

**А.М.Пирнач**, д.ф.-м.н., проф., **В.М.Шпиг**

*Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт*

## **ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, СОПРОВОЖДАВШИХ ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КРЫМУ**

**Аннотация.** *Трехмерные численные модели фронтальных облачных систем с детализированной микрофизикой, разработанные в УкрНИГМИ, были адаптированы к экстремальным условиям повышенной активности смерчей. Численные эксперименты проводились с использованием Декартовой системы координат параллельно с системой координат, учитывающей рельеф. Детально рассмотрены мезомасштабные явления, сопровождавшие цепь смерчей, проходивших над северной частью Крыма 22 июля 2002 года. Серия численных экспериментов была выполнена с целью поиска ключевых параметров, которые могли быть причиной возникновения исследуемых опасных явлений или определяли степень их активности.*

**Ключевые слова:** *численные модели, фронтальные облачные системы, вихри, мощные конвективные облака.*

### **1 Введение**

Настоящая работа продолжает многолетние теоретические и экспериментальные исследования фронтальных облачных систем и связанных с ними различных феноменальных явлений. Многие поколения отечественных и зарубежных ученых посвящали им свои исследования, а каждое новое исследование ставило новые вопросы и задачи. В последние годы авторами статьи моделировались фронтальные облачные системы, обусловившие опасные явления над Крымом и другими территориями Украины. Численные модели фронтальных облачных систем, проходивших над Крымом, первоначально были построены с целью теоретической интерпретации полевых экспериментов с кучевыми облаками, которые выполнялись на противоградовом экспериментальном метеорологическом полигоне (ПЭМП) в восточном Крыму [1]. Предметом изучения служили особенности эволюции облачности и вихрей различных масштабов и физической природы в мощных кучевых облаках и их окрестностях. Трехмерные диагностические и прогностические модели фронтальных облачных систем, разработанные в УкрНИГМИ для теоретической интерпретации полевых экспериментов и для изучения конкретных фронтальных синоптических ситуаций, были адаптированы для моделирования фронтальных облачных систем, сопровождавших опасные явления (шквалы, смерчи, конвективные суперячейки, сильные осадки и др.).

### **2 Методология исследований**

Образование и развитие облачной системы атмосферного фронта моделировалось с помощью системы уравнений, включающей уравнения движения, уравнения для температуры и влажности, уравнения состояния и неразрывности, а также систему кинетических уравнений для функций распределения облачных частиц и частиц осадков по размерам. Диагностические модели использовались для построения начальных полей динамических и термодинамических параметров с целью дальнейшего моделирования эволюции изучаемых мезомасштабных явлений. Прогностические модели облачной атмосферы с детализированной микрофизикой строились с целью проведения численных экспериментов по поиску ключевых

параметров, ответственных за формирование и развитие изучаемых опасных явлений. Использовались Декартова и  $z$ -сигма системы координат. Методические основы построения этих моделей описаны в [3–4,6].

Инструментом для исследования вихрей различной физической природы было выбрано уравнение вихря. Процессы формирования вихрей изучались и анализировались с помощью вычисленных по значениям составляющих скорости ветра значениям вертикальной составляющей вихря скорости и значениям отдельных компонент уравнения для этой составляющей. В Декартовой системе координат это уравнение и его составляющие записываются в виде [2]:

$$\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} = a - \beta v - \left( u \frac{\partial \Omega_z}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega_z}{\partial y} + w \frac{\partial \Omega_z}{\partial z} \right) - b + d + (rot_z \tau)_z, \quad (1)$$

$$\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (2)$$

$$a = (T_y P_x - T_x P_y) / (\rho T), \quad (3)$$

$$d = -(\Omega_z + l)(u_x + v_y), \quad (4)$$

$$b = w_y u_z - w_x v_z. \quad (5)$$

Вертикальная составляющая вихря скорости (2) и три составляющих уравнения (1) послужили предметом особенного внимания в этом исследовании. Очевидная роль дивергенции (4) в формировании вихрей дополняется исследованиями влияния термического ветра (3) на образование вихрей синоптического масштаба [2] и исследованиями составляющей (5), характеризующей комбинированное воздействие вертикального сдвига ветра и горизонтальных градиентов вертикальной составляющей скорости ветра, и по утверждению автора [5], являющейся ответственной за образование смерчей.

### 3 Ключевые параметры и процессы, порождающие смерчи

Ключевые параметры и процессы, которые определяли характер развития мощных конвективных облаков и сильных вихревых движений в области активности смерчей 22 июля 2002 года, были предметом изучения при проведении численных экспериментов. Начало координат  $(x; y) = (0; 0)$  выбранной координатной системы соответствует пункту зондирования г. Симферополя. Координаты  $(x; y)$  некоторых пунктов в зоне смерчей следующие: Джанкой (19; 113 км), Лобаново (9; 120 км), Выпасное (3; 132 км), Томашивка (-1; 139 км). Оперативные службы отметили цепь смерчей (четыре) в зоне деревень Томашивка–Выпасное и один смерч у деревни Лобаново. Максимальная активность смерчей отмечена временем 12:48 GMT. Смерчи формировались под мощными конвективными облаками, вершины облаков достигали тропопаузы. Более детальное описание этого явления можно найти в [1].

Начальное состояние  $t = 0$ , выбранное для интегрирования системы, заимствованной в [4], соответствовало времени зондирования 11:00 GMT. Для построения начальных полей были использованы диагностические модели, которые

строились по данным пунктов зондирования Украины и соседних стран (России, Турции, Румынии и др.). Для анализа выбранного состояния атмосферы в заданном районе и его окружении используем расчеты на равномерной сетке с шагами равными 10 км в горизонтальном направлении и 200 м в вертикальном (рис. 1).

Цепочки высоких конвективных образований отмечены на юге исследуемой зоны и на северо-западе. Зона активности смерчей находится в открытом треугольнике, образованном цепочками вихрей различной природы и цепочками высоких конвективных образований. Насыщения по отношению ко льду не обнаружено нигде, что свидетельствует об отсутствии крупномасштабной облачности, и, весьма вероятно, об интенсивном конденсационном и сублимационном росте облачных и дождевых частиц в конвективных облаках. Следует обратить также внимание на расположение изотерм и изобар в области с центром  $(x; y) = (10; 130 \text{ км})$ . Они расположены под большим углом друг к другу как на земле, так и на высоте, что свидетельствует о большой бароклинности атмосферы в этом районе. Различные возмущения атмосферы наблюдаются поблизости зоны активности смерчей. В самой же зоне градиенты метеорологических характеристик сравнительно небольшие.

Время от времени между разными цепочками возмущений образуются вытянутые структуры в виде пятен или полос, которые при распаде порождают много мелких вихрей с различной угловой скоростью, в том числе и критической для образования смерчей.

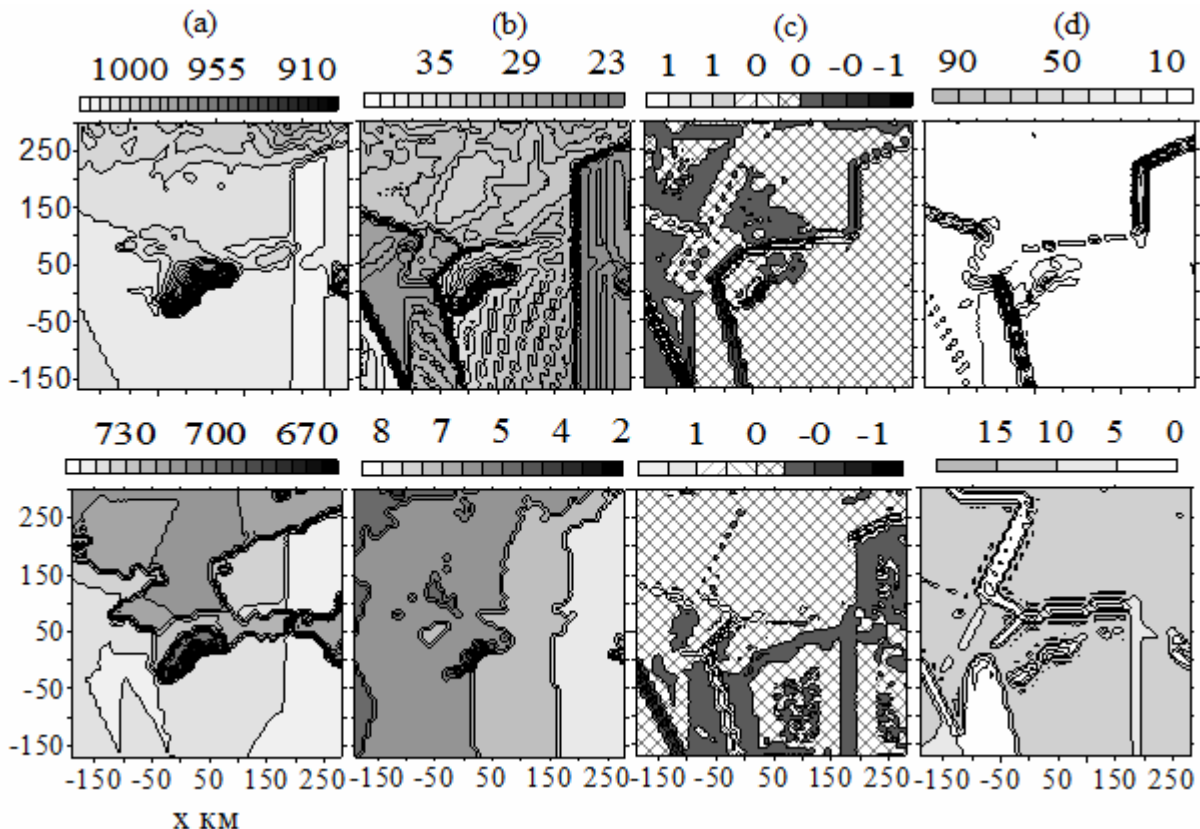
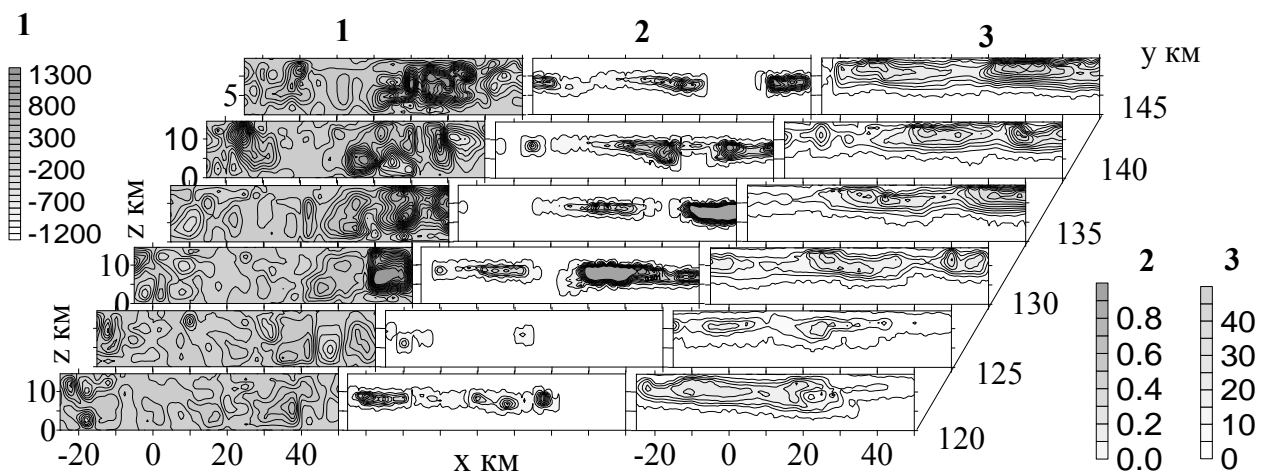


Рис. 1 – Состояние метеорологических характеристик при  $t = 0$  (11:00 GMT). Первый ряд, (a); (b); (c) – давление, гПа; температура, °C; вертикальная составляющая угловой скорости вихря, 1000/c, при  $z = 0$ ; (d) – максимальные по  $z$  значения вертикальной скорости, см/с. Второй ряд, как первый,  $z = 3 \text{ км}$ , (d) - высота столба с восходящими движениями, км.

Эволюция вихрей и облачности в зоне активности смерчей моделировалась с помощью интегрирования интегро-дифференциальной системы уравнений [4] с использованием вложенных сеток. На рис. 2–3 показаны результаты расчетов, полученные с помощью z-сигма системы координат с шагами по горизонтали 2,5 км для мелкой сетки и с шагами 25 км в окружении. Шаг по высоте равнялся 200 м для 75 уровней.

На рис. 2 представлены пространственные распределения вертикальных движений, водности облака и концентрации кристаллов после 90 мин рассчитанной эволюции. Облака были расположены выше нулевой изотермы, в основном выше 5 км. Распределение облачности характерно наличием высоко расположенных мощных смешанных облаков и высокой концентрацией кристаллов над ними, что создавало благоприятные условия для образования осадков.

Несмотря на высокую осадкообразующую способность облаков, осадки из них доходили до земли редко из-за испарения в мощных слоях с недосыщением по отношению ко льду, расположенных под облаками, и выпадали преимущественно в виде града. Максимальные вертикальные движения были расположены вне области активности смерчей, практически окружая эту область со всех сторон. Максимальные значения водности обнаружены на рис.2 при  $x > 10$  км и  $y > 130$  км. При  $y = 125$  км в облачности наблюдается разрыв, показывающих принадлежность представленных облаков к различным облачным образованиям. В окрестности столба с центром  $(x; y) = (10; 130$  км) наблюдалось конвективное облако с кристаллической наковальной и мощным слоем с повышенной водностью под ней. Засев кристаллами нижележащей смешанной прослойки при наиболее благоприятных условиях с температурой около  $-12^{\circ}\text{C}$  могло привести к интенсивной перегонки воды с капель на кристаллы и быстрому росту кристаллов до размеров града. Эти градины не всегда успевали испариться даже в недосыщенном мощном подоблачном слое. К тому же интенсивное испарение этих кристаллов могло заметно понизить температуру воздуха под облаком и на земле, обуславливая ее ячеистую структуру, что, в свою очередь, способствовало образованию новых вихрей и новых конвективных ячеек.



1 – вертикальные движения, см/с; 2 – водность, г/кг; 3 – концентрация кристаллов, 1/г.

Рис. 2 – Распределение облачности и вертикальных движений при  $t = 90$  мин.

Эволюция облачности и некоторых характеристик атмосферы, оказавших решающее влияние на развитие вихревых движений приведены на рис. 3. Характерным есть то, что непосредственно в зоне активности смерчей вертикальные движения не

настолько сильные, как в окружающих их областях. Сильные вихри и восходящие движения посещают их лишь на короткое время.

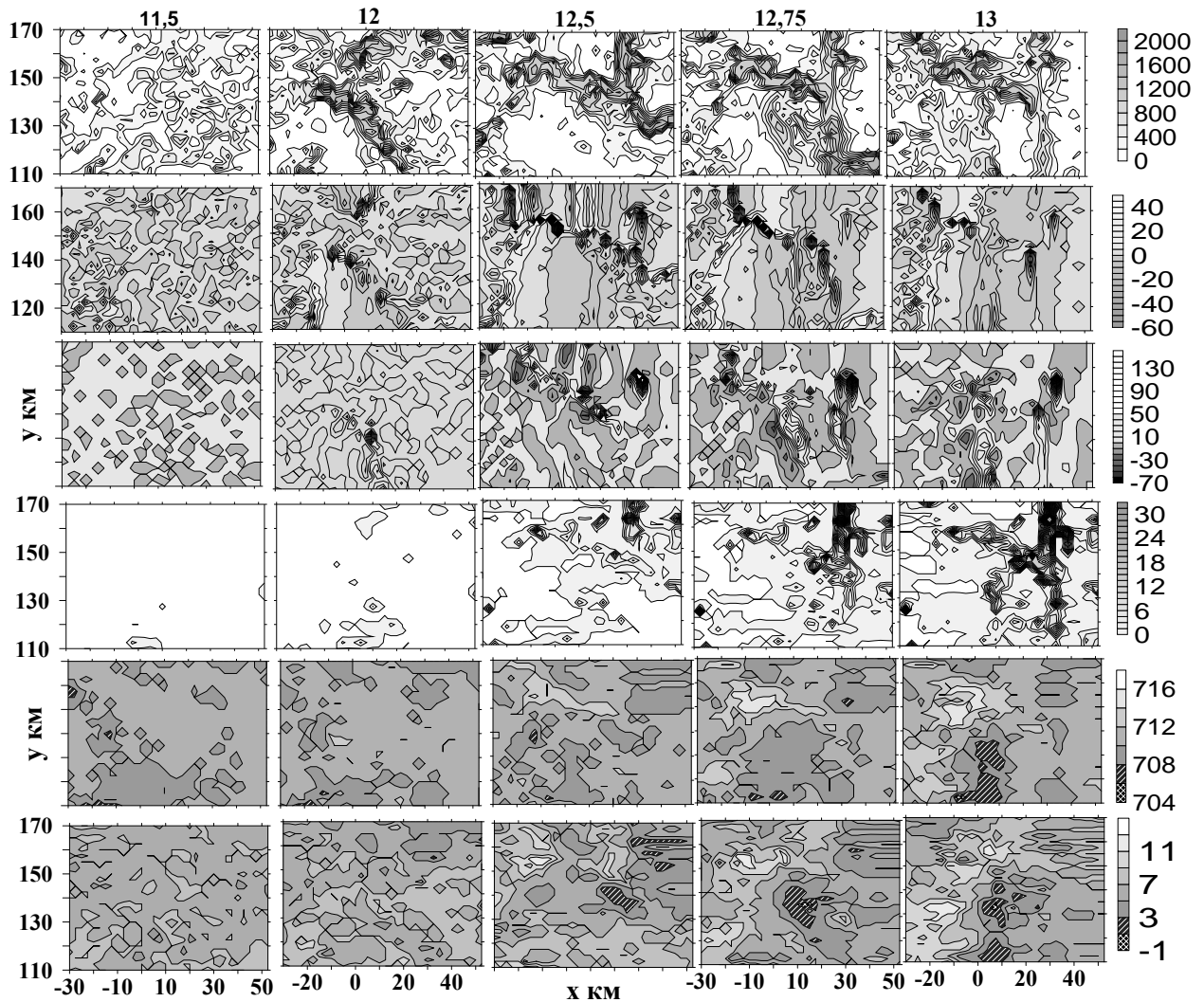


Рис. 3 – Эволюция мезомасштабных образований, сопровождавших смерчи. 1-й ряд – Максимальные по  $z$  восходящие движения, см/с, числа у шкалы справа. 2-й – Угловая скорость вихрей,  $1/1000$  с на высоте 3 км. 3-й – Составляющая уравнения вихря,  $d, 1/10^6 \text{с}^2$ ,  $z = 3$  км. 4-й – Общий запас водности и ледности облаков, мм. 5-й – Давление, гПа,  $z = 3$  км. 6-й – Температура, °С,  $z = 3$  км.

Анализ результатов моделирования показал, что хорошим индикатором появления опасных явлений являются вертикальные движения. Они первыми сигнализируют о появлении полос повышенных градиентов метеорологических величин. Причем пятна и полосы сильных восходящих движений появляются в нескольких местах. Затем, увеличиваясь пересекаются друг с другом, образуя более крупные образования и сильные вихревые движения, как циклонические, так и антициклонические. Формируются вихревые дорожки, которые при пересечении разбиваются на более мелкие вихри с повышенной угловой скоростью. Наиболее вероятно, что в это время и создаются наиболее благоприятные условия для образования смерчей. Кучевые облака появляются несколько позже после образования

вихревых дорожек и их активный рост сопровождается распадом вихревых дорожек на отдельные вихри. Затем облака собираются в ансамбли, которые могут существовать еще довольно длительное время. Во время распада крупных вихрей от облачного ансамбля, который с некоторым запаздыванием повторяет конфигурацию вертикальных движений, отделяются более мелкие вихри и отдельные облака, которые получив заряд энергии от мощных вихрей могут при благоприятных условиях некоторое время развивать большую угловую скорость. Цепь смерчей, которая имела место в исследуемом районе, с большой вероятностью имела такую природу.

Цепь вихрей с повышенной угловой скоростью в области активности смерчей была замечена уже при  $t = 1$  ч (12:00 GMT), но затем она несколько передвинулась на север, очевидно, под влиянием более мощного вихревого образования, представляющего диполь циклон–антициклон, который надвигался с юга. Этот диполь пересек цепочку вихрей, расположенных почти по диагонали вложенной сетки, и объединился с вихрями, которые двигались с севера. Образовалась мощная система вихрей с различными свойствами, которая уже при  $t = 105$  мин (12:45 GMT) начала быстро распадаться, организуя систему мелких вихрей в зоне активности смерчей. Наиболее активной в этот момент была и сдвиговая составляющая уравнения вихря (третий ряд). Две цепи циклонических и антициклонических ячеек явно просматриваются в этом ряду в этот момент. Совпадение по знаку для этой составляющей и угловой скорости вихря четко просматривается для антициклонических ячеек. Возможно, они и входили в состав цепочки смерчей.

Давление имело ячеистую структуру. В области активности смерчей оно было пониженным. Отдельные замкнутые ячейки с пониженным давлением сопровождали развитие облачности и мелких вихрей. С течением времени после прохождения смерчей сужались области с пониженным давлением и расширялись области с повышенным давлением. Ячейки вытягивались в виде эллипсов, расположенных почти перпендикулярно к подобным замкнутым структурам пониженной температуры.

В ячейках пониженной температуры, расположенных в области прохождения смерчей, по мере приближения времени возникновения смерчей температура понижалась. В окрестности точки  $(x, y, z) = (10, 130, 3 \text{ км})$  она понизилась от 1 до  $-1$  °C менее чем за 30 мин. Минимальная температура ( $-1$ °C) на рис. 3 отмечена при  $t = 105$  мин. При  $t = 120$  мин минимум был равен 0°С. Вероятно, наличие замкнутых ячеек пониженной температуры и резкое ее понижение в таких ячейках, а также взаимное расположения замкнутых ячеек температуры и давления может служить одним из предикторов появления вихрей с критической угловой скоростью.

Сравнительный анализ результатов численных экспериментов для плоских и сложных рельефов, выполненных с использованием Декартовой и  $z$ -сигма систем координат показал, что исключение рельефа из расчетов эволюции облачности приводило к исчезновению мелких вихрей с повышенной угловой скоростью и мощных конвективных ячеек. Расчеты, проведенные в Декартовой системе координат без учета рельефа, не были отмечены появлением особо опасных возмущений в данной области.

#### **4 Выводы**

Трехмерные диагностические и прогностические микрофизические модели с учетом и без учета орографии, разработанные в УкрНИГМИ, были адаптированы для условий эволюции фронтальных облачных систем в экстремальных условиях развития смерчей. Проведено несколько серий численных экспериментов с целью поиска

ключевых параметров, определяющих характер развития вихревых образований и сопровождающих их явлений.

Наличие ячеистой структуры в распределении давления и температуры обуславливало развитие зон конвергенции и сверхмощных конвективных образований. Повышенные градиенты давления, температуры, вертикальной составляющей вихря, усиленные орографией, обуславливали развитие очагов холодного воздуха, полос или очагов сильных восходящих и нисходящих движений, цепочки циклонических и антициклонических вихрей, супермощных конвективных ячеек с вертикальными движениями, скорость которых достигала десятков м/с.

Результаты сравнительного анализа относительного влияния различных составляющих уравнения вихря на эволюцию мезомасштабных циклонических и антициклонических образований показал, что наиболее сильным является влияние дивергенции. Сравнимым с ним при очень сильных восходящих движениях может быть и влияние сдвиговой составляющей.

Наиболее вероятно, что особо опасными бывают случаи, когда обе эти составляющие действуют в одном направлении с угловой скоростью вихря, обуславливая ее быстрый рост. Составляющая, представляющая влияние термического ветра в исследуемых ситуациях, по величине была более чем на порядок ниже вышеназванных составляющих.

Расчеты проведенны в Декартовой системе координат без учета рельефа не были отмечены наличием особо опасных явлений в данной области.

## Литература

1. Лесков Б.Н., Пирнач Г.М., Сирота М.В., Шниг В.М. Смерчі у Криму 22 липня 2002 року. – Наук. пр. УкрНДГМІ, 2007, вип.256, с. 75–91.
2. Матвеев Л.Т. Правила качественного анализа условий вихреобразования в атмосфере и некоторые результаты их проверки. – Метеорология и гидрология, 1955, №4, с. 28–30.
3. Паламарчук Л.В., Пирнач А.М. Исследование внутренней структуры фронтальных зон при помощи трехмерных полуэмпирических моделей. – Тр. УкрНИГМИ, 1992, вып.243, с. 107–124.
4. Пирнач Г.М. Моделювання фронтальних хмар із сильними опадами для рівнинних та гірських рельєфів. – Наук. праці УкрНДГМІ, 2005, вип.251, с. 37–50.
5. Ромов А.И. Об образовании смерчей. – Метеорология и гидрология, 1986, №5, с. 14 -22.
6. Pirnach, A. (1998) Construction and application of the various numerical models for study the cloud dynamics and structure of the frontal rainbands. J. Atmos. Res., pp. 45–47.

## Numerical simulation of the evolution of mesoscale formations accompanied the dangerous events over Crimea

**Abstract.** 3-D forecasting microphysical models of frontal cloud systems were adapted to extreme conditions during the tornado activity. Models with and without including of a complex relief developed in UHRI have been used for theoretical interpretation of the investigated phenomena. Conditions of formation and evolution of the deep convective cells, strong updrafts and downdrafts, strong rotation during passing of tornados over the north part of the Crimea on July 22, 2002 were investigated in this paper. Series of numerical experiments have been carried out with aim to research the key parameters caused features of development of dangerous events and their activity.

**Keywords:** numerical model, cloud frontal systems, vortices, heavy convective clouds