37	3,14	0,96	1,94	2,77	5,11	0,36
3	CLM4	0,44	1,92	2,64	0,97	0,69	1,67	3,43	0,50
4	PLXU	-2,68	3,02	3,76	0,96	0,36	1,51	2,92	0,51
5	NOAH_SFDDA	-0,47	1,70	2,27	0,98	2,74	3,48	6,80	0,25
6	RUC9_SFDDA (WRFV 3.8.1)	-0,87	1,78	2,30	0,98	2,44	3,23	5,91	0,28
7	PLXU_SFDDA	-0,22	1,40	1,84	0,98	2,70	3,40	6,34	0,29
2*	RUC9 (WRFV 3.9)	-7,59	7,60	9,05	0,88	-0,04	1,37	3,10	0,42

Таблица 6 – Статистика для скорости и направления ветра при варьировании модели земной поверхности

ID	Case	Скорость ветра (10 м), м/с				Направление ветра (10 м), град			
		ME	MAE	RMSE	Corr	ME	MAE	RMSE	Corr
1	NOAH	0,99	1,40	1,80	0,75	3,55	24,59	38,59	0,66
2	RUC9 (WRFV 3.8.1)	0,53	1,19	1,54	0,75	0,17	24,55	38,74	0,67
3	CLM4	0,75	1,32	1,71	0,72	7,87	26,18	39,90	0,66
4	PLXU	0,17	1,11	1,42	0,74	-3,07	24,82	39,06	0,69
5	NOAH_SFDDA	0,75	1,24	1,60	0,77	1,11	22,51	35,45	0,68
6	RUC9_SFDDA (WRFV 3.8.1)	0,40	1,09	1,41	0,77	-0,74	22,72	35,84	0,68
7	PLXU_SFDDA	0,37	1,08	1,39	0,77	0,43	22,57	35,47	0,68
2*	RUC9 (WRFV 3.9)	0,15	1,18	1,51	0,71	-4,99	25,75	39,73	0,68

Дальнейшее исследование показало, что эта проблема отсутствует в старых версиях WRF (до WRFV 3.8.1) и присутствует в новых версиях (WRFV 3.9 и новее). Выяснилось, что модель земной поверхности RUC в новых версиях WRF содержит ошибку, связанную с неверным определением уровня снега. В этом разделе приводятся результаты, полученные для модели RUC с ошибкой в воспроизведении уровня снега (WRFV 3.9) и без ошибки (WRFV 3.8.1).

Среди расчетов без притягивания поверхностных полей ($grid_sfdda=0$) лучшие результаты по температуре показала десятислойная модель CLM4 ($RMSE=1,92$ °C). Эта же модель показала хорошие результаты по прогнозированию осадков ($RMSE=3,43$ мм/24 ч) и соизмеримые с другими моделями результаты по воспроизведению полей ветра. Средне-квадратическая ошибка для скорости ветра ($RMSE=1,71$ м/с), полученная с использованием модели CLM4 ниже, чем ошибка, полученная в расчете с использованием модели NOAH LSM ($RMSE=1,8$ м/с), но выше, чем ошибка, полученная с использованием моделей RUC ($RMSE=1,54$ м/с) и PLEIM-XIU ($RMSE=1,42$ м/с). Недостатком модели CLM4 являются ее сложность и значительные потребности в вычислительных ресурсах (время расчета с использованием этой модели поверхности оказалось приблизительно в 8 раз больше, чем время расчета других моделей). Двухслойная модель PLEIM-XIU показала лучшие результаты для скорости ветра на высоте 10 метров и лучшее воспроизведение количества суточных осадков (рис. 10). В то же время, по воспроизведению температуры на высоте 2 метра эта модель оказалась заметно хуже моделей NOAH LSM и CLM4 ($RMSE=3,76$ °C против $2,87$ °C и $2,64$ °C соответственно).

На рис. 3 приведена температура воздуха на высоте 2 метра за последние десять дней исследуемого периода, полученная в длительном непрерывном расчете с использованием методов сеточной релаксации и в серии краткосрочных расчетов (модель поверхности NOAH LSM). Из рисунка видно, что результаты непрерывного продолжительного расчета после пяти месяцев моделирования остаются близкими к результатам краткосрочных расчетов и хорошо согласуются с измерениями.

На рис. 4 и 5 приведена температура грунта на глубинах 0,05 и 0,7 метра соответственно, рассчитанная с использованием модели поверхности NOAH LSM (продолжительный расчет и серия краткосрочных расчетов) и интерполированная на эти же уровни температура грунта из финального анализа.

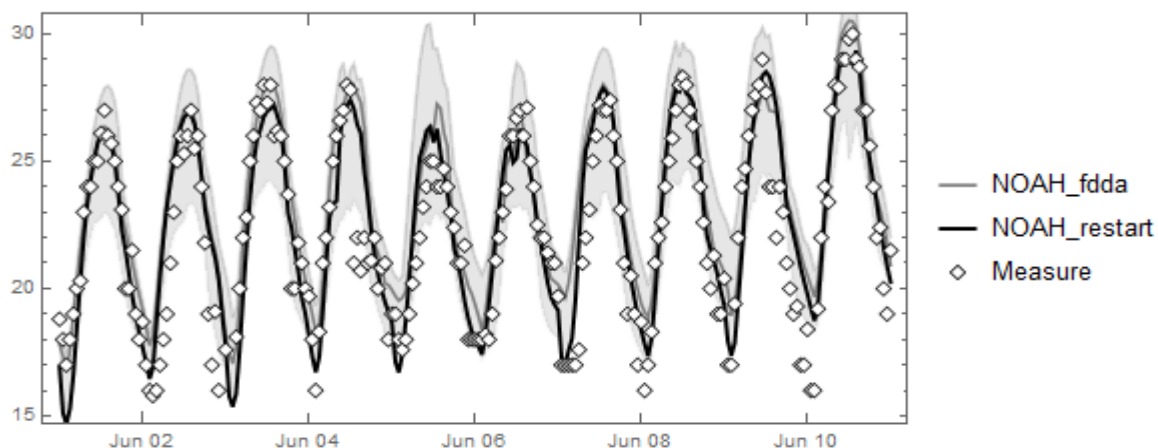


Рисунок 3 – Температура на высоте 2 метра за период с 01.06.2019 по 11.06.2019 (УККК, Жуляны).
 Непрерывный длительный расчет с использованием сеточной релаксации: серым цветом – серия краткосрочных расчетов; черным цветом измерения – маркеры. Светло-серой заливкой указан диапазон, в котором находятся результаты всех других расчетов

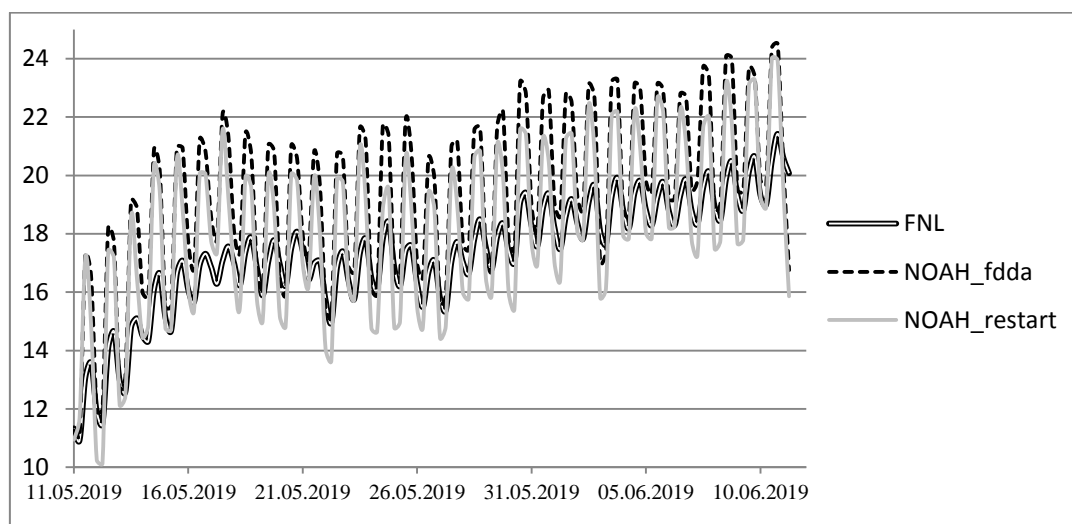


Рисунок 4 – Температура грунта на глубине 0,05 метра (УККК, Жуляны).
 Последний месяц расчета

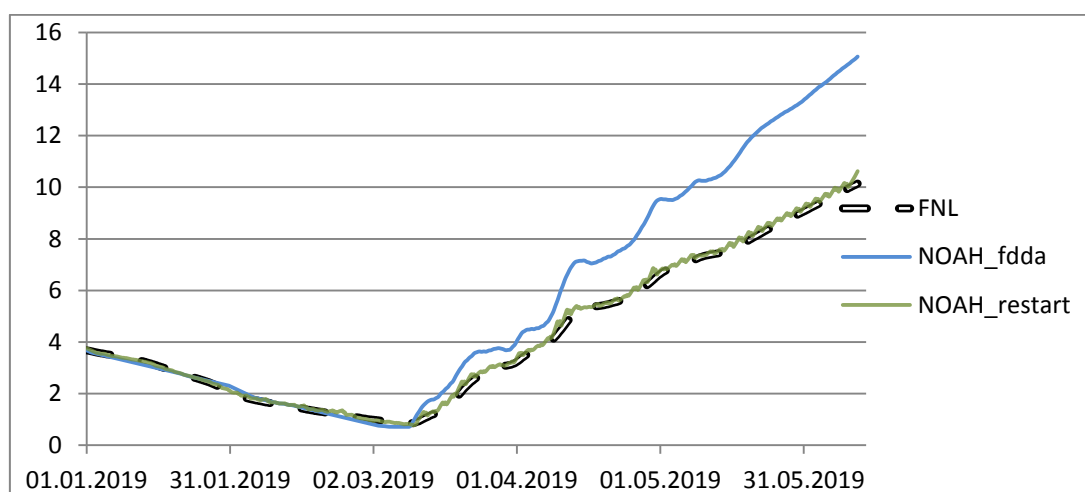


Рисунок 5 – Температура грунта на глубине 0,7 метра (Жуляны)

Из рисунков видно, что в верхнем слое температура, полученная при непрерывном продолжительном расчете, хорошо согласуется с температурой, полученной в результате серии краткосрочных расчетов, и отличается от температуры из финального анализа большим суточным ходом. В более глубоких слоях грунта краткосрочные расчеты обеспечивают хорошее совпадение рассчитанной температуры грунта с температурой из финального анализа (за 54 часа расчета с момента инициализации температура грунта не успевает сильно отклониться от начальных условий). При этом продолжительный непрерывный расчет приводит к рассогласованию температуры с соответствующей температурой из данных финального анализа.

На рис. 6 приведена высота уровня снега, рассчитанная с использованием четырех разных моделей поверхности, а также высота уровня снега из финального анализа. Модели NOAH LSM и RUC LSM показали хорошее согласие с высотой снежного покрова в данных финального анализа. Модели PLEIM-XIU и CLM4 существенно занизили высоту снежного покрова.

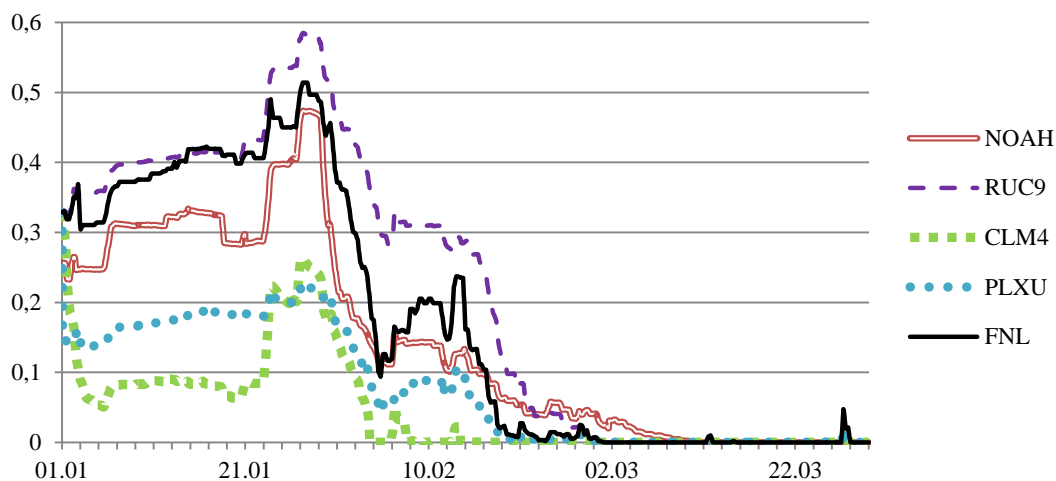


Рисунок 6 – Высота снежного покрова, Киев

Все расчеты с включенным притягиванием поверхностных полей ($grid_sfdda=1$) показали близкие между собой результаты и очень хорошее согласие с измерениями для температуры и ветра. По воспроизведению приземной температуры и скорости ветра лучшие результаты были получены с использованием модели земной поверхности PLEIM-XIU (для температуры $MAE=1,4$ °C, для скорости ветра $MAE=1,08$ м/с). Вероятно, это связано с тем, что модель PLEIM-XIU специально разрабатывалась для проведения ретроспективных расчетов, и использование притягивания поверхностных полей позволило нивелировать ошибки относительно простой двухслойной модели грунта. В то же время, для всех моделей притягивание поверхностных полей существенно ухудшило воспроизведение осадков (для модели PLEIM-XIU MAE снизилось с 1,51 мм/24ч до 3,40 мм/24 ч).

5. Выводы

Использование методов сеточной и спектральной релаксации в мезомасштабной модели WRF позволяет выполнять продолжительные многомесячные расчеты без искажения синоптической картины. Это дает возможность получать непрерывные метеорологические поля различных переменных, которые далее могут успешно использоваться в других моделях. Ошибки, полученные при продолжительных расчетах с использованием притягивания высотных метеорологических полей, соизмеримы с ошибками аналогичных кратко-

срочных расчетов (при использовании модели поверхности NOAH LSM для скорости ветра средняя абсолютная ошибка MAE=1,4 м/с и в продолжительном расчете, и в аналогичных краткосрочных расчетах, для направления ветра MAE=24,59 против MAE=24,69). Притягивание поверхностных метеорологических полей позволило дополнительно улучшить результаты и получить ошибки, соизмеримые с ошибками финального анализа (для скорости ветра MAE=1,24 м/с, для направления ветра MAE=22,51 градуса). Использование опции обновления температуры водной поверхности положительно сказывается на моделировании температурных полей и также рекомендуется при продолжительных расчетах (MAE для температуры снизилось с 2,17 °C до 2,05 °C).

Неразрешимой проблемой длительного непрерывного расчета оказалось воспроизведение температур глубоких слоев грунта (больше 50 см). При продолжительном непрерывном расчете модель правильно воспроизводит температуру верхнего слоя грунта, но не способна воспроизводить температуры нижних слоев грунта в соответствии с данными финального анализа. Краткосрочные расчеты не успевают существенно отклониться от начальных температур, взятых из глобальной модели, и поэтому воспроизводят температуры грунта в соответствии с данными финального анализа.

Каждая из исследуемых моделей поверхности показала свои преимущества и недостатки. Модель PLEIM-XIU хорошо себя зарекомендовала при моделировании осадков, но плохо воспроизвела высоту снежного покрова. Модель CLM4 хорошо воспроизвела поля ветра и поля приземных температур, но очень плохо воспроизвела высоту снежного покрова, кроме того, оказалась очень ресурсоемкой. Параметризации RUC LSM (в версии WRF3.8, где нет ошибки, связанной с определением уровня снега) и NOAH LSM в рамках проведенного исследования показали хорошее согласие с измерениями по всем исследуемым параметрам и могут быть рекомендованы для использования в продолжительных непрерывных расчетах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR*. USA, Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008. 125 p. URL: <http://wrf-model.org/>.
2. Rutledge G., Alpert J., Ebusizaki W. Rutledge G. NOMADS – a climate and weather model archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2006. Vol. 87. 341 p.
3. Lo J.C.F., Yang Z.L., Pielke Sr.R.A. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. D09112. DOI: 10.1029/2007JD009216.
4. Staufer D.R., Seaman N.L. Use of four-dimensional data assimilation in a limited area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Mon. Wea. Rev.* 1990. Vol. 118. P. 1250–1277.
5. Miguez-Macho G., Stenchikov G.L., Robock A. Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, D13104. DOI: 10.1029/2003JD004495.
6. Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sens Environ.* 2002. Vol. 83. P. 287–302. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0.
7. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). *U.S. Geological Survey Open-File Report*. 2011. Vol. 1073. 26 p. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1073/pdf/of2011-1073.pdf>.
8. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.9, Updated. 2017. April 17. URL: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.9/contents.html.
9. Халченков А.В., Ковалец И.В., Романенко А.Н. Адаптация метеорологической модели WRF для прогнозирования полей ветра вокруг Ривненской АЭС. *Математичні машини і системи*. 2015. № 1. С. 130–138.

10. Ковалець І.В., Халченков О.В., Ануліч С.М., Удовенко О.І. Оперативне прогнозування метеорологічних полів для систем попередження про паводки у Карпатах. *Математичні машини і системи*. 2015. № 3. С. 118–125.

11. Dudhia J. WRF Four-Dimensional Data Assimilation (FDDA). URL: https://www.climate-science.org.au/sites/default/files/WRF_FDDA_Dudhia.pdf.

Стаття надійшла до редакції 27.01.2020