

Численные исследования влияния различных механизмов осадкообразования на эволюцию мезомасштабных облачных образований, обусловивших сильные осадки в Карпатах 21—29 июля 2008 г.

© Т. А. Белый¹, С. Н. Дударь², А. М. Пирнач², 2009

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Киев, Украина

Поступила 19 августа 2009 г.

Представлено членом редколлегии Я. М. Хазаном

Проведено аналіз умов формування опадів над територією України протягом синоптичного періоду 21—27 липня 2008 р. під час сильних паводків у Східних Карпатах. Використано діагностичні та прогностичні моделі фронтальних мезомасштабних хмарних утворень, розроблені в УкрНІГМІ. Виконано серію чисельних експериментів з дослідження впливу різних механізмів опадоформування на еволюцію фронтальних смуг і конвективних утворень різних масштабів, які давали великі опади над гірськими масивами Східних Карпат і прилеглих регіонів. Визначено ключові мікрофізичні параметри, які призвели до утворення катастрофічних опадів. Найбільший внесок робили механізми, що відповідали за великокрапельний спектр.

Analysis has been conducted of conditions of formation of atmospheric precipitations above Ukraine during the synoptic period from 21 to 27 of July 2008 while strong floods in the East Carpathians took place. Diagnostic and prognostic models of frontal mesoscale cloud formations elaborated at UHRI were used. A series of numerical experiments has been conducted on the studies of the effects of different mechanisms of atmospheric precipitations formation on the evolution of frontal bands and convective clusters of different scale which gave strong atmospheric precipitations above mountain ridges of the East Carpathians and adjacent areas. Key microphysical parameters have been determined, which resulted in formation of catastrophic atmospheric precipitations. The greatest share was produces by mechanisms responsible for large-drop spectrum.

Наводнения в Карпатах часто приводят к разрушительным последствиям. Они были предметом многих исследований, но чаще изучались их гидрологические особенности. Метеорологические аспекты этого явления рассматривались значительно реже, а численное моделирование отдельных кучевых образований, из которых выпадают сильные осадки в конкретных регионах, еще реже. Это связано с большими математическими трудностями, а также с недостаточным количеством данных зондирования атмосферы и т. д. Попытка такого моделирования была осуществлена, например,

в работах [Пирнач, 2004; Пирнач и др., 2007; Krakovskaia et al., 2002]. Здесь исследовались случаи весенних и осенних паводков, а облачность исследуемых переходных периодов характеризовалась преимущественно слоисто-кучевыми облаками.

В настоящей статье рассмотрен случай сильного наводнения в Прикарпатье в летний период (21—27 июля 2008 г.). Основное внимание здесь уделено фронтальным облачным системам, дававшим сильные осадки. Сопровождавшие паводок фронтальные системы состояли преимущественно из конвективных образо-

ваний. Это потребовало существенной модификации алгоритма расчета [Пірнач, 2007], где изучались облака переходных сезонов года.

Фронтальные облака переходных и летних периодов отличаются между собой физической природой. В первом случае преобладают слоистые облака с кучевыми вкраплениями (заполненная конвекция). Сложность их моделирования заключается в моделировании мезомасштабных процессов порядка сотен километров вместе с мезомасштабными неоднородностями в несколько километров. Эта же проблема остается и для второго случая — фронтальных облаков летнего периода, только в этом случае значительно больший вес имеет кучевая облачность. Масштабы таких кучевых образований определяются десятками километров.

Постановка задачи. Для численного моделирования используем диагностические и прогностические модели с учетом орографии, теоретические основы которых заложены в работах [Пірнач, 1998; Пірнач и др., 2006; Pirnash, 2007; Пірнач, 2008].

Для учета орографии возьмем систему координат Z -сигма (ξ, η, ζ) [Степаненко, 1998; Kasahara, 1974], позволяющую учитывать форму рельефа и сохранять постоянной высоту плоскости, ограничивающую сверху область интегрирования. В диагностических моделях орографию осуществим следующим образом: сначала построим поля метеорологических элементов в декартовой системе координат без учета орографии аналогично [Паламарчук, Пірнач, 1992]. Затем путем интерполяции проведем перераспределение значений неизвестных величин в точки сетки Z -сигма системы координат.

Новые координаты запишем следующим образом:

$$\xi = x, \quad \eta = y, \quad \zeta = \frac{z - \Gamma}{H - \Gamma} H,$$

где x, y, z — декартовы координаты; ξ, η, ζ — Z -сигма орографические координаты; Γ — функция рельефа; H — Z -максимум.

Для моделирования эволюции мезомасштабных облачных образований во времени и пространстве используем систему уравнений, которая описывает динамику и термодинамику атмосферы, а также систему кинетических уравнений для функций распределения облачных частиц по размерам для моделирования эволюции микрофизических процессов.

Запишем в сокращенном виде систему уравнений движения, неразрывности, притока тепла и влаги и т.д. в Z -сигма координатах:

$$\frac{dS_i}{dt} = F_i + \Delta S_i, \quad (1)$$

где

$$S_i = (u, v, \tilde{w}, T, q, f_k),$$

$$i = 1, 2, \dots, 8, \quad k = 1, 2, 3,$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial \xi} + v \frac{\partial}{\partial \eta} + \tilde{w} \frac{\partial}{\partial \zeta},$$

$$\Delta (S_i) = k_\xi \left((S_i)_{\xi\xi} + (S_i)_{\eta\eta} \right) + k_\zeta (S_i)_{\zeta\zeta},$$

$$\tilde{w} = \frac{G_1 u + G_2 v + w}{G_0},$$

$$G_0 = 1 - \frac{\Gamma}{H}, \quad G_1 = \Gamma_x \left(\frac{\zeta}{H} - 1 \right),$$

$$G_2 = \Gamma_y \left(\frac{\zeta}{H} - 1 \right).$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho v}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho \tilde{w}}{\partial \zeta} = 0, \quad \rho = \frac{p}{RT}.$$

Здесь t — время; u, v, w — компоненты скорости ветра вдоль осей x, y, z , направленные соответственно на восток, север и перпендикулярно к земле; u, v, \tilde{w} — компоненты скорости ветра вдоль осей ξ, η, ζ ; q — удельная влажность воздуха; ρ — плотность воздуха; p, T — давление и температура воздуха; R — газовая постоянная сухого воздуха; ΔS_i — турбулентный перенос; $(S_i)_{\xi\xi}, (S_i)_{\eta\eta}, (S_i)_{\zeta\zeta}$ — производные второго порядка от функций S_i по ξ, η, ζ соответственно [Пірнач, 2008]; k_ξ, k_ζ — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентности; Γ_x, Γ_y — производные первого порядка функции Γ по x и y ; F_i — отдельные физические процессы ($F_1 - F_3$ —

правые части уравнений для проекций скорости, учитывающие ускорения Кориолиса, силы тяжести, градиенты давления и т. д. [Пирнач, 2004; 2008]; $F_4 - F_5$ — притоки тепла и влаги [Pirnach, 1998; Пирнач, 2008]; $F_6 - F_8$ — процессы переноса облачных частиц и осадков, конденсационные и коагуляционные процессы, скорость зарождения капель и кристаллов, падения частиц и др. [Пирнач, 2008].

Функцию F_i в правой части уравнения (1) распишем для уравнений движения, температуры и удельной влажности:

$$F_1 = l v - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial \xi} - \rho g G_1 \right],$$

$$F_2 = -l u - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial \eta} - \rho g G_2 \right],$$

$$F_3 = -g - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial \xi} \frac{1}{G_0} \right],$$

$$F_4 = \sum_{k=1}^3 \alpha_k \varepsilon_k + \alpha_p \frac{d p}{d t},$$

$$F_5 = - \sum_{k=1}^3 \varepsilon_k,$$

где

$$\alpha_k = \frac{L_k}{c_p}, \quad \alpha_p = \frac{c_p - c_v}{c_p R \rho};$$

l — параметр Кориолиса; g — ускорение свободного падения; c_p и c_v — теплоемкость воздуха при постоянном давлении и объеме соответственно; L_k — теплота фазовых переходов; ε_k — скорость конденсации водяного пара на облачных каплях.

Функцию F_i в правой части уравнения (1) для функций распределения капель, кристаллов и дождевых частиц по размерам запишем в виде

$$F_6 = - \frac{\partial}{\partial r} (\dot{r}_1 f_1) + \frac{\partial f_1}{\partial \zeta} \frac{v_1}{G_0} + \\ + I_a - I_{f_1} - (c_{21} + c_{31}) f_1,$$

$$F_7 = - \frac{\partial}{\partial r} (\dot{r}_2 f_2) + \frac{\partial f_2}{\partial \zeta} \frac{v_2}{G_0} - \\ - I_{f_2} - \frac{\partial}{\partial r} (\dot{r}_{c21} f_2)_2,$$

$$F_8 = - \frac{\partial}{\partial r} (\dot{r}_3 f_3) + \frac{\partial f_3}{\partial \zeta} \frac{v_3}{G_0} - \\ - \frac{\partial}{\partial r} (\dot{r}_{c31} f_3) + I_s + I_{f_1} + I_{f_2},$$

где r — радиусы облачных частиц или частиц осадков; f_k — функции распределения облачных частиц и частиц осадков по размерам r (мелкие капли, дождевые капли, кристаллы); $I_a, I_s, I_{f_1}, I_{f_2}$ — процессы нуклеации (скорость образования ядер конденсации I_a и ядер льдообразования I_s), а также заморзания мелких и крупных капель; \dot{r}_{cik}, c_{ic} — коагуляционные процессы; \dot{r}_k, ξ_k описывают конденсацию [Pirnach, Krakovskaia, 1994; Pirnach 1998; Belokobylski, Pirnach, 2000].

Схема решения системы уравнений. Для решения системы (1) использовался метод расщепления на отдельные подсистемы [Пирнач, 2008]. Численная схема для интегрирования уравнений в частных производных состоит из цепочки конечно-разностных схем, для каждой из которых разработан свой метод решения. Первоначальную систему уравнений разобьем на пять подсистем, отображающих отдельные физические процессы. Первая описывает процессы переноса воздуха, облачных частиц, зарождения частиц на ядрах конденсации и льдообразования; вторая — процессы, обусловленные градиентами давления; третья — процессы, обусловленные силами инерции; четвертая — конденсационные процессы; пятая — процессы коагуляции. Для примера приведем алгоритм расчета коагуляционных процессов, поскольку им принадлежит определяющая роль при осадкообразовании в кучевых облаках. Коагуляционные процессы будем рассчитывать в приближении непрерывного роста. При расчете капельной фракции решим уравнение для крупных и мелких капель [Буйков и др., 1968]:

$$\frac{\partial f_k}{\partial t} = - c_{nk} f_k, \quad (2)$$

$$\frac{\partial f_n}{\partial t} = - \frac{\partial (\dot{r}_{c_{nk}} f_n)}{\partial r}, \quad (3)$$

где

$$c_{nk} = \pi \rho \int_{R_k}^{R_n} E (r_n + r_k)^2 (v_n - v_k) f_n dr,$$

$$\dot{r}_{c_{nk}} = \frac{\rho_k \rho \pi}{3 \rho_n r_n^2 K_{1n}} \times \int_0^{R_k} E (r_n + r_k)^2 (v_n - v_k) r_k^3 f_n dr,$$

$$k = 1; n = 2, 3.$$

Здесь n — номер фракции частиц осадков (дождевых капель и кристаллов), k — номер облачной фракции (мелкие капли); v_n и v_k — скорость падения крупных и мелких частиц, вычисляемых по формуле Крыстанова—Шмидта [Шишкин, 1964]; K_{1n} — коэффициент формы, равный 1; r_r, r_n — максимальные радиусы коагулирующих мелких и крупных частиц соответственно.

Коэффициент коагуляции крупных капель с мелкими E вычислим по формуле, заимствованной из работы [Шишкин, 1964]:

$$E = E_0 \left[1 - \frac{r_2 r_m^3}{4 r^2 (r_2^2 - r^2)} \right]^2,$$

где r_2 — радиус крупной капли, $r_m = 14,5$ мкм. За исключением специальных экспериментов, для ледяных частиц $E = 1$, а для капель $E_0 = 1$.

Для интегрирования уравнения (2) использовалась неявная конечно-разностная схема вида

$$\frac{f_k^{j+1} - f_k^j}{t_s} = - c_{nk} f_k^{j+1},$$

где t_s — шаг интегрирования по времени.

Поскольку численные эксперименты показали, что в крупнокапельном спектре конденсационные процессы могут играть реша-

ющую роль при образовании катастрофических осадков, приведем заключительную схему для вычисления и этого процесса.

Конденсационный и коагуляционный рост частиц будем рассчитывать с помощью системы уравнений

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} = - \frac{\partial (f_i \dot{r})_i}{\partial r}; \quad \frac{\partial f_k}{\partial t} = - \frac{\partial (f_k \dot{r}_k)}{\partial r}$$

и конечно-разностной схемы

$$\frac{(f_m^{j+1} - f_m^j)}{t_s} + \dot{r}_m \frac{(f_m^{j+1} - f_{m-1}^{j+1})}{\Delta r_m} + f_m^{j+1} \frac{(\dot{r}_{m+1}^{j+1} - \dot{r}_m^{j+1})}{\Delta r_{m+1}} = 0,$$

$$\text{если } \dot{r}_m > 0, \quad (4)$$

$$\frac{(f_m^{j+1} - f_m^j)}{t_s} + \dot{r}_m \frac{(f_{m+1}^{j+1} - f_m^{j+1})}{\Delta r_{m+1}} + f_m^{j+1} \frac{(\dot{r}_m^{j+1} - \dot{r}_{m-1}^{j+1})}{\Delta r_m} = 0,$$

$$\text{если } \dot{r}_m < 0.$$

В большинстве случаев, за исключением специальных расчетов по изучению спектров частиц, скорость роста капель и кристаллов вычислялась по формуле Максвелла [Шишкин, 1964]:

$$\dot{r}_i = \frac{D \rho \Delta_i}{\Gamma_i \rho_i r}, \quad (5)$$

где D — коэффициент молекулярной диффузии, Γ_i — множитель, учитывающий отличие температуры капли от температуры воздуха,

Δ_i — пересыщение относительно воды или льда, ρ_i — плотность воды или льда, ρ — плотность воздуха, r — радиус частицы, Δr — шаг интегрирования по радиусу частицы. Индексы i, k, m представляют частицы, конденсирующие водяной пар ($i = 1$ — облачные капли, $i = 2$ — дождевые капли, $i = 3$ — кристаллы), коагуляционный рост дождевых капель ($k = 2$) и кристаллов ($k = 3$) и номер точки по радиусу ($m = 1, 2, \dots$). Для простоты номера функций пропускаются.

Согласно формуле (5) \dot{r}_i убывает обратно пропорционально радиусу частицы и стремится к нулю при стремлении радиуса к бесконечности, если числитель в соотношении (5) — величина ограниченная. Ошибки аппроксимации по схеме (4) составляют величину

$$\delta = o(t_s) + o(\Delta r)^2 \pm \frac{1}{2} (\dot{r}_m f_{mrr} + f \dot{r}_{mrr}) \Delta r. \quad (6)$$

При постоянном шаге по радиусу последний член в соотношении (6) равен нулю, при переменном — ошибки аппроксимации пропорциональны шагу, что может привести к искусственному расширению спектра. Вероятно, более рационально было бы пренебречь конденсационным ростом дождевых капель, что и делалось в большинстве случаев, за исключением специальных расчетов. Если пересыщение по отношению к воде Δ_i стремится к нулю, а радиус — к бесконечности, с математической точки зрения получим неопределенность типа $0 / \infty$, которая может привести к непредвиденным результатам, в том числе и к коллапсу, что и показали дальнейшие расчеты. Однако к неограниченному росту крупных капель может привести в определенных условиях и неограниченный рост пересыщения по отношению к воде. Это возможно, например, в условиях постоянного притока водяного пара в заданную точку и при отсутствии или недостатке ядер конденсации в ней. Попадая в такие условия, капля неограниченно растет. При длительном существовании таких условий могут возникнуть очаги катастрофических осадков.

Описание других вычислительных схем и доказательство их аппроксимации и устойчивости приведено в работах [Pirnach, 1998; Пірнач, 2008]. При доказательстве устойчивости вычислительных схем чаще всего использо-

вались спектральные методы (анализ Фурье). Выбранные абсолютно устойчивые схемы сводятся в единую систему. Ее аппроксимация и устойчивость проверялись путем численных экспериментов. Для верификации моделей применялись аналитические и конечно-разностные схемы разных авторов, а также данные регулярной сети и натуральных экспериментов, проведенных в различных точках планеты.

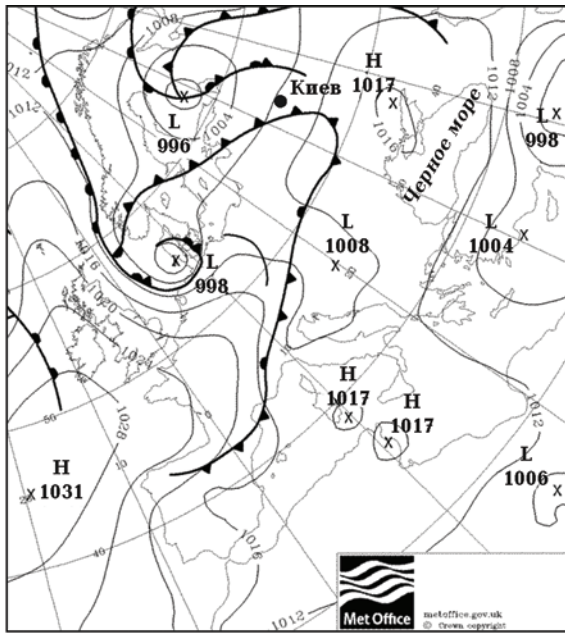
Синоптические условия, наблюдавшиеся в период с 21—27 июля 2008 г. Как видно из рис. 1, погода над Восточными Карпатами определялась влиянием холодного фронта, который 22 июля, двигаясь с северо-запада, встретился с теплой воздушной массой, перемещавшейся с востока. Эволюция температуры характеризовалась 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 была воздушная масса на северо-востоке от Карпат и на левом берегу р. Днестр. В этом районе преобладали северные и северо-восточные воздушные потоки. Контрасты температуры и влажности были гораздо меньше, а образовавшаяся облачность — слоистой с вкраплениями отдельных конвективных облаков. На северо-востоке области источники влаги не такие интенсивные, однако занимали обширные площади, и по притоку влаги в заданный район могли конкурировать с более интенсивными юго-западными источниками.

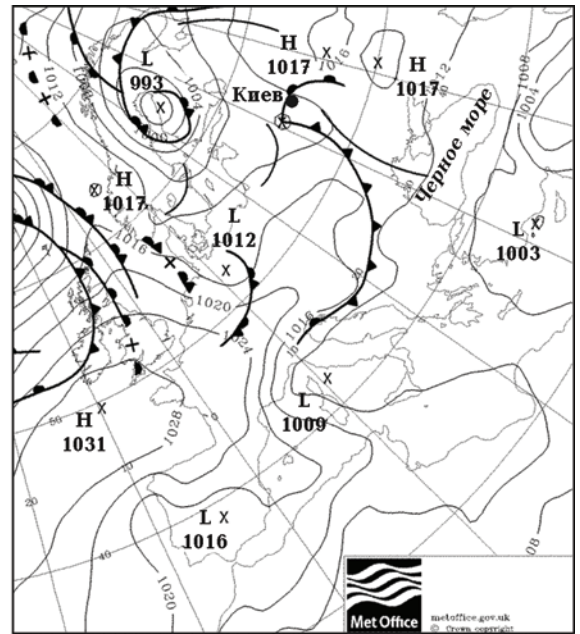
Спутниковые снимки за этот период (рис. 2) четко показывают образование и развитие ярко выраженного вихря со сплошной облачностью, который в ночь с 21 на 22 июля состоял из отдельных более мелких вихрей. В ночь с 22 на 23 июля они слились в сплошную массу, которая 23—24 июля начала распадаться на отдельные вихри.

Эволюция облачности и осадков 21—23 июля. Исходным фактическим материалом для моделирования служили ежедневные данные радиозондирования сетевых аэрологических станций Британского центра атмосферных данных (BADC).

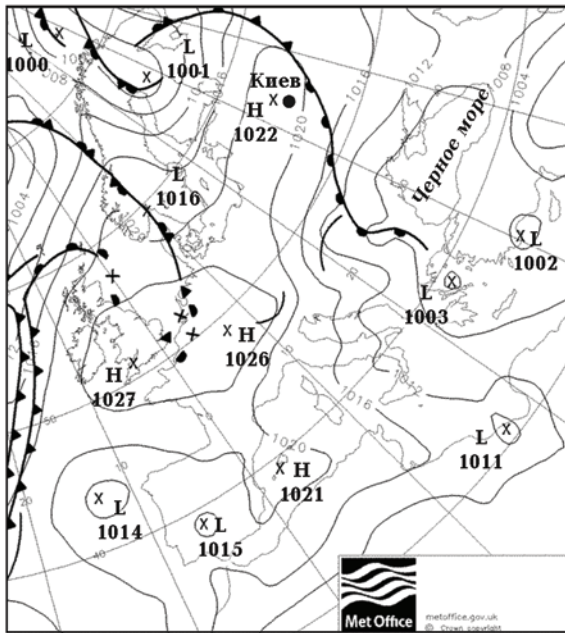
Начальные поля динамических и термодинамических метеовеличин рассчитывались с



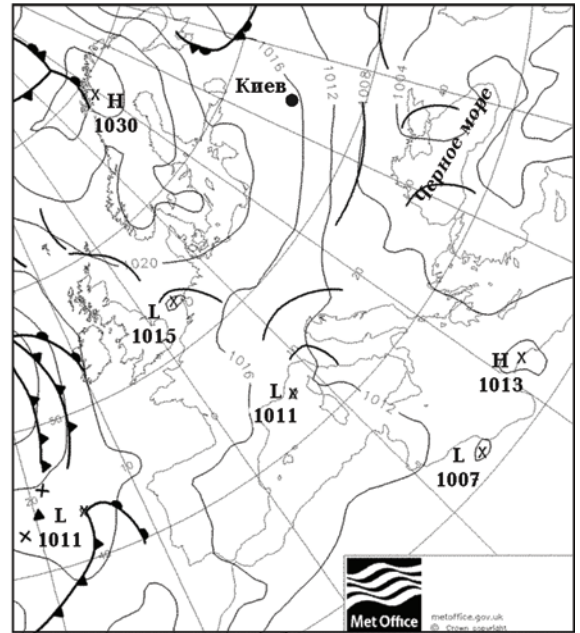
а



б



в



г

Рис. 1. Фрагменты приземных синоптических карт в разные периоды: а — 21 июля 2008 г. 00.00.UTC; б — 22 июля 2008 г. 00.00.UTC; в — 23 июля 2008 г. 00.00.UTC; г — 27 июля 2008 г. 00.00.UTC.

помощью диагностических моделей, описанных в работах [Пирнач и др., 2006; Пирнач, 2008]. 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 по-

лей при моделировании эволюции облачности и осадков.

На рис. 3 показаны характеристики атмосферы, рассчитанные с помощью трехмерных численных диагностических моделей для двух моментов зондирования атмосферы (23.30 UTC, 21 и 22 июля). С помощью вложенной

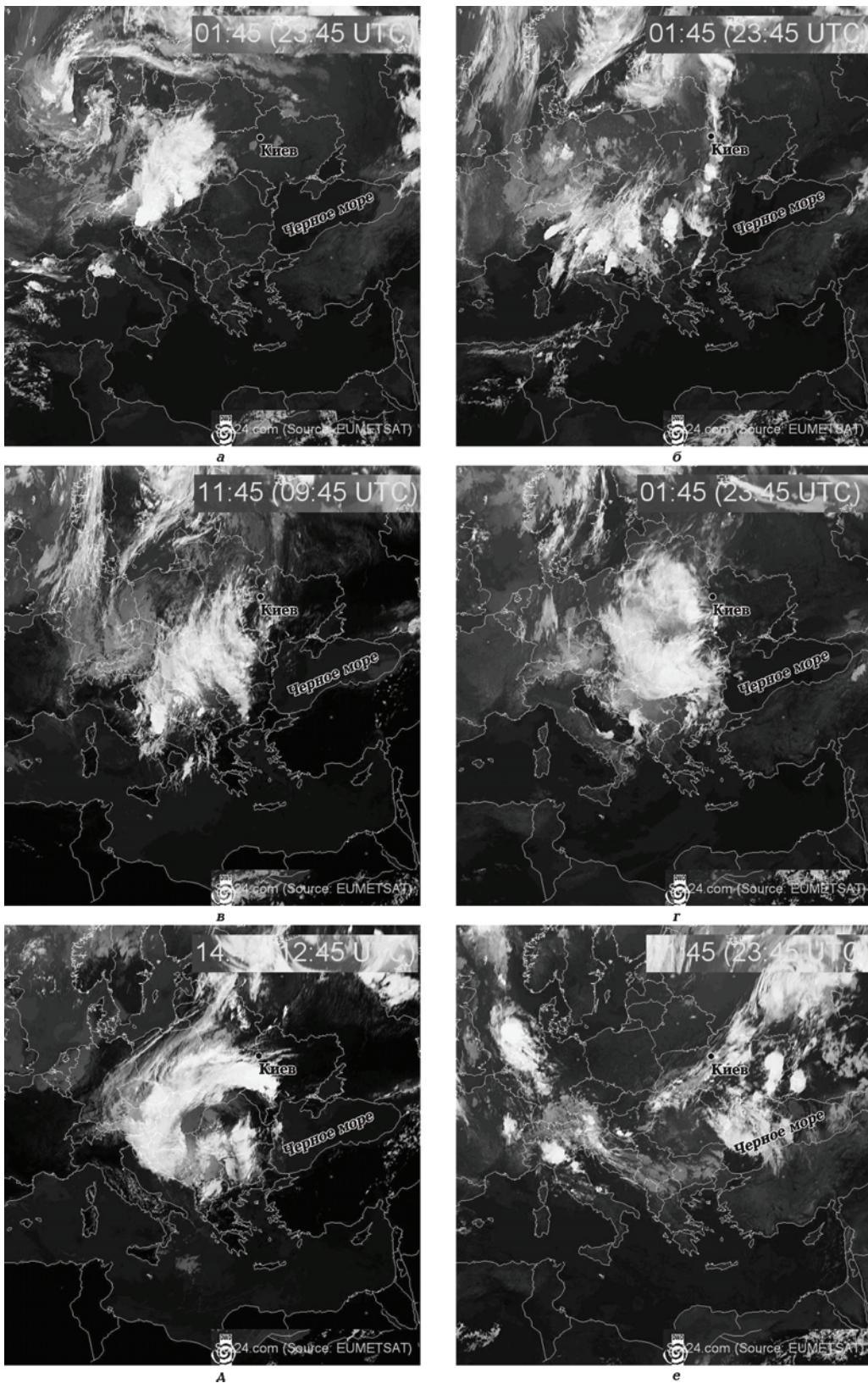


Рис. 2. Спутниковые снимки облачности: а — 20 июля 2008 г. 23.45.UTC; б — 21 июля 2008 г. 23.45.UTC; в — 22 июля 2008 г. 09.45.UTC; г — 22 июля 2008 г. 23.45.UTC; д — 23 июля 2008 г. 12.45.UTC; е — 27 июля 2008 г. 23.45.UTC.

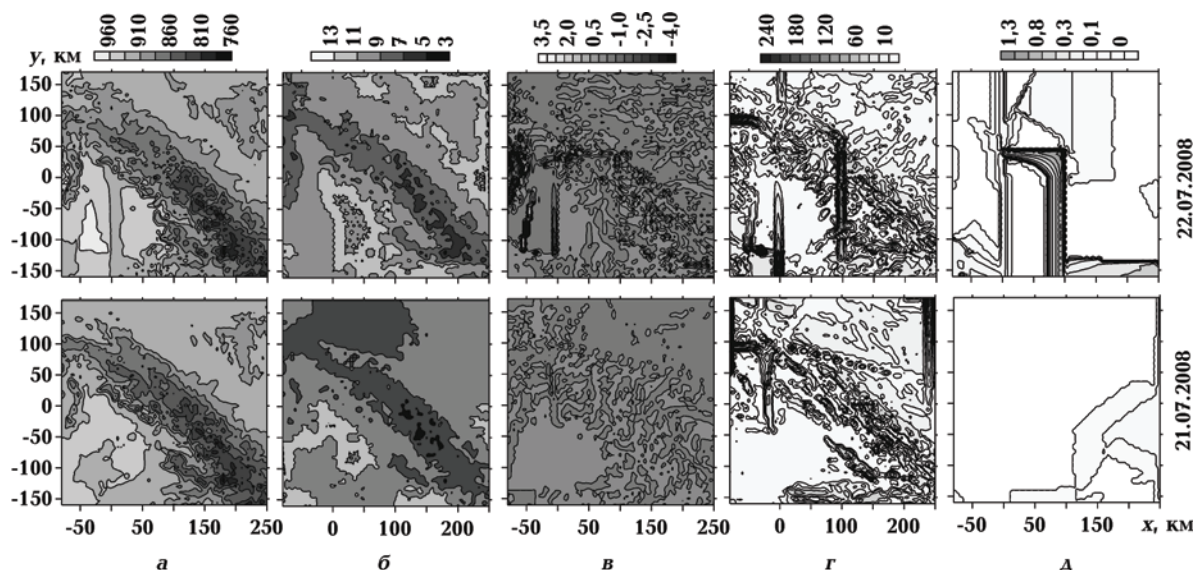


Рис. 3. Распределение метеорологических характеристик на высоте 1 км и интегральные характеристики облачности 21—22.07.08, 23.30.UTC: а — давление, гПа; б — температура, °C; в — вертикальная составляющая вихря, $10^{-3}/\text{с}$; г — максимальные по высоте скорости восходящих движений, см/с; д — интегральное по высоте пересыщение по отношению ко льду, мм (соразмерное с суммой осадков).

сетки на рисунке более детально отражена область, которая охватывает Украинские Карпаты. Шаг вложенной сетки по горизонтали равен 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 которые иногда вкраплены характерные цепочки, отмечающие путь отдельных организованных возмущенных потоков. Похожую структуру имеют и вертикальные движения. Количество ядер восходящих движений в горах больше, чем на равнине, а масштабы их 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 физической природы.

Характеризуя различия между распределением метеорологических характеристик, рассчитанных для начального и развитого состояния процессов, особое внимание следует обратить на распределение вихрей и верти-

кальных движений. 21 июля вихревая деятельность была спокойнее, облака были кучевыми и распределялись отдельными ячейками, расположенными в основном над горами; 22 июля развитие облачности и осадков было интенсивнее и характеризовалось большей плотностью ядер 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. 3, д области и связано с ядром облачности, отмеченным спутниковыми снимками. Узкие потоки водяного пара, которые пробивались через рельеф с юга и запада, встречались в Карпатах в бассейне р. 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.

При численном моделировании эволюции облачности в ячейках наиболее сильных осадков наблюдались мощные конвективные образования (рис. 4). Эти облака получены путем интегрирования системы (1) при начальном состоянии: а) $t = 0$ (23.30 UTC, 21.07.08); б) $t = 0$ (23.30 UTC, 22.07.08). Они характеризовались кристаллическими вершинами, смешанными прослойками под ними, насыщением от-

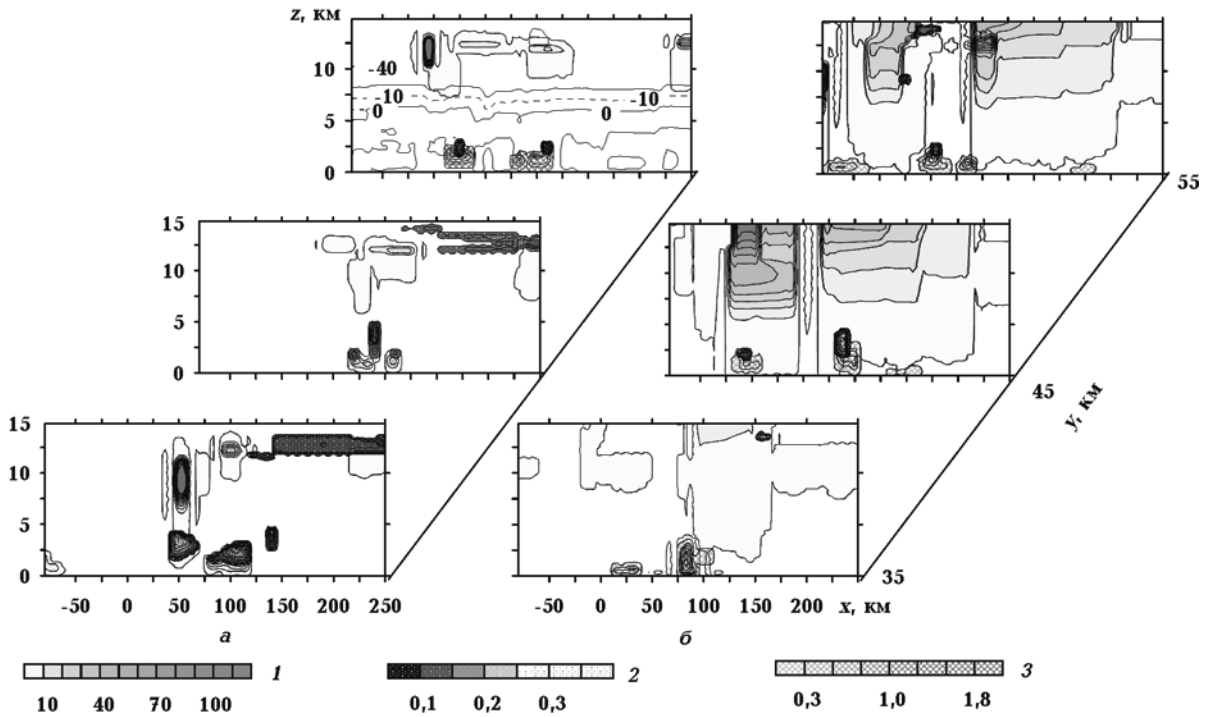


Рис. 4. Пространственное распределение характеристик рассчитанной облачности после двух часов развития с различными начальными состояниями атмосферы: 1 — концентрация кристаллов, 1/г; 2 — насыщение относительно льда, г/кг; 3 — влажность, г/кг. Цифры у изолиний — температура.

носителем 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. Особую роль кристаллических вершин в образовании сильных осадков отмечали многие исследователи [Woods et al., 2001; Hallet, 2004; Heymsfield et al., 2004]. 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 высоко расположенными (около 15 км) перистыми облаками, содержащими большое количество мелких кристаллов, постоянно засевающих нижележащие кристаллические вершины кучевых облаков.

Области с насыщением относительно льда и сильными восходящими движениями не всегда совпадают. Это обусловлено разницей между скоростями движения облачных систем и отдельных частей в заданной области, т.е. относительным движением отдельного малого мезомасштабного облачного пятна к системе в целом. Не исключена возможность вы-

падения осадков в насыщенные слои и последующего их роста, если эти области размещены рядом. Если же под кристаллическими облаками находились смешанные прослойки или области с насыщением пара над льдом, это создавало наиболее благоприятные условия для получения сильных, а то и катастрофических осадков. Такие области чаще появлялись 22—23 июля и значительно реже — 21 июля.

Особого внимания требуют расчеты интенсивности осадков. Их абсолютная величина в значительной степени определяется интенсивностью механизмов образования облаков и осадков. Гипотеза о том, что все образованные в облаках твердые и жидкие субстанции выпадают 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. 5 приведена эволюция облачности и осадков 21—23 июля 2008 г. в предположении, что параметры осадкообразования имеют среднестатистические значения [Пирнач, 2007; Пирнач, 2008] и присутствует коагуля-

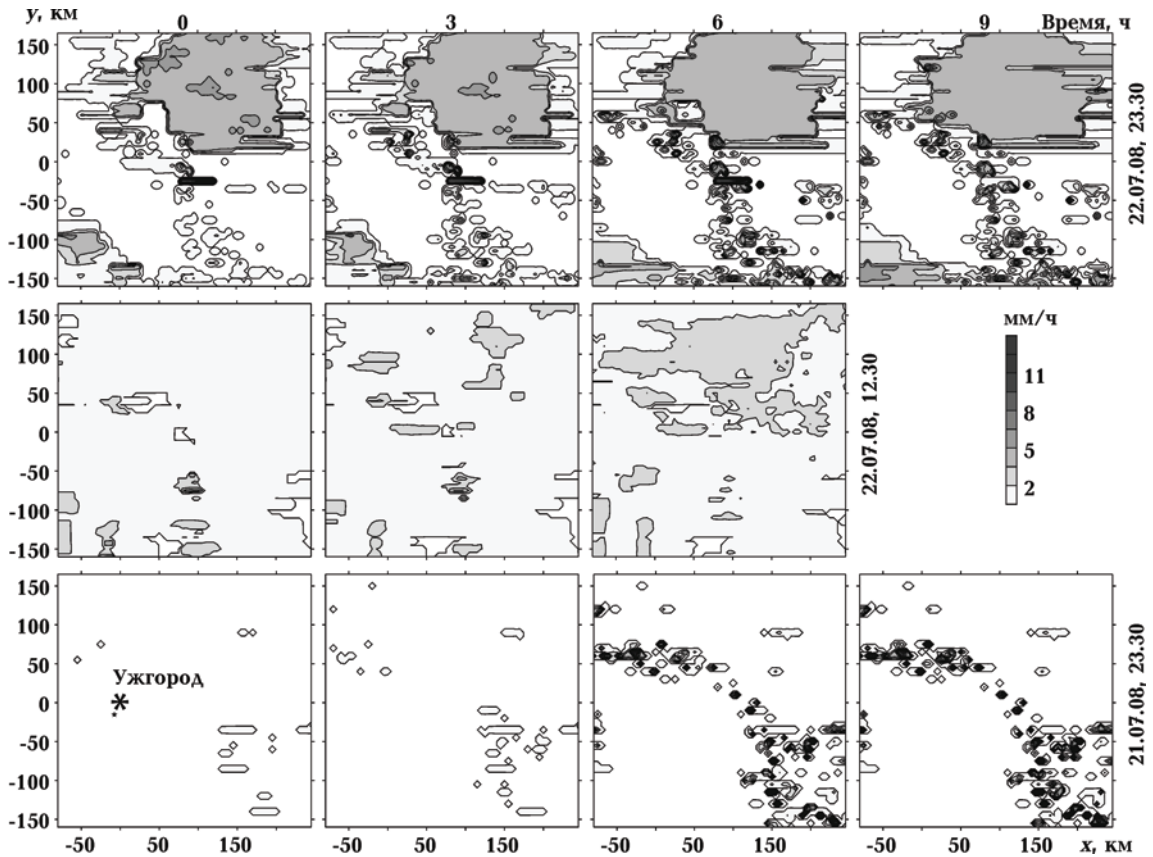


Рис. 5. Эволюция интенсивности осадков в период 21—23 июля. Центральная точка расчета $(x, y) = (0, 0)$ км в пункте радиозондирования Ужгород.

ция мелких капель с крупными, а также с кристаллами.

Если проанализировать рис. 5, можно отметить, что более сильные и занимавшие большую площадь осадки наблюдались с 22 на 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 севернее точки $(x; y) = (50; 50)$ км, где 21.07.08 23.30 UTC после 6 ч развития облачности интенсивность осадков достигала 8 мм/ч. Характерным для 22 июля было образование слоистой облачности на северо-востоке Карпат и левом берегу р. Днестр. Как показало последующее численное моделирование, осадки были не слишком сильными и 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 посто-

янным 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 ячеистую структуру с четко выраженными ядрами, интенсивность 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.

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

Исследование влияния взаимодействия различных механизмов осадкообразования на эволюцию и интенсивность сильных осадков. Используем следующие механизмы осадкообразования: механизм Финдайзена — Бержерона (процесс перегонки водяного пара с капель на кристаллы, сублимационный рост кристаллов до частиц осадков с последующим их выпадением), конденсационный рост мелких и дождевых капель, коагуляционный рост дождевых капель путем гравитационной коагуляции в приближении непрерывного роста, замерзание капель, обмерзание кристаллов путем захвата облачных капель. Форма капель и кристаллов предполагается сферической.

Для проведения численных экспериментов в качестве начального состояния было выбрано 23 июля 23.30 UTC с довольно интенсивными осадками.

Выбранные расчетные сетки имеют следующие границы:

1) $-300 < x < 500$ км; $-500 < y < 500$ км — общая сетка с шагом 100 км в окрестности вложенной сетки;

2) $-20 < x < 240$; $-100 < y < 120$ — вложенная сетка с шагом 5 км по x и y ;

3) $35 < x < 70$ км; $25 < y < 50$ км — часть вложенной сетки, представляющей область, расположенную у верховьях р. Стрый, на запад и восток от нее.

Шаг по высоте области интегрирования $0 < z < 11$ км равнялся 150 м.

При расчете скорости вертикальных движений атмосфера разбивалась на два слоя. Вблизи верхней границы (последние по высоте 20 точек) расчет вертикальных движений был несколько упрощен по сравнению с работой [Пірнач, 2008], уравнение неразрывности не использовалось, чтобы сгладить влияние тропопаузы на ход процессов и сосредоточиться на изучении поведения микрофизических характеристик облачности в заданном районе. Ниже этого слоя при расчете вертикальных движений \dot{w} с помощью проинтегрированного по z уравнения неразрывности атмосфера делилась на отдельные подслои. Если вертикальная проекция скорости по абсолютной величине превышает некоторую величину (10 м/с), граничные условия берутся с предыдущего этапа вычисления.

На рис. 6 представлено начальное состояние атмосферы во всей вложенной сетке. Температура характеризуется приближением теплового фронта с востока и струей холодного воздуха с юга при $x = 100$ км. Две четко выраженные полосы конвективных движений, расположенные под углом друг к другу, предве-

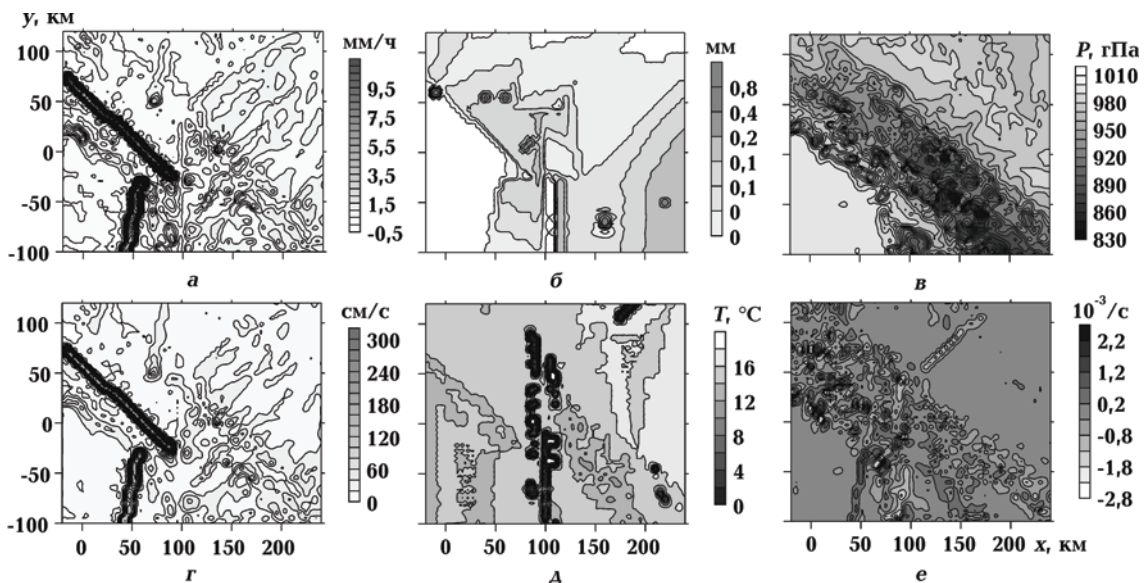


Рис. 6. Начальное состояние атмосферы (22.30.UTC, 23 июля): *a* — скорость конденсации, соразмерная с интенсивностью осадков; *b* — интегральное пересыщение по отношению ко льду, соразмерное с суммами осадков; *c* — приземное давление; *d* — приземная температура; *e* — вертикальная составляющая вихря скорости на земле.

щают сильные осадки в выбранной для исследования области, верховья р. Стрый. Пересыщение по отношению ко льду имеется практически во всей вложенной сетке как в теплой, так и в холодной массе воздуха. Также наблюдались мелкие циклонические и антициклонические вихри, которые иногда организовывались в полосы соответствующего характера.

На рис. 7 показано рассчитанное состояние облачных характеристик после 2 ч их развития. Резкая неоднородность в начальном распределении температуры привела к образованию отдельных пятен с высокими градиентами температуры, что, в свою очередь, привело к образованию мощных конвективных облаков и сильных осадков. В первые 6 ч развития в сетке $35 < x < 70$ км, $25 < y < 50$ км было обнаружено ядро сильных осадков, которое и было выбрано для проведения дальнейших численных экспериментов. Следует обратить внимание на сравнимое с водностью пересыщение по отношению ко льду как в выбранной сетке, так и в ее окрестностях. Причем его мезомасштабная структура состоит из полос и пятен различной величины. Водные облака размещены преимущественно над горами. Кристаллические облака занимали более обширную территорию, причем перемещались они на изучаемую область как с юго-запада, так и с северо-запада и востока. Выбранная малая область была расположена на северо-западе от большего по своим масштабам кристаллического образования. Температура в этой области была ниже по сравнению с окружением. Восходящие движения имели пятни-

стую структуру как в горах, так и на подступах к ним. Циклонические движения наблюдались на окраинах рассматриваемой малой области.

В верхнем левом углу (см. рис. 7, л, м) кристаллические облака с максимальной концентрацией совпадают с циклонической завихренностью. Максимальные значения водности совпадают с циклонической завихренностью, расположенной в нижнем углу (см. рис. 7, к, м). Такое расположение способствовало развитию мощных кучевых облаков с последующим выпадением сильных осадков, распространяющихся в северо-восточном направлении.

Для иллюстрации влияния различных комбинаций механизмов осадкообразования на интенсивность и сумму осадков выберем развития облачности в течение 3—6 ч, когда устанавливается относительное равновесие между процессами облако-осадкообразования и выпадением осадков. Сумма 0—3 ч в значительной мере определяется начальным состоянием микрофизических характеристик облачности и не может быть оценена адекватно из-за отсутствия данных измерений.

Численные эксперименты проводились путем включения или выключения следующих механизмов, способных привести при определенных комбинациях к катастрофическим осадкам:

- 1) конденсационный рост дождевых капель;
- 2) коагуляция дождевых капель с облачными;
- 3) коагуляция кристаллов с каплями (обзернение);

Т а б л и ц а 1. Максимальные суммы и максимальные интенсивности осадков в период от 3 до 6 ч для различных комбинаций механизмов осадкообразования

Сумма и интенсивность		Номер комбинации										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
\sum_3^6 мм	Σ_a	39	497	717	39	11	0	0	0	510	40	23
	Σ_d	32	199	717	33	3	0	0	0	182	33	12
$J_{m'}$ мм/ч	6 ч	28	317	821	27	25	0	0	0	318	27	35
	3 ч	21	166	172	21	2	0	0	0	165	20	2
Номер механизма		2,4	1,2,4	1,2	2,3,4	1,4	3,4	4	1	1—4	S	E

Примечание: В последней строке отражены номера механизмов осадкообразования. Значение S рассчитано как комбинация 4, но при $a = 2$, а E — при $E_0 = 0,1$; Σ_a, Σ_d — общая сумма осадков и доля дождевых капель в ней соответственно.

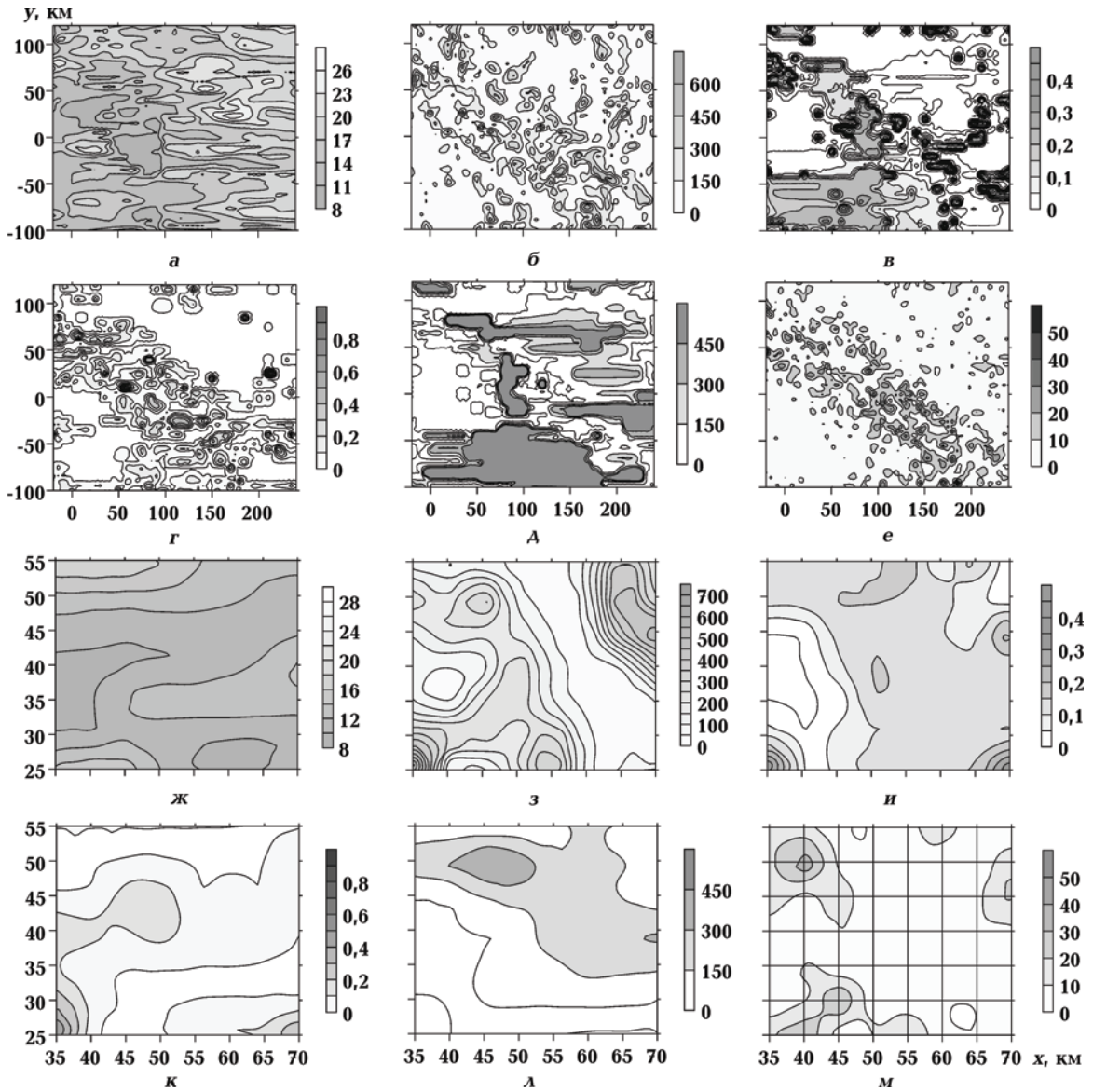


Рис. 7. Пространственное распределение облачных характеристик для всей вложенной сетки (а—е) и для части вложенной сетки (ж—м) при $t = 2$ ч согласно 2, 3, 4 механизмам осадкообразования: а, ж — приземная температура, °С; б, з — максимальная по z скорость восходящих движений, см/с; в, м — пересыщение по отношению ко льду, г/кг; г, к — максимальная по высоте водность, г/кг; д, л — максимальная по z концентрация кристаллов, 1/Γ; е, м — максимальная по высоте циклоническая вертикальная составляющая вихря, $10^{-3}/с$.

4) сублимационный рост кристаллических частиц.

В табл. 1 приведены максимальные по заданной площади $35 < x < 70$ км, $25 < y < 50$ км суммы и интенсивности осадков за период от 3 до 6 ч при различных комбинациях этих механизмов.

Скорость сублимации на протяжении эволюции облака регулировалась соотношением [Пірнач, 2008]

$S = 10^{-a} \exp(b T_s)$, $b = 0,56$, $a = 5$,
где T_s — переохлаждение воздуха. E_0 во всех расчетах, за исключением специальных случаев, принимался равным 1.

На рис. 8 показаны распределения сумм осадков в период от 3 до 6 ч после начала развития облачности для комбинаций механизмов (см. табл. 1).

Результаты численных экспериментов можно разделить на четыре категории:

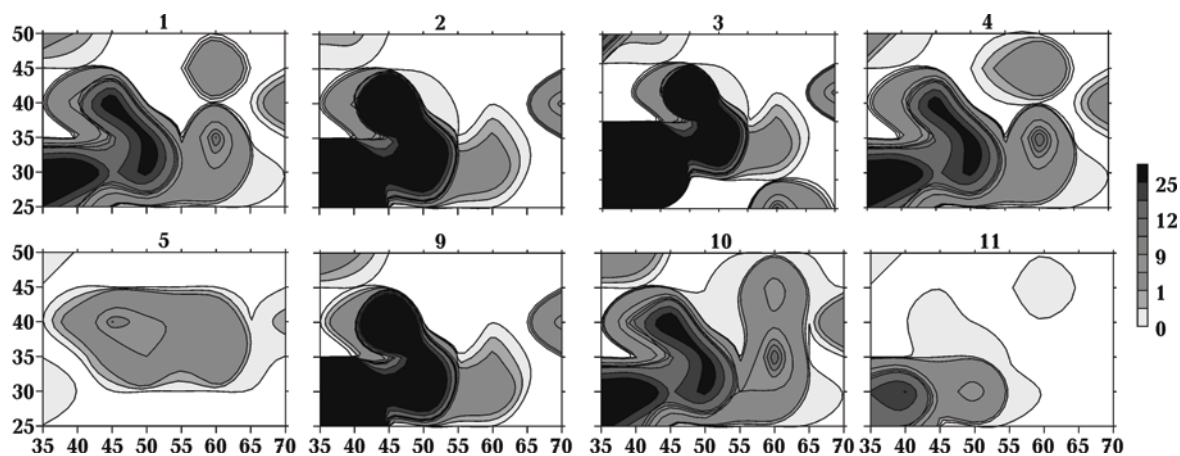


Рис. 8. Пространственное распределение сумм осадков (мм / 3 ч) от 3 до 6 ч после начального состояния для различных механизмов образования осадков. Номер рисунка соответствует номеру комбинации табл. 1.

1) отсутствие крупных капель, т. е. когда осадки вообще не выпадали (комбинации 6—8 в табл. 1);

2) сумма осадков, стремящаяся к неограниченной величине, т. е. коагуляционные процессы и конденсация дождевых капель больших размеров, которые при больших переувлажнениях по отношению к воде и льду приводили к коллапсу (комбинации 2, 3, 9);

3) сублимационный рост льда и конденсационный рост капель различных размеров без коагуляции (комбинации 5, 11), т. е. когда суммы характеризовали осадки, близкие к сильным или умеренным;

4) наиболее устойчивая группа с наличием очень сильных осадков, интенсивность которых достигала катастрофических размеров, но не стремилась к неограниченной величине, а суммы осадков в названный период достигали 40 мм / 3 ч. Эта группа включает случаи

расчетов при наличии коагуляции крупных капель с мелкими и при наличии льда даже при отсутствии обзёрнения (коагуляции кристаллов с каплями). Конденсация дождевых капель либо совсем исключается, либо требует специальных условий для определения пределов ее применимости (комбинации 1, 4, 10).

Вариации интенсивности сублимационного процесса в случае, когда ее интенсивность была повышена на несколько порядков, не привела к существенным изменениям сумм осадков. Уменьшение интенсивности коагуляционных процессов привело к заметному уменьшению сумм и интенсивности осадков, особенно при уменьшении коэффициента коагуляции для капель.

Средняя по площади интенсивность осадков (табл. 2) показала способность к неограниченному росту для случаев 2, 3, 9, которые включают конденсационный и коагуляцион-

Т а б л и ц а 2. Эволюция средних по площади интенсивностей осадков для различных комбинаций механизмов осадкообразования

t, ч	Номер комбинации									
	1	2	3	4	5	6	9	10	11	
1	0,9	1,5	2,1	0,9	0,0	0,0	1,5	1,3	0,0	
2	4,5	16,9	21,0	4,4	0,1	0,0	35,0	6,0	1,1	
3	6,0	37,6	46,5	5,9	0,5	0,0	35,0	6,0	1,1	
4	6,6	53,9	67,5	6,5	1,8	0,0	53,0	6,4	4,5	
5	9,4	84,1	105	9,0	4,3	0,0	84,7	8,3	5,2	
6	9,7	121	154	9,2	8,0	0,0	119	8,5	6,2	

ный рост крупных частиц. Отсутствие осадков характерно при отсутствии крупнокапельной фракции или льда. Остальные комбинации механизмов в основном обеспечивают процесс выпадения осадков, довольно близкий к реальному.

Вертикальные движения (табл. 3) по своей средней величине характерны для кучевой облачности. Различие механизмов осадкообразования не меняет радикально их величины, хотя отличия в отдельных случаях достигают десятков см/с. Максимальные значения скорости восходящих движений различаются значительно для различных комбинаций механизмов осадкообразования, но прямой зависимости от нее интенсивности осадков указать трудно. Например, в случае отсутствия осадков (случаи 6, 7, 8) максимальные значения w могут различаться на 1 м/с. Минимальные их значения с течением времени были получены при наличии в облаке только капель. Очевидно, процессы конденсации и испарения в облаке влияют на флуктуации восходящих движений сильнее, чем выпадающие осадки.

На рис. 9 отображена рассчитанная эволюция интенсивности осадков в заданной точке, расположенной в эпицентре рассматриваемого ядра интенсивности осадков. Случаи 2, 3, 9 показывают, что катастрофические осадки в заданной точке не продолжают долго и выпадают гораздо быстрее, чем в остальных случаях. Таким образом, учет обеих механизмов расширения крупнокапельного спектра хотя и завышает интенсивность осадков, но зато четко указывает на возможность ее роста до катастрофических величин.

На рис. 10 представлены наблюдаемые суммы осадков за 12 часов 22.07.08 и 23.07.08.

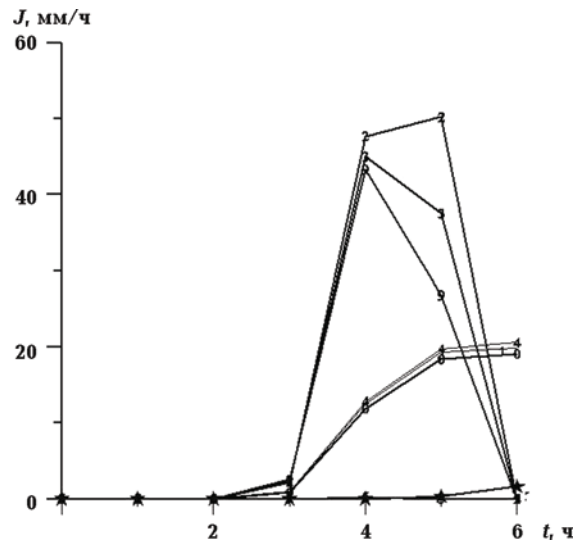


Рис. 9. Эволюция интенсивности осадков при различных механизмах осадкообразования (см. табл. 1) в точке $(x, y) = (50; 40)$ км. Цифры у кривых — номер комбинации табл. 1. Цифра 0 представляет комбинацию 10.

Данные предоставлены Кельнским метеорологическим университетом. Как видно из рисунков, наблюдаемые значения сумм осадков хорошо согласуются с рассчитанными суммами при численном моделировании. Суммы осадков рис. 10, а хорошо согласуются с интенсивностью осадков на рис. 5 — 22.07.08 12.30. Интенсивность осадков за этот период составила от 3 до 5 мм / 3 ч, что согласуется со значениями на рис. 10, а — 4—18 мм / 12 ч. Также хорошо согласуются значения сумм осадков на рис 10, б и сумм рассчитанных осадков в табл. 1. Как видно, на рис. 10, б осадки изменялись в пределах от 12—24 мм, а в табл. 1 для комбинаций 4, 5, 10, 11 они

Т а б л и ц а 3 . Скорости восходящих движений по всей толще рассчитанного слоя, см/с

t, ч	Скорости	Номер комбинации										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	минимум		11	15	15	8	8	11	14	15	6	10
	максимум		558	576	532	580	544	558	545	548	562	466
	средние		139	133	131	147	142	139	131	138	134	124
6	минимум	9	9	3	8	0	7	9	7	5	9	6
	максимум	639	642	676	614	663	765	642	570	660	586	597
	средние	137	148	148	150	168	162	148	133	151	129	149

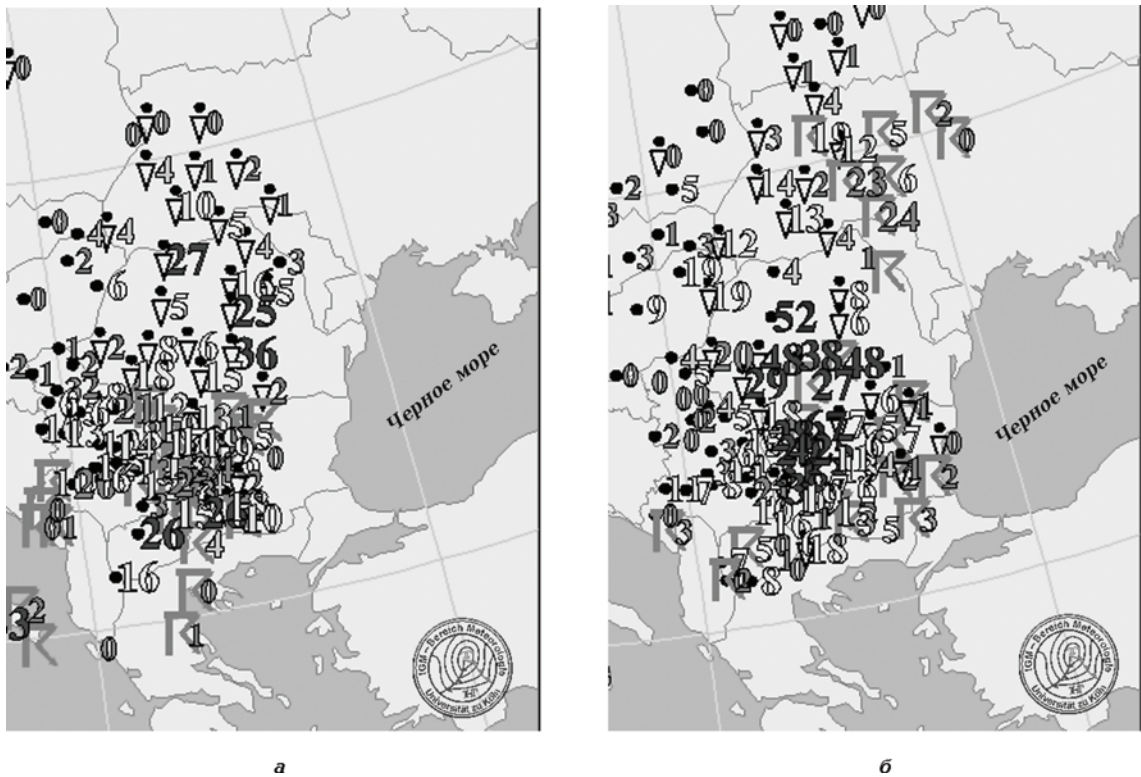


Рис. 10. Распределение сумм осадков за 12 часов: а — 22.07.08 18 GMT; б — 23.07.08 6 GMT.

менялись в пределах 11—40. Необходимо учитывать еще и тот фактор, что в эти суммы (табл. 1) входит доля дождевых капель, которые, согласно расчетам, были ответственны за катастрофические осадки. Если отнять от общей суммы долю дождевых капель, то получим близкие к измеренным значения величин при наблюдениях сумм осадков, в которых катастрофические осадки фиксировались не везде.

В настоящей статье не ставилась задача сопоставления результатов численного моделирования с наблюдаемыми значениями ввиду ограниченности стационарных метеорологических постов в исследуемом регионе. Целью исследования было нахождение определяющих факторов и микрофизических механизмов, приведших к катастрофическим осадкам в Восточных Карпатах.

Сравнивая полученные результаты с результатами предыдущих экспериментов [Пирнач, 2007; Пирнач и др., 2006], можно отметить, что если для холодного и переходных сезонов года главную роль в образовании сильных осадков играли кристаллические частицы, то в данном случае эту роль на себя взяли крупные капли. При их отсутствии сильные осадки не выпадали. Для получения сильных осад-

ков достаточно наличие комбинации сублимационного роста кристаллов и коагуляционного роста дождевых капель. Учет дополнительного конденсационного роста крупных капель может привести к завышенным значениям сумм осадков, зато они четко указывают на время и место возможного появления катастрофических осадков.

Если механизмы облако- и осадкообразования работают недостаточно интенсивно для того, чтобы осадить всю избыточную влагу, возможен неограниченный рост пересыщения по отношению к воде, что, в свою очередь, может привести, во-первых, к слишком интенсивной активации ядер конденсации, концентрация которых в облаке пропорциональна пересыщению по отношению к воде, а во-вторых, неограниченный рост пересыщения ведет к неограниченному росту крупных капель, а следовательно, и к интенсивности осадков.

Выводы. Построены диагностические и прогностические модели мезомасштабных облачных образований, сопровождавшие сильные паводки в Прикарпатье в июле 2008 г. Проведены численные эксперименты с целью определения роли различных механизмов осадкообразования в появлении сильных и катаст-

рофических осадков. Определена относительная роль крупнокапельной и кристаллической фракции в образовании осадков различной интенсивности.

Определены некоторые ключевые параметры, метеорологические условия и предикторы, которые обуславливают возникновение изучаемых опасных явлений. Среди главных признаков сильных осадков отмечены следующие:

1) встречное движение разных по природе воздушных масс и присутствие в них избыточного водяного пара (пересыщения относительно льда);

2) сильные вихревые движения хотя бы в одной из воздушных масс, приближающихся к горному массиву;

3) сверхмощные кучевые образования с кристаллическими вершинами и перистыми облаками над ними;

4) высокорасположенная тропопауза, достигающая 10 км и более;

5) сильные восходящие и компенсирующие их нисходящие движения, достигающие 10 м/с и более;

6) определенное сочетание механизмов осадкообразования с обязательной крупнокапельной фракцией в нем. Наличие комбинации сублимационного роста кристаллов и коагуляционного роста дождевых капель.

Авторы благодарны *g-ру физ.-мат. наук Я. М. Хазану* за оказанное внимание к настоящей статье, ценные замечания и советы.

Список литературы

- Буйков М. В., Дехтяр М. И., Духин С. С. К теории крупнокапельной части спектра облачных частиц // Изв. АН СРСР. Сер. геофиз. — 1968. — № 4. — С. 486—500.
- Паламарчук Л. В., Пирнач А. М. Исследование внутренней структуры фронтальных зон при помощи трехмерных полуэмпирических моделей // Тр. УкрНИГМИ. — 1992. — Вып. 243. — С. 107—124.
- Пирнач Г. М. Моделювання еволюції мезомасштабних хмарних утворень над Карпатами // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2007. — Вип. 256. — С. 19—43.
- Пирнач Г. М. Моделювання фронтальних хмар із сильними опадами для рівнинних та гірських рельєфів // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2004. — Вип. 253. — С. 37—50.
- Пирнач Г. М. Чисельне моделювання хмар та опадів у системах атмосферних фронтів. — Київ: Ніка-центр, 2008. — 296 с.
- Пирнач Г. М., Дугар С. М., Шпиг В. М. Чисельне моделювання фронтальних хмарних систем, які супроводжували сильний паводок в Карпатах у листопаді 1998 р. // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2006. — Вип. 255. — С. 5—25.
- Степаненко С. Н. Динамика турбулентно-циркуляционных и диффузионных процессов в нижнем слое атмосферы над Украиной. — Одесса: Маяк, 1998. — 286 с.
- Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1964. — 280 с.
- Belokobylski A. V., Pirnach A. M. Numerical simulation of the warm-season frontal clouds over Ukraine // In Proc. 13th ICCP. — Reno, Nevada, USA, 2000. — P. 1165—1169.
- Hallet J. Characterization of mixed phase cloud and precipitation // Proc. 14th Intern. Conf. on Clouds and Precipitation (Bologna, Italy, 19—23 July 2004). — Bologna, Italy, 2004. — 1. — P. 786—787.
- Heymsfield G. M., Heymsfield A. I., Belcher L. Observations of Florida Convective Storms Using Dual Wavelength Airborne Radar // Proc. 14th Intern. Conf. on Clouds and Precipitation (Bologna, Italy, 19—23 July 2004). — Bologna, Italy, 2004. — 1. — P. 547—550.
- Kasahara A. Various vertical coordinate systems used for numerical weather prediction // Mon. Wea. Rev. — 1974. — 102. — P. 509—522.
- Krakovskaia S. V., Palamarchuk L. V., Shpyg V. M. Numerical simulation clouds and precipitation caused catastrophic floods along the Elbe river in August 2002 // Proc. WMO Intern. Cloud Modeling Workshop (Gamburg, 2004). — Gamburg, 2004. — http://box.mmm.ucar.edu/events/wmo_workshop04/presentations/Thursday/ICMW_Krakovskaia.ppt
- Pirnach A. Construction and application of the various numerical models for study the cloud dynamics and structure of the frontal rainbands // J. Atmos. Res. — 1998. — 45—47. — P. 356—376.
- Pirnach A., Krakovskaia S. Numerical studies of dynamics and cloud microphysics of the frontal rainbands // J. Atmos. Res. — 1994. — 33. — P. 333—365.
- 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. — 2005. — 62. — P. 3493—3519.