

Т. А. Белый, А. М. Пирнач

## Численное моделирование сильных осадков в Прикарпатье

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

*Проведено аналіз умов формування опадів над Україною впродовж синоптичного періоду з 21 по 27 липня 2008 р. під час сильних паводків в східних Карпатах. Використовувалися діагностичні та прогностичні моделі фронтальних мезомасштабних хмарних утворень, розроблені в УкрНДГМІ. Чисельні експерименти проводилися для фронтальних смуг і конвективних утворень різних масштабів, які давали сильні опади над гірськими масивами східних Карпат і прилеглих територій. Визначені ключові динамічні та мікрофізичні параметри, які привели до утворення сильних опадів, що зумовили катастрофічні паводки.*

Наводнения в Карпатах — это достаточно опасное явление, которое часто приводит к разрушительным последствиям. Они были предметом многих исследований, но больше изучались их гидрологические особенности. Метеорологическим аспектам этого явления уделялось значительно меньше внимания, а численное моделирование отдельных кучевых образований, связанных с конкретными регионами, вообще является достаточно редким явлением. Это связано со значительными трудностями математического характера, с недостаточным количеством данных зондирования атмосферы и т. д.

Попытка такого моделирования была осуществлена, например, в [1–3], где исследовались случаи весенних и осенних паводков, а облачность исследуемых переходных периодов характеризовалась преимущественно слоисто-кучевыми облаками.

В данной работе рассмотрен случай сильного наводнения в Прикарпатье в летний период (21–27 июля 2009 г.). Сопровождавшие его фронтальные системы состояли преимущественно из конвективных образований, что потребовало существенной модификации алгоритма расчета, представленного в [1].

Главным предметом исследования в обоих случаях были фронтальные облачные системы, дававшие сильные осадки. Фронтальные облака переходных и летних периодов отличаются между собой по физической природе. В первом случае преобладают слоистые облака с кучевыми вкраплениями (затопленная конвекция). Сложность их моделирования заключается в необходимости моделирования мезомасштабных процессов порядка сотен километров с масштабами порядка нескольких километров. Эта же проблема остается и для второго случая — фронтальных облаков летнего периода, где значительно больший вес имеет кучевая облачность. Масштабы таких кучевых образований определяются десятками километров.

Для численного моделирования были использованы прогностические модели с учетом орографии, теоретические основы которых были заложены в [1, 2, 4, 5]. Запишем систему уравнений в схематическом виде в “Z-сигма” системе координат  $\xi, \eta, \zeta$ :

$$\frac{dS_i}{dt} = F_i + \Delta S_i; \quad \frac{\partial \rho u}{\partial \zeta} + \frac{\partial \rho v}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho w}{\partial \xi} = 0; \quad \rho = \frac{p}{RT};$$

$$S_i = (u, v, w, T, q, f_k), \quad i = 1, 2, \dots, 8; \quad k = 1, 2, 3,$$
(1)

где  $t$  — время;  $u, v, w$  — компоненты скорости ветра вдоль осей  $\xi, \eta, \zeta$ , направленные соответственно на восток, север и перпендикулярно к земле;  $\rho$  — плотность воздуха;  $p, T$  — давление и температура воздуха;  $R$  — газовая постоянная сухого воздуха;  $q$  — удельная влажность воздуха;  $f_k$  — функции распределения облачных частиц и частиц осадков по размерам (мелкие капли, дождевые капли, кристаллы);  $\Delta S_i$  — турбулентный перенос;  $F_i$  — описывают отдельные физические процессы ( $F_1 - F_3$  представляют правые части уравнений для проекций скорости, учитывающие ускорение Кориолиса, ускорение силы тяжести, градиенты давления и т. д. [5, 6];  $F_4 - F_5$  описывают притоки тепла и влаги [4, 5];  $F_6 - F_8$  описывают процессы переноса облачных частиц и осадков, конденсационные и коагуляционные процессы, скорость зарождения капель кристаллов, падения частиц и др. [5]).

Система решалась методом расщепления на отдельные подсистемы [5]. Существенно модифицирован был алгоритм расчета вертикальных движений. Поскольку конвективные образования, которые давали осадки, были очень мощными, область интегрирования была продлена до высоты 15 км, что создавало дополнительные трудности при вычислении процессов в районе тропопаузы. Поэтому, в процессе расчета, область интегрирования разбивали на отдельные слои по высоте в зависимости от скорости роста вертикальных движений и месторасположения относительно тропопаузы.

Начальные поля динамических и термодинамических метеовеличин рассчитывали с помощью диагностических моделей, которые описаны в [2, 5]. Исходным фактическим материалом для моделирования служили ежедневные данные радиозондирования сетевых аэрологических станций Британского центра атмосферных данных (BADC).

Были построены трехмерные диагностические численные модели атмосферы для периода 20–27 июля. Они использовались для диагноза состояния атмосферы в выбранный момент времени и для построения начальных полей при моделировании эволюции облачности и осадков.

Спутниковые снимки за этот период четко показывают образование и развитие ярко выраженного вихря со сплошной облачностью, который в ночь с 21 на 22 июля состоял из отдельных более мелких вихрей. В ночь с 22–23 июля они слились в сплошную массу, которая 23–24 июля начала распадаться на отдельные вихри.

Погода над восточными Карпатами определялась влиянием холодного фронта, который 22 июля, двигаясь с северо-запада, встретился с теплой воздушной массой, перемещавшейся с востока. Эволюция температуры в восточной части Карпат характеризовалась притоком холодного воздуха с северо-запада вдоль склонов 21–22 июля и встречным потоком теплого и влажного воздуха с востока и юго-востока. Встреча этих двух воздушных масс обусловила интенсивное развитие конвективной облачности и сильные осадки. Сверхмощные кучевые облака пробивали тропопаузу, которая превышала 10 км, а в некоторых случаях достигали 15 км.

Иной по физическому развитию процесса была воздушная масса, размещенная на северо-востоке от Карпат и на левом берегу Днестра. В этом районе более сильным было влияние северных и северо-восточных воздушных потоков. Контрасты температуры и влажности здесь были гораздо меньше, а образовавшаяся облачность была слоистой с вкраплениями отдельных конвективных облаков. На северо-востоке области источники влаги не были такими интенсивными, но занимали обширные площади, и по притоку влаги в заданный район могли конкурировать с более интенсивными юго-западными источниками.

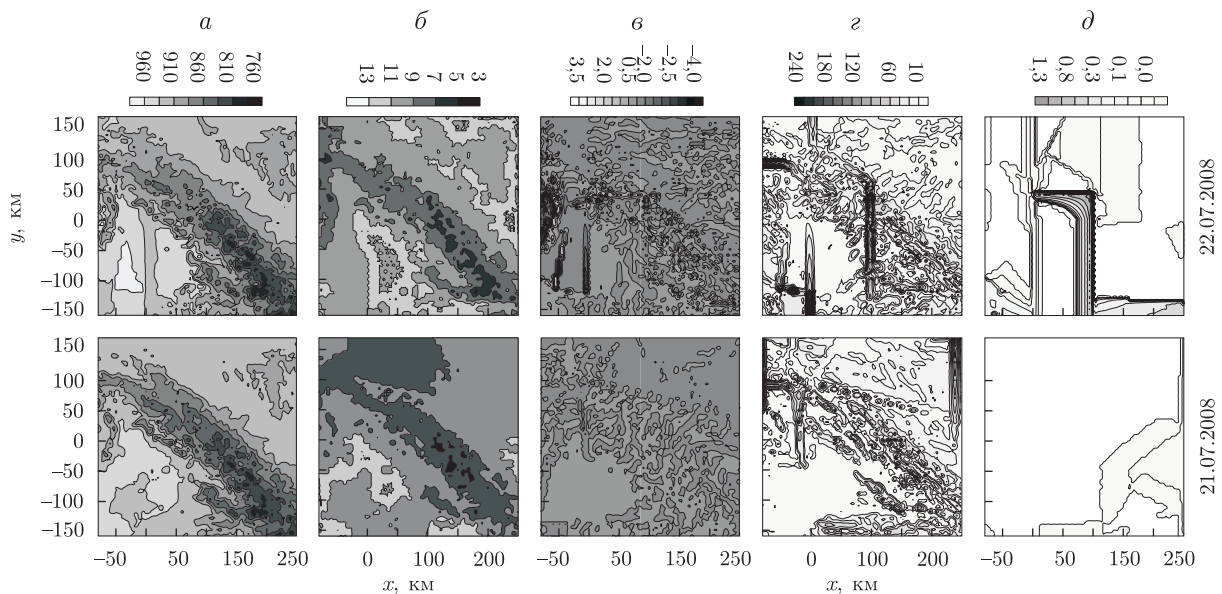


Рис. 1. Распределение метеорологических характеристик на высоте 1 км и интегральные характеристики облачности за 21–22.07.08, 23.30.

Ряд 1 — 22.07.08. Ряд 2 — 21.07.08. *a* — давление, гПа; *б* — температура, °С; *в* — вертикальная составляющая вихря,  $10^{-3}/\text{с}$ ; *г* — максимальные по высоте скорости восходящих движений, см/с; *д* — интегральное по высоте пресыщение по отношению ко льду, мм (соразмерное с суммой осадков)

На рис. 1 показаны характеристики атмосферы, рассчитанные с помощью трехмерных численных диагностических моделей для двух моментов зондирования атмосферы (23 ч 30 мин, 21 и 22 июля). С помощью вложенной сетки на рисунке более детально отображена область, охватывающая украинские Карпаты. Шаг вложенной сетки по горизонтали равняется 5 км, по вертикали — 200 м.

Как видно из рисунка, распределения представленных характеристик имеют пятнистую структуру с вкраплениями полос различной длины. Структура поля давления вмещает отдельные замкнутые области не только в горах, но и на относительно ровных поверхностях. Структура вихря характеризуется наличием мезомасштабных вихрей разных размеров и направлений движения, в них иногда вкраплены характерные цепочки, которые помечают путь отдельных организованных возмущенных потоков. Похожую структуру имеют и вертикальные движения. Количество ядер восходящих движений в горах больше, чем на равнине, а масштабы у них меньше. Мезомасштабные ячейки малых размеров встречаются и на относительно ровной местности. Они предопределены не только рельефом, но и особенностями перемещения разнонаправленных потоков, которые встречаясь, обуславливают возмущения разных масштабов и разной физической природы.

Характеризуя отличия между распределением метеорологических характеристик, рассчитанных для начального и развитого состояния процессов, особое внимание следует обратить на распределение вихрей и вертикальных движений.

21 июля вихревая деятельность была спокойнее, облака были кучевые, и распределялись отдельными ячейками, расположенными в основном над горами. 22 июля развитие облачности и осадков было интенсивнее и характеризовалось большей плотностью ядер

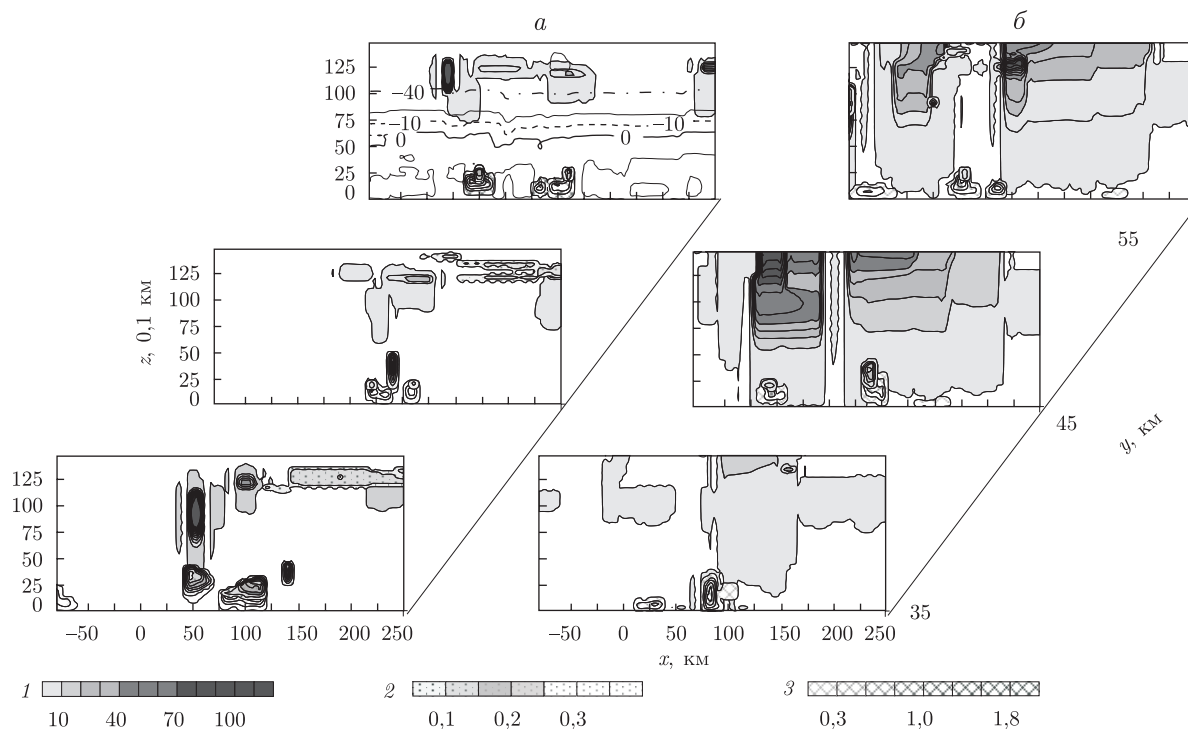


Рис. 2. Пространственное распределение характеристик облачности после 2 ч развития с различными начальными состояниями атмосферы.

Цифры возле шкал: 1 — концентрация кристаллов, 1/г; 2 — насыщение относительно льда, г/кг; 3 — влажность, г/кг. Цифры у изолиний — температура

и отдельных полос. Насыщение относительно льда по площади и величине значительно превышало наблюдавшееся 21 июля.

Основное ядро с пересыщением пара относительно льда было размещено к югу от отображенной на рис. 1,  $d$  области и было связано с ядром облачности, отмеченным спутниковыми снимками. Узкие потоки водяного пара, которые пробивались через рельеф с юга и запада, встречались в Карпатах в бассейне рек Стрый и Днестр и способствовали образованию конвективных облаков. На пути этого потока поблизости Ивано-Франковска и высокогорной части украинских Карпат (г. Говерла и соседние вершины) также возникали конвективные образования.

В ячейках наиболее сильных осадков были мощные конвективные образования, отображенные на рис. 2. Эти облака были получены путем интегрирования системы (1) при начальном состоянии: а)  $t = 0$  (23.30, 21.07.08), б)  $t = 0$  (23.30, 22.07.08).

Они характеризовались кристаллическими вершинами, смешанными прослойками под ними, насыщением относительно льда и сильными восходящими и нисходящими движениями, достигавшими в отдельных случаях 10 м/с. Такие восходящие движения достаточно редкие, но они четко указывают на возможность возникновения катастрофических осадков. Особой роли кристаллических вершин в образовании сильных осадков уделялось внимание многих исследователей [7–9]. В данном случае их присутствие имело определяющее влияние на интенсивность осадков в ночь с 22 на 23 июля.

Влияние кристаллических вершин с большой концентрацией кристаллов усиливалось наличием высокорасположенных (около 15 км) перистых облаков, содержащих большое ко-

личество мелких кристаллов, постоянно засевающих нижележащие кристаллические вершины кучевых облаков.

Области с насыщением относительно льда, облаками и сильными восходящими движениями не всегда совпадают. Это обусловлено разницей между скоростями движения облачных систем в целом, и отдельных частей в заданной области, т. е. относительным движением отдельного малого мезомасштабного пятна к системе в целом. Последнее не исключает возможности выпадения осадков в насыщенные слои и последующего их роста, если эти области размещены рядом.

Если же под кристаллическими облаками размещены смешанные прослойки или области с насыщением относительно льда, то складывались наиболее благоприятные условия для получения сильных, а то и катастрофических осадков. Такие области чаще появлялись 22 июля и значительно реже 21 июля.

Особенного внимания требуют расчеты интенсивности осадков. Их абсолютная величина в значительной степени определяется интенсивностью механизмов образования облаков и осадков. Гипотеза о том, что вся образованная в облаках твердая и жидкая субстанция выпадает из облака в данном случае достаточно далека от реальности. Численные эксперименты показали, что изменение интенсивности механизмов образования осадков может изменить их величину на порядок, а то и больше.

На рис. 3 приведена эволюция облачности и осадков за 21–23 июля 2008 г. в предположении, что параметры осадкообразования имеют среднестатистические значения [1, 5] и присутствует коагуляция мелких капель с крупными, и с кристаллами.

Если проанализировать рис. 3 можно отметить, что намного более сильные и занимавшие большую площадь осадки наблюдались 22–23 июля. Но и 21–22 июля при достаточно интенсивных механизмах осадкообразования, осадки в отдельных местах могли быть сильными. Например, следует обратить внимание на два ряда кучевых облаков, обнаруженных вблизи точки  $(x; y) = (50; 50 \text{ км})$ , интенсивность осадков из которых достигала 8 мм/ч.

Характерным для 22 июля было образование слоистой облачности на северо-востоке Карпат и на левом берегу Днестра. Как показало последующее численное моделирование, осадки были здесь не слишком сильными, но занимали значительно большие площади, чем в горах.

После проведения анализа фактического материала и полученных при моделировании результатов можно сделать вывод, что ключевые параметры, определяющие избыточное количество осадков предопределены постоянным притоком влаги, доставленной разными воздушными массами. Наиболее сильная осадкообразующая активность наблюдалась тогда, когда несколько течений сливались в одно. Тогда интенсивное образование вихрей и мощных конвективных облаков резко увеличивало вероятность выпадения сильных осадков.

Из-за большого количества способного к сублимации водяного пара определяющую роль в образовании осадков над Карпатами в летний период играют микрофизические характеристики, особенно крупнокапельная фракция.

Осадки имеют ячейковую структуру с четко выраженными ядрами, интенсивность в которых может достигать невероятной величины. Если в окружении этих ячеек находится неизрасходованный водяной пар, способный к сублимации, который втягивается внутрь названной ячейки и влечет за собой постоянный рост большого количества, как водяных, так и кристаллических частиц, вероятность выпадения катастрофических осадков резко повышается.

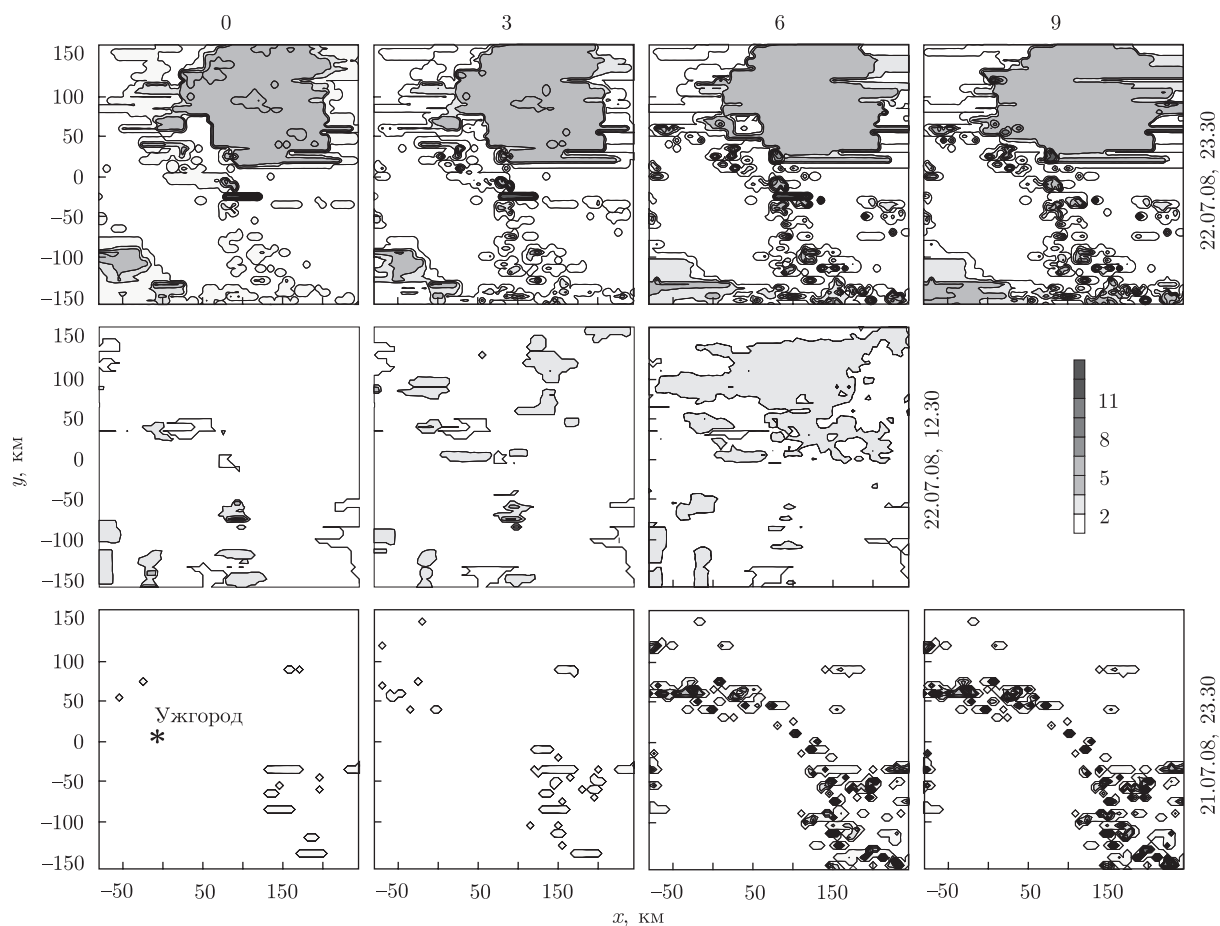


Рис. 3. Эволюция интенсивности осадков в период 21–23 июля. Цифры возле шкалы — интенсивность осадков, мм/ч. Цифры над рисунками — время развития облачности в часах. Справа — дата. Центральная точка расчета  $(x, y) = (0, 0)$  км — пункт радиозондирования Ужгород

Причиной образования ячейковых структур являются, в основном ячейки холодного воздуха, предопределенные как орографией, так и метеорологическими условиями.

1. Пірнач Г. М. Моделювання еволюції мезомасштабних хмарних утворень над Карпатами // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2007. – Вип. 256. – С. 19–43.
2. Пірнач Г. М., Дудар С. М., Шпиг В. М. Чисельне моделювання фронтальних хмарних систем, які супроводжували сильний паводок в Карпатах у листопаді 1998 року // Там само. – 2006. – Вип. 255. – С. 5–25.
3. Krakovskaia S. V., Palamarchuk L. V., Shpyg V. M. Numerical simulation of clouds and precipitation caused catastrophic floods along the Elbe river in August 2002 // In Proc. of WMO Int. Cloud Modelling Workshop. – Gamburg, 2004.
4. Pirnach A. Construction and application of the various numerical models for study of the cloud dynamics and structure of the frontal rainbands // J. Atmos. Res. – 1998. – **45–47**. – P. 356–376.
5. Пірнач Г. М. Чисельне моделювання хмар та опадів у системах атмосферних фронтів. – Київ: Ніка-центр, 2008. – 296 с.
6. Пірнач Г. М. Моделювання фронтальних хмар із сильними опадами для рівнинних та гірських рельєфів // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2004. – Вип. 253. – С. 37–50.
7. Heymsfield G. M., Heymsfield A. I., Belcher L. Observations of Florida Convective Storms Using Dual Wavelength Airborne Radar // Proc. of 14th ICCP 19–23 July 2004. – Bolonia. – P. 547–550.

8. Hallet J. Characterization of mixed phase cloud and precipitation // Proc. of 14th ICCP 19–23 July 2004. – Bolonia. – P. 782–785.
9. Woods C. P., Stoelinga M. T., Locatelli J. D., Hobbs P. V. Microphysical processes and synergistic interaction between frontal and orographic forcing of precipitation during the 13 September 2001. – Improve – 2 event over the Oregon Cascades // J. Atmos. Sci. – **62**. – P. 3520–3534.

*Институт геофізики ім. С. І. Субботина  
НАН України, Київ*

*Поступило в редакцію 10.07.2009*

**T. A. Belyi, A. M. Pirnach**

### **Simulation of strong precipitations in the Ciscarpathian region**

*Three-dimensional, time-independent, and forecasting numerical models developed in UHRI were used for the modeling of frontal cloud systems passed over the Carpathian region during flood in July 2008 and caused a strong precipitation. Numerical experiments were conducted to study the cloud potential ability to produce precipitations of different intensities. Influences of relief, updrafts and downdrafts, and the mechanism of cloud and precipitation formation were the objects of numerical experiments. Results of a numerical study of the precipitation formation conditions during the synoptical period on July 21–27 in mesoscale frontal rainbands and convective cloud clusters were analyzed. The research of the key parameters causing a heavy precipitation has been conducted.*