

УДК номер 504.064.4:658.567.3

**РАСЧЕТ ОСАДКОВ В ПЕРИОД КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ПАВОДКА
21-27 ИЮЛЯ 2008 ГОДА В УКРАИНСКИХ КАРПАТАХ****О.И. Удовенко**, ст. науч. сотрудник
И.В. Ковалец, зав. отделом, д. техн. н.*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины
просп. Глушкова, 42, 03187, Киев, Украина, ik@env.com.ua*

Проведены расчеты осадков в период летнего паводка 2008 г на территории Украинских Карпат с использованием метеорологической модели WRF. Модель хорошо воспроизвела структуру поля осадков в период максимальных паводков (25 июля), что подтверждается сравнением рассчитанных и измеренных осадков и косвенным сопоставлением рассчитанных суммарных осадков по водосборам карпатских рек и измерений расходов в замыкающих створах.

Ключевые слова: паводок, осадки, мезомасштабная метеорология, WRF.

1. ВВЕДЕНИЕ

В Украине 21-27 июля 2008 г. прошли сильные ливневые паводки, которые принесли значительный ущерб экономике страны. Наиболее катастрофические осадки выпали в Прикарпатье; пострадали также некоторые районы Закарпатья, но в меньшем масштабе чем Прикарпатье и Буковина. По своему масштабу июльский паводок в Прикарпатье характеризуется вероятностью превышения 2% и приблизительно соответствует известному летнему паводку 1969 г в карпатском регионе [1]. Известно, что катастрофический характер паводка был связан не только с интенсивной циклонической деятельностью, но также и с усилением осадков под влиянием горного рельефа [2]. Орографическое усиление осадков приводит к очень неравномерному их выпадению по территории. Следовательно, разработка и верификация методов расчета пространственно-временных распределений осадков в горных районах имеет большое значение для прогнозирования метеорологических условий в период паводков, а также для оптимизации ресурсов, необходимых для предотвращения и ликвидации последствий таких паводков.

Моделированию метеорологических условий в период июльского паводка 2008 г. с помощью мезомасштабных метеорологических моделей посвящено несколько работ, например [2,3]. Однако в упомянутых работах не предпринята попытка количественного сравнения результатов расчетов модели с данными измерений. В Закарпатском областном гидрометеорологическом центре для прогнозирования осадков и паводков в Карпатах эксплуатируется оперативная система прогнозирования метеорологических условий на основе мезомасштабных метеорологических моделей MM5 и WRF, разработанная в [4,5]. В работе [6] представлены результаты оперативных прогностических расчетов за июль 2008 г. вышеупомянутой системы в связке с гидрологическими моделями,

настроенными для условий водосборов закарпатских рек Уж, Тисса и Латорица, и показано хорошее согласование результатов расчетов и измерений для этих водосборов. Целью настоящей работы является применение мезомасштабной метеорологической модели WRF с высоким уровнем детализации (1 км), для реконструкции осадков и верификации результатов расчетов в период июльского паводка 2008 г. на всей территории Карпат, в особенности на территории Прикарпатья, где паводки носили наиболее катастрофический характер.

2. ОБЗОР СИНОПТИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ

Детальный обзор синоптической ситуации, вызвавшей выпадение катастрофических осадков в регионе представлен в работах [2,3]. С 21 по 27 июля 2008 г. погода над юго-восточной Европой определялась взаимодействием холодной воздушной массы, поступавшей с северо-запада, с теплой и влажной воздушной массой, смещавшейся с юго-востока. В период 23-25 июля западная часть Украины находилась на северо-восточной периферии высокого малоподвижного циклона, медленно смещавшегося в северо-западном направлении. Движению циклона препятствовал мощный гребень высокого давления, располагавшийся от Гибралтара до Скандинавского полуострова и над северо-восточной частью Европы до Западно-Сибирской равнины. Синоптические карты (например, составленные Британским центром Metoffice [7]), показывают, что 23 июля 2008 г. теплый фронт был расположен поперек гряды Украинских Карпат. При этом возникали скользящие движения воздуха вдоль склонов, которые, в свою очередь, усиливали развитие конвективной облачности. Высотное струйное течение, располагавшееся над средиземноморским и черноморским регионом (рис. 1), способствовало усилению циркуляции в нижних слоях тропосферы над западной Украиной. Это обстоятельство увеличивало интенсивность поступления теплого и влажного воздуха из чер-

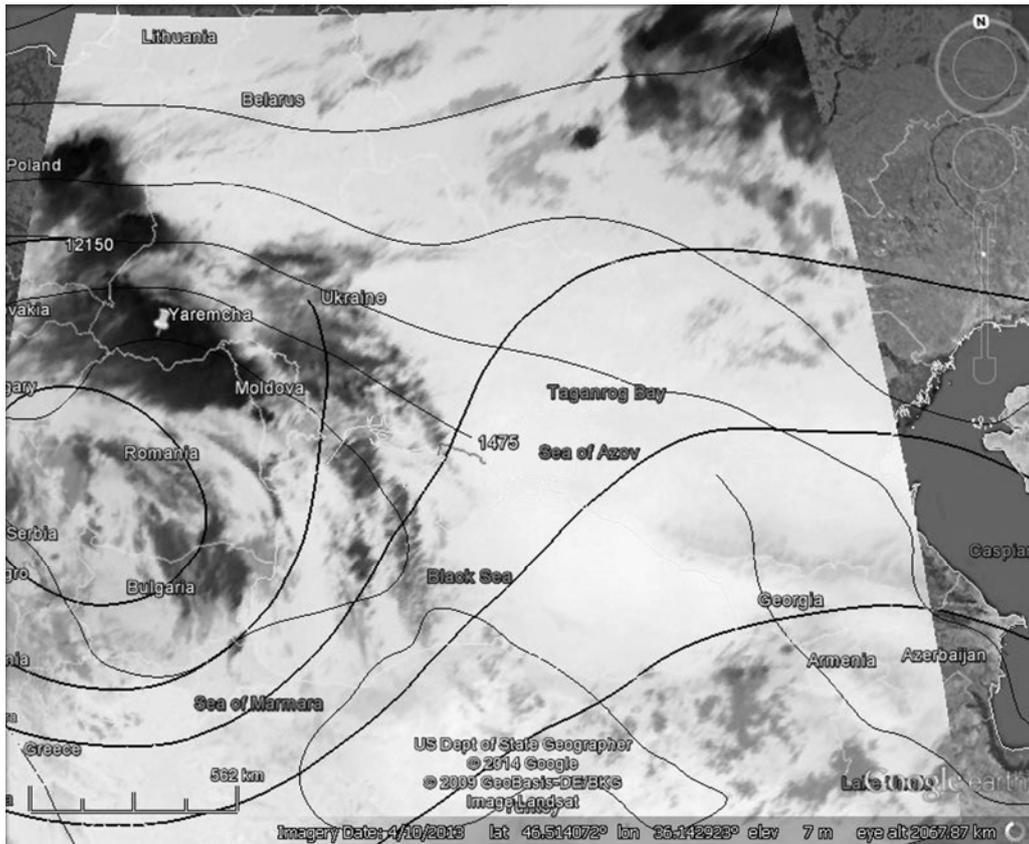


Рис. 1— Карты абсолютной топографии AT850 (шаг изолиний 25 гпм) и AT200 (шаг изолиний 100 гпм) по данным финального анализа NCEP за 24.07.2008, 18:00 и фотография спутника Meteosat для того же времени (длина волны 10.8 мкм).

номорского и кавказского регионов. Этот процесс также способствовал интенсивному развитию конвективной облачности и осадков. Снимок геостационарного спутника Meteosat в инфракрасном диапазоне (длина волны 10.8 мкм), приведенный на рис. 1, характеризует температуру верхней границы облачности [8]. Области, показанные черным цветом на рис. 1, соответствуют температуре верхней границы облаков менее и, соответственно, высоте кучевых облаков свыше 10 км. Спутниковые снимки в видимом диапазоне (см, например, [3]) свидетельствуют об образовании 22 июля мощного вихря сплошной облачности над юго-восточной Европой, окончательно распавшегося только к 27 июля.

3. МЕТОД РАСЧЕТА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Как следует из изложенного в предыдущем разделе, в изучаемом случае выпадение осадков определялось и конвективной неустойчивостью, и вертикальными движениями, возникающими за счет воздействия гор на ветровой поток. Поэтому простые формулы (см. например [9]), связывающие осадки над горами с градиентом высоты рельефа, скоростью и влажностью обтекающего потока, в данном случае едва ли

могут быть использованы для расчета пространственно-временных распределений осадков над Карпатами. Расчетные оценки выпадения осадков могут быть получены, по-видимому, только с помощью полных мезомасштабных моделей гидротермо-динамики атмосферы, учитывающих все основные физические процессы в атмосфере, в том числе, микрофизические процессы образования облаков.

В данной работе для проведения расчетов была выбрана мезомасштабная модель WRF [10], широко используемая в наше время в исследованиях в области мезомасштабной метеорологии. Расчеты производились на последовательности из четырех вложенных областей с горизонтальным шагом сетки 27, 9, 3, 1 км. Разрешение по вертикали во всех четырех областях было одинаковым и равным 28 слоев. Четвертая вычислительная область, с самой детальной сеткой, охватывала район размером 220x180 км, в который попадали Украинские Карпаты. Датой начала расчета было 21 июля 2008 г, 0 ч. Для задания начальных и граничных условий использовались данные финального анализа Национального центра прогнозирования окружающей среды США (NCEP), характеризующиеся горизонтальным пространственным разрешением

равным 1 градус.

В расчетах использовались следующие параметризации физических процессов, описанные в [11]. Для описания процессов микрофизики облаков использовалась параметризация WSM6, включающая, помимо уравнений жидкой и газообразной фаз водяного пара, описание процессов образования и роста кристаллов льда, снега и града. Для описания процессов рассеяния длинноволнового излучения использовалась параметризация «Ускоренного расчета радиационных процессов» (RRTM). Для расчета рассеяния коротковолнового излучения применялась параметризацией Годарда. Процессы турбулентного теплообмена в пограничном слое рассчитывались с помощью параметризации MRF, учитывающей нелокальный характер теплообмена в конвективном пограничном слое. Процессы образования кучевой облачности рассчитывались с помощью параметризации Кейна-Фритца. В четвертой вложенной области параметризация кучевой облачности не применялась, поскольку при горизонтальном шаге сетки 1 км процессы конвективных движений могут быть рассчитаны без параметризации подсеточных конвективных движений [11].

Расчеты проводились на вычислительном кластере ИПММС НАН Украины. Кластер состоит из 4 узлов, на каждом с которых установлено два 4-ядерных процессора Intel(R) Xeon(R) CPU E5405, 2.00 Ghz и 16 Гб оперативной памяти. При использовании параллельного режима расчета на 8-ми ядрах кластера время расчета метеорологических условий за 1 день составляло приблизительно 12 часов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В табл. 1 представлены рассчитанные суточные суммы осадков и данные измерений наземных метеостанций и гидропостов. Исходные измерения в различные дни содержали и 6-, и 12-, и 24- часовые суммы осадков. При этом в 6 ч утра по Гринвичу измерения осадков всегда передавались как с наземных метеостанций, так и с гидропостов. Поэтому наиболее удобным интервалом для составления суточных сумм осадков без привнесения дополнительной погрешности за счет обработки измерений был период между 6 ч утра соседних суток. Следовательно, рассчитанные и измеренные значения осадков, представленные в табл. 1 и на рис. 2, являются суммами между 6 ч утра соответствующих соседних суток.

Как видно из данных измерений, представленных в таблице, практически на всех метеостанциях в Украинских Карпатах, кроме метеостанции Пожежевская, максимальные осадки за изучаемый период наблюдались 25 июля. Рассчитанные осадки за 25 июля согласуются с измерениями. Согласно измерениям, 27 июля снова наблюдалось усиление осадков в южной и юго-восточной части Украинских Карпат. Этот

Таблица 1— Рассчитанные и измеренные на различных станциях суточные суммы осадков (мм)

Станция	WRF/Изм.	22.07	23.07	24.07	25.07	26.07	28.07
Плай	Изм.	4	28	23	56	23	41
	WRF	3	13	10	43	11	0
Рахов	Изм.	0	8	22	78	7	42
	WRF	0	27	3	29	0	52
Славское	Изм.	2	11	16	73	26	58
	WRF	3	9	6	71	27	1
Пожежевск.	Изм.	1	30	36	67	45	88
	WRF	0	29	1	27	8	63
Межгорье	Изм.	0	17	23	60	19	14
	WRF	0	9	8	49	9	6
Нижн. Студ.	Изм.	1	14	12	38	26	31
	WRF	2	11	2	16	33	1
Яремче	Изм.	1	44	47	104	54	83
	WRF	0	18	1	85	33	13
Нижн. Вор.	Изм.	3	7	10	41	23	31
	WRF	4	14	11	54	10	0
Жорнава	Изм.	14	7	13	43	14	9
	WRF	1	5	10	53	3	0
Вел. Березн.	Изм.	9	7	5	35	9	3
	WRF	9	13	19	27	7	0
Зарицево	Изм.	8	10	8	37	17	11
	WRF	1	12	9	38	3	0
Ужгород	Изм.	3	15	8	26	6	6
	WRF	1	10	8	51	4	0
Черноголова	Изм.	10	7	9	36	19	21
	WRF	1	7	5	39	4	0
Турья Пол.	Изм.	4	7	8	45	14	17
	WRF	1	10	8	39	8	0
Симер	Изм.	2	12	9	39	16	4
	WRF	1	12	11	41	2	0

процесс недостаточно точно воспроизводится моделью, которая существенно занижает осадки за 27 июля для большинства метеостанций.

На рис. 2 показаны рассчитанные распределения суточных сумм осадков в четвертой вычислительной области WRF за период 21-27 июля. Изолиния соответствует величине осадков 1 мм. Точками показаны соответствующие значения измерений метеостанций, места расположения которых также показаны на рисунке. Как показывают расчеты, основные пятна осадков за 25 и 26 июля расположены параллельно горной гряде, что указывает на существенную роль рельефа в формировании осадков. Как видно из приведенных на данном рисунке результатов, основная часть пятна осадков, рассчитанных моделью для 25 июля, находится между измерительными станциями. Основное пятно осадков за 27 июля находится в юго-восточной части вычислительной области, при этом максимум выпадений расположен практически на границе вычислительной области. Поэтому на результатах расчетов может негативно сказываться влияние границ области, что, вероятно, и приводит к худшим результатам модели за 27 июля по сравнению с результатами за 25 июля.

На рис. 3 представлены вертикальные сечения полей скорости (стрелки), вертикальной скорости (зали-

вка) и потенциальной температуры (изолинии) за 25.07.2008, 18 ч. В это время, согласно расчетам, особенно большие осадки выпали посредине между станциями Славское и Яремча (до 70 мм/3 ч). Шаг изолиний потенциальной температуры равен 2.5 градуса. Векторы скорости представлены для каждого второго расчетного узла. Сечения проведены вдоль линий A1B1 слева и A2B2 справа, а расположение точек A1, B1, A2, B2 показано на рис. 2. Таким образом, сечение A1B1 перпендикулярно горной гряде, а сечение A2B2 параллельно гряде.

На изолиниях потенциальной температуры, представленных на рис. 3, видно характерную систему волн, возникающих при обтекании рельефа стратифицированным слоем атмосферы. Восходящие дви-

жения, представленные на рис. 3 оттенками черного цвета, чередуются с нисходящими движениями (белый цвет). Характерный горизонтальный размер «ячеек» восходящих движений – около 10 км, а по высоте эти движения во многих местах превышают 10 км, что соответствует спутниковому снимку на рис. 1. Места расположения восходящих движений преимущественно коррелируют с расположением наветренных склонов, хотя в некоторых местах такие движения возникают и на подветренных склонах, что говорит о большой конвективной неустойчивости.

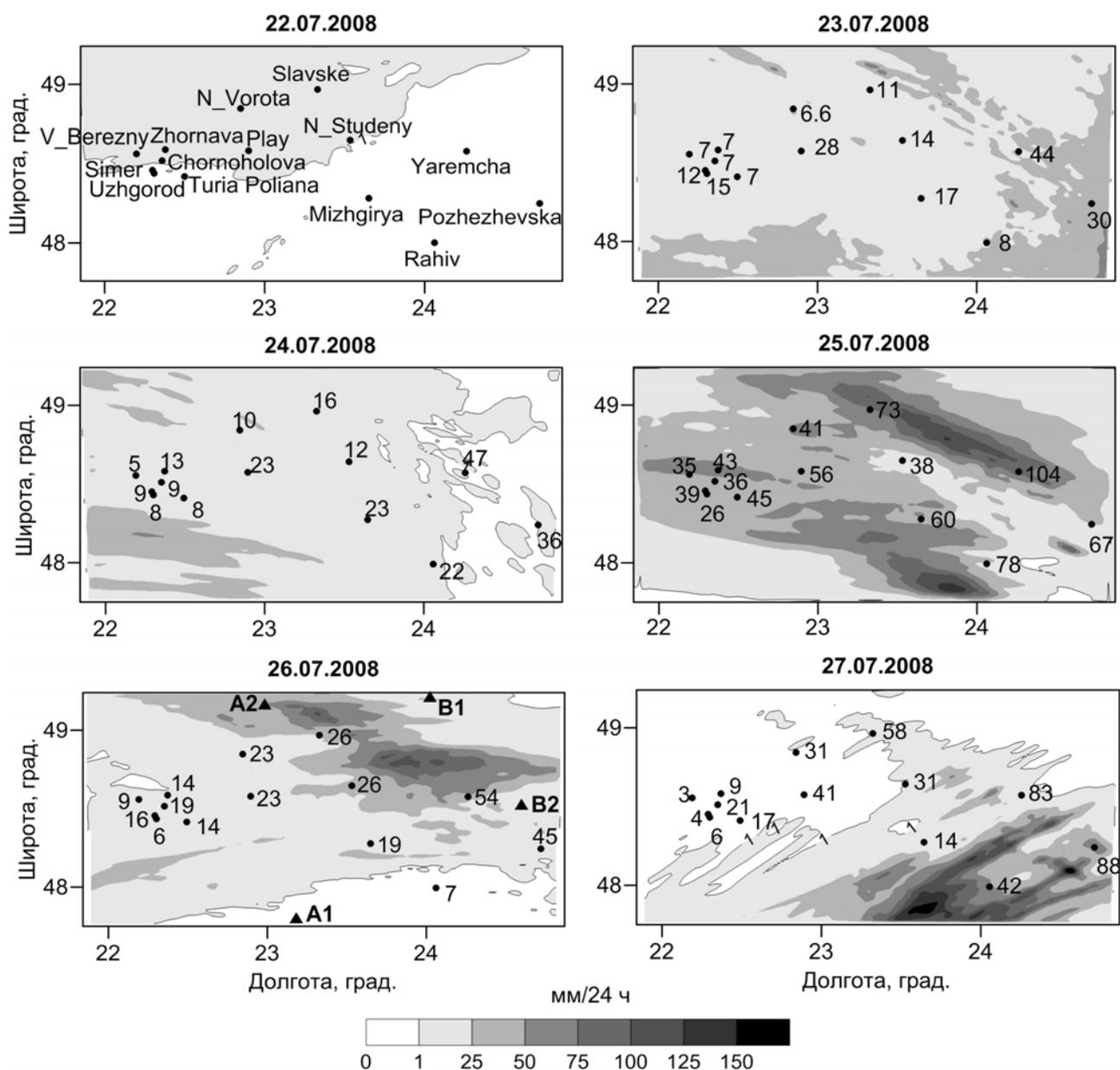


Рис. 2– Распределения суточных осадков по результатам расчетов WRF и соответствующие результаты измерений метеостанций.

Как было упомянуто выше, сеть метеорологических измерений в Прикарпатье слишком редка для того, чтобы адекватно представить структуру осадков в горных районах. Поэтому, помимо сравнения измеренных и рассчитанных осадков в местах расположения метеостанций, представляют интерес и другие, не прямые методы верификации данных расчетов. Например, можно предположить, что в период максимального паводка суточный сток с небольших горных водосборов будет приблизительно пропорционален интегральному количеству осадков по соответствующему водосбору. В период максимального паводка, 25 июля, наибольшие выпадения наблюдались на водосборах соседних рек Стрый, Свича, Лимница, Ворона (область между станциями Нижний Студеный и Яремча на рис. 2).

Обозначим суммарные выпадения осадков по i -му водосбору $P_i = \iint_{S_i} p(x, y) dx dy$, где S_i – пространственная область i -го водосбора, $p(x, y)$ – суточные суммы осадков в данной точке (x, y) . Обозначим Q_i – среднесуточный расход в замыкающем створе соответствующего водосбора. Тогда из высказанного выше предположения следует, что в период максимального паводка должно выполняться

$$Q_i / \sum_{i=1}^n Q_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

В табл. 2 представлены рассчитанные значения для соседних водосборов Стрый, Свича, Лимница и Ворона за 25 июля 2008 г. В таблице представлены также значения измерений в соответствующих замыкающих створах: Верхнее Синевидное (Стрый), Перевозец (Лимница), Ворона (Тисменница). В замыкающем створе водосбора Свича (примыкающего к водосбору Стрый) не проводились измерения расходов. Поэтому для этого водосбора в табл. 2 представлена косвенная оценка расхода, полученная по формуле $Q_{\text{Свича}} = Q_{\text{Стрый}} \cdot A_{\text{Свича}} / A_{\text{Стрый}}$. Здесь $A_{\text{Свича}}$, $A_{\text{Стрый}}$ – площади соответствующих водосборов. Как видно из данных, представленных в табл. 2, соотношение (1) выполняется с хорошей точностью. Используя данные, представленные в табл. 2, можно проверить, что при исключении водосбора Свича из анализа, соотношение (1) по-прежнему будет выполняться. Таким образом, выполнение соотношения (1) также свидетельствует о хорошей точности рассчитанных осадков в период максимального паводка.

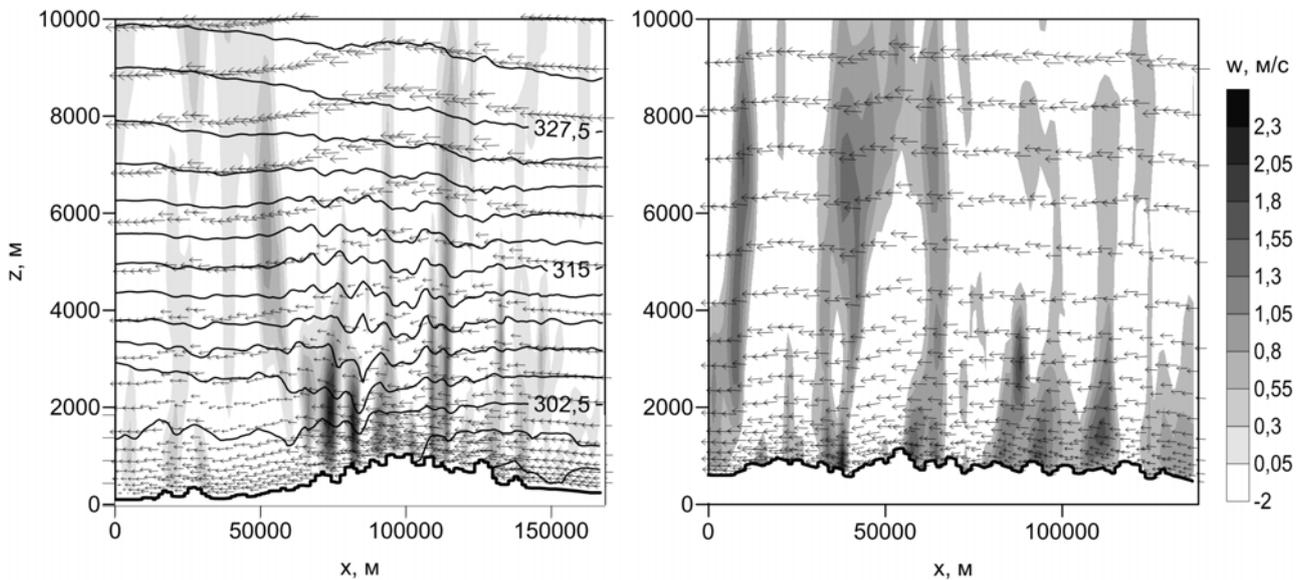


Рис. 3 – Вертикальные распределения потенциальной температуры, поля скорости и вертикальной компоненты скорости по результатам расчетов для 25.07.2008, 18 ч.

Таблица 2 – Осадки по трем водосборам за 25-е июля 2008 г., и соответствующие расходы в замыкающих створах; относительные (к сумме по водосборам) осадки и расходы

Характеристика	Стрый	Свича	Лимница	Ворона	Сумма
Расход, м ³ /с	1350	873	858	90	3171
Осадки (сумма по водосбору, 10 ³ м ³)	137229	85699	79808	9972	312708
Отн. расход (Q_i , %)	42.6	27.5	27.1	2.8	100
Отн. осадки (P_i , %)	43.9	27.4	25.5	3.2	100

5. ВЫВОДЫ

В настоящей работе проведено исследование по применению мезомасштабной метеорологической модели WRF с высоким уровнем детализации (1 км), для реконструкции осадков и верификации результатов расчетов в период летнего паводка 21-27 июля 2008 г. на территории Украинских Карпат. Приведенные результаты расчетов и их верификация на основе данных измерений показывают, что WRF может достаточно точно воспроизвести катастрофические конвективные осадки в Украинских Карпатах, обусловленные взаимодействием крупномасштабных атмосферных движений со сложной подстилающей поверхностью. В частности, показано что:

1. Модель очень хорошо воспроизвела структуру поля осадков 25 июля 2008 г. – в период максимальных паводков на горных водосборах Украинских Карпат. Высокое качество результатов модели за 25 июля подтверждается не только сравнением рассчитанных и измеренных осадков, но и косвенным сопоставлением рассчитанных суммарных осадков по водосборам карпатских рек и измерений расходов в соответствующих замыкающих створах;

2. Осадки, выпавшие в конце изучаемого паводкового периода, 27 июля, особенно в юго-восточной части Украинских Карпат, в расчетах WRF были сильно занижены. Это, видимо, связано со сравнительно небольшим размером вычислительной области и влиянием граничных условий на результаты расчетов.

Как показывают расчеты, существующая в северо-восточной части Украинских Карпат сеть гидрометеорологических измерений слишком редка, что затрудняет адекватную оценку максимумов и интегральных характеристик осадков в бассейнах карпатских рек для задач моделирования паводков. В дальнейших исследованиях планируется использовать модель WRF в цепочке с распределенными гидрологическими моделями для расчета и прогнозирования гидрологических характеристик паводков на водосборах всех рек в Украинских Карпатах, как это сделано в работе [12] на примере водосбора р. Уж.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность к.геогр.н. А.А. Кривобоку, зав. лаб. УкрНИГМИ за предоставление и помощь в интерпретации спутникового снимка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сусідко М.М. Особливості формування дощових паводків у басейні Дністра / М.М. Сусідко, Н.В. Приймаченко // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2008. – № 1. – С. 76-80.
2. Белый Т.А. Численные исследования различных механизмов осадкообразования на эволюцию мезомасштабных облачных

образований, обусловивших сильные осадки в Карпатах 21-29 июля 2008 г. / Т.А. Белый, С.Н. Дударь, А.М. Пирнач // Геофизический журнал. – 2009. – Т. 31, №6. – С. 107-123.

3. Пирнач Г.М. Чисельні дослідження хмарних утворень, які спричинили катастрофічні опади у Прикарпатті/ Г.М. Пирнач, Т.А. Білий, С.М. Дудар // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2010. №. 259. – С. 5-25.
4. Гузий А.М. Система численного прогноза погоды WRF-Украина / А.М. Гузий, И.В. Ковалец, А.А. Кушан [и др.] // Математические машины и системы. – 2008. – №4. – С. 123–131.
5. Ковалець І.В. Технології моделювання метеорологічних процесів із засвоєнням даних вимірювань для систем підтримки прийняття рішень. Дис. доктора тех. наук : 05.13.06 / І.В. Ковалець / Інститут проблем математичних машин та систем НАН України. – Київ, 2011. – 350 с.
6. Бойко О. Моделювання катастрофічного паводку в карпатському регіоні в липні 2008 р. каскадом метеорологічних та гідрологічних моделей / О. Бойко, І.В. Ковалець, М.Й. Железняк, [та ін.] // Тези доп. IV-ї міжнар. конф. “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС’2009”, (Київ, 22–26 червня 2009 р.). – К.: НАН України, Ін-т проблем математичних машин і систем, 2009. – С. 21–24.
7. *Archiv der 00 UTC UKMO-Bracknell-Bodenanalysen*. Available at: <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkfaxbraur.htm>
8. Кривобок А.А. Определение температуры верхней границы облачности по данным геостационарного спутника MSG. Часть II. / А.А. Кривобок // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2007. – № 256. – С. 373-388.
9. Smith R. *Mountain Meteorology and Regional Climates*. In: *Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology*. Cambridge University Press. Cambridge, 2004, pp.193-222 (Eds: E. Fedorovich, R. Rottuno, B. Stevens).
10. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G. *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.
11. Stensrud D.J. *Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models*. Cambridge University Press, UK, Cambridge, 2007, 459 p.
12. Kovalets I.V., Kivva S.L., Udovenko O.I. Usage of the WRF-DHSVM model chain for simulation of extreme floods in mountainous areas: a pilot study for the Uzh River Basin in the Ukrainian Carpathians. *Natural Hazards*, 2015, Vol. 75, No. 2, pp. 2049-2063.

REFERENCES

1. Sosydedko M.M. Osoblyvosti formuvannja doshovykh pavodkiv u basejni Dnistra [Peculiarities of rain floods forming in the Dniester river basin]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolojiia – Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 2008, № 1, pp. 76-80.
2. Belyi T.A. Dudar S.N., Pirnach A.M. Chislennyye issledovaniya razlichnykh mekhanizmov osadkoobrazovaniya na evolyutsiyu mezomasshtabnykh oblachnykh obrazovaniy, obuslovivshikh silnyye osadki v Karpatakh 21-29 iyulya 2008 g. [Numerical investigation of different mechanisms of precipitation formation on evolution of mesoscale clouds, creating extreme precipitation in Carpathians on 21-29 July 2008]. *Geofizicheskii Zhurnal - Geophysical Journal*. 2009, Vol. 31, №6, pp. 107-123.
3. Pirnach Gh.M., Bilyj T.A., Dudar S.M. Chyseljni doslidzhennja khmarnykh utvorenj, jaki sprychynly katastrofichni opady u Prykarpatti [Numerical investigations of cloud formations that caused catastrophic precipitation in Prykarpattia]. *Nauk. praci UkrNDGhMI – Proceedings of the Ukrainian Hydrometeorologi-*

- cal Institute. 2010, № 259, pp. 5-25.
4. Guziy A.M., Kovalets I.V., Kuschan A.A., Zheleznyak M.I. Sistema chislennogo prognoza pogody WRF-Ukraina [Numerical weather forecasting system WRF-Ukraine]. *Matematicheskie mashiny i sistemy – Mathematical Machines and Systems*. 2008, №4, pp. 123–131.
5. Kovalets I.V. *Tekhnologiji modeljuvannja meteorologichnykh procesiv iz zasvojenjam danykh vymirjuvanj dlja system pidtrymky pryjnjattja rishenj*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Technologies of meteorological processes modeling with assimilation of measurement data for decision support systems. Dr. tech. sci. diss.]. Kiev, Institute of Mathematical Machines and Systems Problems, 2011. 350 p.
6. Boyko O., Kovalets I.V., Zheleznyak M.I., Guziy O.M. Modeljuvannja katastrofichnogho pavodku v karpatskomu rehioni v lypni 2008 r. kaskadom meteorologichnykh ta gidrologichnykh modelej [Simulation of catastrophic flood in July, 2008 with the model chain of hydrological and meteorological models]. *Tezy dop. IV-ji mizhnar. konf. "Matematyčne ta imitacijne modeljuvannja system. MODS'2009"* [Proc. of 6-th Int. Conf. "Mathematical Modeling and Simulation of Systems MODS2015"], Kiev, Institute of Mathematical Machines & Systems Problems NAS of Ukraine, 22-26 June 2009, pp. 21–24.
7. *Archiv der 00 UTC UKMO-Bracknell-Bodenanalysen*. Available at: <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkfaxbraar.htm>
8. Kryvobok A.A. Opredelenie temperatury verkhney granitsy oblachnosti po dannym geostatsionarnogo sputnika MSG. Chast II. [Determination of cloud top temperature using the data of the geostationary satellite MSG]. *Nauk. praci UkrNDGhMI – Proceedings of the Ukrainian Hydrometeorological Institute*. 2007, № 256, pp. 373-388.
9. Smith R. *Mountain Meteorology and Regional Climates*. In: *Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology*. Cambridge University Press. Cambridge, 2004, pp. 193-222 (Eds: E. Fedorovich, R. Rottuno, B. Stevens).
10. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G. *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.
11. Stensrud D.J. *Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models*. Cambridge University Press, UK, Cambridge, 2007, 459 p.
12. Kovalets I.V., Kivva S.L., Udovenko O.I. Usage of the WRF-DHSVM model chain for simulation of extreme floods in mountainous areas: a pilot study for the Uzh River Basin in the Ukrainian Carpathians. *Natural Hazards*, 2015, Vol. 75, No. 2, pp. 2049-2063.

CALCULATION OF PRECIPITATION DURING PERIOD OF CATASTROPHIC FLOOD 21-27 JULY 2008 IN UKRAINIAN CARPATHIANS

O.I. Udovenko, Senior Researcher

I.V. Kovalets, Head of Department, Doctor of Sciences

*Institute of Mathematical Machines & Systems Problems NAS of Ukraine,
42, Prosp. Glushkova, 03187 Kiev, Ukraine*

Intense precipitation event happened in Ukraine on 21-27 July 2008 leading to extreme flash floods in the Ukrainian Carpathians which are characterized by the return period of approximately 50 years. Besides favourable synoptic conditions leading to quasi-stationary low situated over Balkans and South-West part of Ukraine precipitation during this event was intensified by mountains. This lead to formation of the specific precipitation patterns in the Ukrainian Carpathians which was not adequately resolved by the existing measurement network.

The purpose of this publication is application of the mesoscale meteorological model WRF with high resolution (1 km) for reconstruction of precipitation during flood in July, 2008 in the Ukrainian Carpathians and evaluation of the simulated results against measurements.

Calculation of precipitation during the period of catastrophic summer flood in 2008 at the territory of Ukrainian Carpathians had been carried out with the use of meteorological model WRF. The precipitation field was well simulated for the period of maximum floods (July, 25-th) as compared to precipitation data measured at meteorological stations. However the second and lower peak of precipitation which happened during July, 27-th was underestimated by WRF. The reason of such underestimation is possibly the influence of boundary conditions on simulated results. The precipitation field formed during July, 25-th is elongated along the main ridge of the Ukrainian Carpathians and precipitation maximums on that date, reaching up to 70 mm/3 hours are situated above foothills of the Carpathians. On July, 27-th the precipitation maximums are shifted south-eastward, close to the boundary of the computational domain. The vertical crosssections of the calculated meteorological fields demonstrate characteristic system of gravitational waves occurring in flow above mountains and sequence of convective cells situated mostly above the windward (north-eastern) hills and coinciding with the precipitation maximums. The depth of some of the convective cells reaches 10 km, which is supported by satellite data. The indirect evaluation of the calculated precipitation field is performed using the measured water discharge data at the watersheds of the rivers in Carpathians. For the period of max-

imum flood the relative precipitation amount at each watershed (over total precipitation amount at all watersheds) appears to be approximately equal to relative water discharge of the corresponding watershed.

In conclusion we could state that the precipitation field was well simulated by WRF for the period of maximum floods (25 July). High quality of simulated results is supported by comparison of the calculated and measured precipitation as well as with indirect juxtaposition of the calculated integral precipitation at the watersheds of Carpathian rivers and water discharges in the corresponding river outlets. The calculated results demonstrate that existing measurement network is too sparse to capture the details of the orographically enhanced precipitation field. The scarcity of the measurement network makes it difficult to evaluate integral and maximum characteristics of precipitation happening in the Ukrainian Carpathians.

Directions for further research should include usage of the coupled mesoscale meteorological-distributed hydrological model chain for calculation and forecasting of meteorological and hydrological characteristics of floods.

Keywords: flood, precipitation, mesoscale meteorology, WRF.

РОЗРАХУНОК ОПАДІВ У ПЕРІОД КАТАСТРОФІЧНОГО ПАВОДКУ 21-27 ЛИПНЯ 2008 РОКУ В УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТАХ

О.І. Удовенко, старший науковий співробітник

І.В. Ковалець, завідувач відділу, доктор технічних наук

*Інститут проблем математичних машин та систем НАН України,
просп. Глушкова, 42, 03187, Київ, Україна, ik@env.com.ua*

Проведено розрахунки опадів у період літнього паводку 2008 р. на території Українських Карпат із застосування метеорологічної моделі WRF. Модель добре відтворила структуру поля опадів у період максимальних паводків (25 липня). Висока якість результатів моделі підтверджується порівнянням розрахованих і виміряних опадів і непрямим співставленням розрахованих сумарних опадів по водозборам карпатських річок і вимірів витрат у відповідних замикаючих створах.

Ключові слова: паводок, опади, мезомасштабна метеорологія, WRF.

Дата першого представлення: 25.07.2014

Дата поступлення окончательной версии: 14.05.2015

Дата опублікування статті: 26.11.2015