

А.Ю. Канухина

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА
КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИНДЕКСОВ
КОНВЕКЦИИ, РАССЧИТАННЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЧИСЛЕННОЙ МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ**

A.Yu. Kanukhina

**FEASIBILITY OF FORECASTING CONVECTIVE
PHENOMENA USING CONVECTION INDEXES
CALCULATED BY THE NUMERICAL MESOSCALE MODEL**

Статья посвящена исследованию возможности прогнозирования времени, места возникновения и типа конвективных явлений с помощью анализа полей индексов конвекции. Расчет конвективных параметров производится по данным прогнозов и анализов мезомасштабной численной модели прогноза погоды HIRLAM. Шесть исследованных индексов разбиты на три группы; индексы первой группы дают диагностическую характеристику состояния атмосферы, затем рассматривается параметр, выполняющий триггерную функцию в вопросе возникновения конвекции, индексы третьей группы несут информацию о возможном типе явления.

The paper studies the feasibility of forecasting the time and place of originating convective phenomena and their type using analysis of convection index fields. To calculate these parameters, HIRLAM (High Resolution Local Area Model) forecast and analysis files have been processed. Six indexes chosen for study were divided into 3 groups. Indexes from the diagnostic group estimate atmospheric stability state. Additionally, the parameter having triggering function for development of convective events was calculated. The third group gives information on the type of possible convective phenomena.

Введение

Мощные конвективные процессы могут являться причиной сильных, разрушительных порывов ветра как горизонтальных, так и вертикальных, резких подъемов уровня воды в небольших водоемах, губительного для сельскохозяйственных культур крупного града. Эти мезомасштабные явления быстро развиваются, и имеющаяся сеть станций наблюдений не всегда позволяет их вовремя зарегистрировать [Буз, 1985; Русин, 1996; Stensrud, 1997]. Развитие численных моделей прогноза погоды дает возможность получать данные о состоянии атмосферы заблаговременно и с хорошим пространственным разрешением. Поэтому и была исследована возможность использования индексов конвекции, рассчитанных по выходным данным HIRLAM(High Resolution Local Area Model) для определения ожидаемого времени и места возникновения мезомасштабных конвективных явлений, их классификации. Для оценки состояния атмосферы используются шесть различных индексов конвекции. Одни из них характеризуют

степень неустойчивости атмосферы, другие отражают степень готовности атмосферы к развитию конвекции, последние несут информацию о том, насколько сильным будет конвективное явление.

Данные и метод анализа

Пространственное разрешение использованной версии HIRLAM 22 км, шаг по времени 15 мин. Для обработки были предоставлены данные прогнозов через 6 ч за интервалы 6, 12, 18, 24 и 30 ч. Файлы анализа представляли собой реальные данные о состоянии атмосферы, приведенные к модельным уровням с помощью процедуры оптимальной интерполяции. Приземному уровню соответствует 31-й уровень HIRLAM. В качестве схем параметризации конвекции в модели используется схема STRACO (Soft TRAnSition COndensation), основанная на подходе Сундквиста (Sundqvist), и схема Кайна – Фритча (Kain, J.S. and Fritsch, J.M.) [7].

По данным прогнозов HIRLAM рассчитывались поля и профили индексов конвекции, с их помощью выделялись области вероятного возникновения явлений. Полученные результаты сравнивались с данными наблюдений. В качестве данных наблюдений были использованы файлы анализа HIRLAM и данные радиозондирования в конкретных пунктах, приземные наблюдения (синоптические карты OSCAR). Для выполнения работы была выбрана область, включающая Северо-Запад России и Скандинавский полуостров. Анализировались дни, разбитые на три группы. В первую группу вошли дни, когда наблюдались сильные конвективные явления, и характеристики атмосферы указывали на достаточно большую степень ее неустойчивости (29.06.2000, 19.06.2001, 03–06.07.2002). Ко второй группе были отнесены сроки, не содержащие большого количества конвективных явлений, однако индексы конвекции указывали на наличие энергии неустойчивости и готовность атмосферы к развитию конвекции (16–20.07.2003). Третью группу составили дни, в которые, судя по индексам неустойчивости, атмосфера была стабильна и мезомасштабных конвективных явлений не наблюдалось (21–23.11.2001). Возможность использования прогнозов HIRLAM для предсказания возникновения конвекции оценивалась на основе визуального анализа карт и профилей индексов, а также построения диаграмм рассеяния и расчета коэффициентов линейной корреляции.

Для расчета индексов конвекции в качестве начальных данных использовались следующие результаты прогноза HIRLAM: поля температуры воздуха, температуры точки росы, компонент ветра, характеристик влажности у поверхности земли и на высотах за разные сроки, тенденции приземного давления.

Индексы, выбранные для анализа

На основании зарубежных исследований [Calas, 2000; Gray, 1998; Ducrocq, 1998; Holton, 1979; Riosalido, 1998; Senesi, 1998] представлялся оправданным следующий выбор параметров, характеризующих состояние атмосферы. Неоднократно проверенные на практике и вполне репрезентативные индексы CAPE,

МОСОН, HEI оценивают энергетическое состояние атмосферы с учетом сдвига ветра по вертикали и притока влаги в приземном слое. Не так часто используются, но полезны для прогнозирования опасных явлений (ОЯ) показатель конвективной неустойчивости А.И. Фальковича [Русин, 1996], индекс эквивалентно-статической неустойчивости и обобщенный индекс С неустойчивости второго рода. Такой набор параметров позволил разделить используемые в работе индексы на три группы:

1) диагностические – характеризуют готовность атмосферы к развитию конвекции (Γ , С, МОСОН);

2) индекс χ , играющий роль триггера в принятии решения о возникновении конвекции;

3) индексы, позволяющие предсказывать тип явления (CAPE, HEI).

При расчете индексов использовались следующие базовые формулы:

а) Индекс статической устойчивости атмосферы Γ_e [Русин, 1996]:

$$\Gamma_e = \frac{\theta(\theta_{eU} - \theta_{eL})}{\theta_e \Delta Z}, \quad (1)$$

где θ – потенциальная температура; θ_e – эквипотенциальная температура;

$$\Gamma = \frac{\Gamma_e}{\bar{\gamma}}, \quad (2)$$

где $\bar{\gamma}$ – средний влажноадиабатический градиент, 0,65 °/100 м.

Благодаря формуле (2) можно работать с безразмерным индексом. Положительное его значение указывает на статическую устойчивость атмосферы, отрицательное, наоборот, – на статическую неустойчивость.

Статическая неустойчивость атмосферы является необходимым, но недостаточным условием для формирования ОЯ, т.е. атмосфера должна быть и конвективно неустойчивой.

б) МОСОН (moisture convergence) – параметр, описывающий приток влаги в область на нижних уровнях и восходящие движения воздуха [Calas, 2000; Rio-salido, 1998; Senesi, 1998]:

$$\text{МОСОН} = -\nabla_{hh}(rV) = -r\nabla_H V - V\nabla_H r, \quad (3)$$

где r – отношение смеси на высоте 2 м; V – скорость ветра на высоте 10 м.

Знак этого индекса характеризует поле конвергенции; область положительных значений МОСОН указывает на конвергенцию ветра, а следовательно, и влаги в нижних слоях атмосферы.

в) Обобщенный показатель состояния С отражает тип циркуляции в атмосфере [Русин, 1996]:

$$C = \left[(\Gamma - \Omega) \sqrt{\Gamma^2 + \Omega^2} \right] e^{-\Omega \Gamma}, \quad (4)$$

где Ω – показатель характера циркуляции; Γ – индекс статической устойчивости атмосферы. Оба члена безразмерные:

$$\Omega = \frac{\Omega_{\Gamma}}{|\Omega_{\Gamma}|}, \quad (5)$$

$$\Omega_{\Gamma} = \frac{1}{\rho l} \nabla^2 P, \quad (6)$$

где Ω_{Γ} – геострофический вихрь, с^{-1} ; l – параметр Кориолиса; $\nabla^2 P$ – лапласиан давления, гПа; $|\Omega_{\Gamma}|$ – абсолютное среднее значение геострофического вихря, $1/\text{с}$.

Если $\Omega > 0$, имеет место циклоническая циркуляция, если $\Omega < 0$ – антициклоническая циркуляция.

Чем больше отрицательное значение C , тем более неустойчива атмосфера.

г) Но возможно, что восходящие движения могут не успеть до своего собственного изменения привести воздух в насыщенное состояние или влажность воздуха окажется недостаточной. Тогда необходимо оценить значения показателя Фальковича χ [Русин, 1996]:

$$\chi = \frac{\Delta Z_{\text{кнс}} - \Delta Z_3}{\Delta Z_3}, \quad (7)$$

где $\Delta Z_{\text{кнс}}$ – толщина конвективно-неустойчивого слоя; ΔZ_3 – толщина запирающего слоя.

Положительные значения указывают на конвективную неустойчивость атмосферы, а следовательно, на высокую вероятность развития конвекции, отрицательные – на возможность появления только систем мелкой конвекции.

д) Для суждения о характере возможных конвективных возмущений применялись дополнительные параметры состояния атмосферы: HEI, оценивающий значение энергии спиральности, и CAPE – доступная потенциальная конвективная энергия [Gray, 2001; Ducrocq, 1998; Holton, 1979; Stensrud, 1997; Tuduri, 1997].

HEI (helicity energy index) – энергия спиральности, определяемая как:

$$\text{HEI} = \text{CAPE} \cdot H, \quad (8)$$

где сама спиральность $H = \vec{V}_{\text{rel}} \text{rot} \vec{V}_{\text{rel}}$; \vec{V}_{rel} – скорость ветра относительно движущейся конвективной ячейки, м/с; CAPE (convective available potential energy) – доступная потенциальная конвективная энергия:

$$\text{CAPE} = \int_0^{Z_h} g \frac{\theta_e - \bar{\theta}_e}{\bar{\theta}_e} dz, \quad (9)$$

где θ_e и $\bar{\theta}_e$ – соответственно эквипотенциальная температура на уровне z_k поднимающейся частицы и окружающей среды, К; g – гравитационное ускорение, м/с²; Z_h – высота, на которой температура окружающего воздуха и температура в облаке равны, м.

Чем выше значение HEI, тем более интенсивное и опасное конвективное явление может возникнуть, т.е. этот параметр необходим для определения типа ОЯ.

Полученные результаты

Расчет выбранных параметров конвекции и создание их 3-мерных полей производились с помощью скриптов Grads. Полученные за все дни и сроки коэффициенты корреляции были осреднены для каждого параметра. И по этим средним построена результирующая диаграмма коэффициентов корреляции (рис. 1).



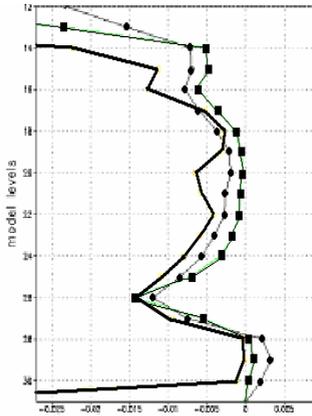
Рис. 1. Коэффициенты линейной корреляции индексов, рассчитанных по прогнозам HIRLAM, с индексами, рассчитанными на основе данных анализа HIRLAM.

Ряд 1 – коэффициент корреляции индекса С, ряд 2 – коэффициент корреляции индекса Г, ряд 3 – коэффициент корреляции индекса χ , ряд 4 – коэффициент корреляции индекса CAPE, ряд 5 – коэффициент корреляции индекса MOCON, ряд 6 – коэффициент корреляции индекса HEI.

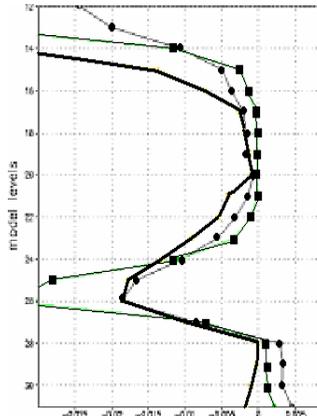
Отладка алгоритма анализа проводилась на конкретном случае 23.11.2001, когда на аэродроме Кярдла (Эстония, о. Хийумаа) наблюдалось явление сильной конвекции. Произошло быстрое образование Сб, проявившее себя мощными вертикальными движениями воздуха, которые помешали нормальной посадке воздушного судна. На аэродроме нет станции радиозондирования, но явления погоды в ближайших пунктах показывали наличие конвективных явлений. Были зарегистрированы ливневые дожди, гроза между сроками, дождь со снегом, Сб. Были рассчитаны и построены как поля, так и профили величин для аэродрома Кярдла (рис. 2).

Видно, что на модельном уровне 27 – 29, что соответствует барическому уровню 950 – 850 гПа, индекс статической неустойчивости атмосферы Г и обобщенный индекс неустойчивости второго рода С отрицательны, что благоприятствует развитию конвекции и согласуется с теоретическими материалами. Показатель конвективной неустойчивости Фальковича χ близок к нулю на мо-90

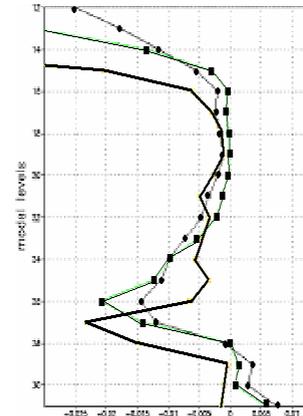
дельном уровне 28 – 30, что соответствует барическому слою 1000 – 900 гПа, но вышеупомянутые индексы С, Г здесь положительны, а там, где они отрицательны, χ меньше нуля.



Вертикальный профиль С, Г, χ по данным анализа на 12UTC 23.11.2001.



Вертикальный профиль С, Г, χ по данным прогноза на 12 ч за 23.11.2001 00:00UTC на 12UTC 23.11.2001 $fc = 12$.
Вертикальный профиль $\chi/1000$
Вертикальный профиль С-100
Вертикальный профиль Г



Вертикальный профиль С, Г, χ по данным прогноза за 22.11.2001 12:00UTC на 12UTC 23.11.2001 $fc = 24$.



Рис. 2. Значения С, Г, χ .

Таким образом, отрицательный индекс Фальковича указывает на невозможность развития ОЯ, но существует вероятность развития систем мелкой конвекции. Индексы С и Г отрицательны в слое 950–850 гПа даже при прогнозе на 6, 12 и 24 ч. Такое несовпадение можно объяснить четкой локальностью применения χ . Значит, разрешение модели, равное 22 км, является недостаточным для использования в прогнозе χ . Об этом же можно сказать при рассмотрении диаграмм рассеяния для χ на различные сроки и результирующего графика коэффициентов корреляции (см. рис. 1). На последнем индекс Фальковича имеет наихудшие среди остальных параметров показатели по коэффициенту корреляции.

Ясно, что очень важно включать в расчеты параметров конвекции температуру поверхности земли (а в данном случае также и моря), что и было проверено сравнением рассчитанных параметров для двух типов поверхности. Однако изменений в знаке индексов не последовало, наблюдалось только лишь незначительное изменение числовых значений индексов. По результатам оценки диаграмм рассеяния и визуального анализа полей индексов ясно, что изолинии С и Г повторяют форму друг друга (рис. 3). Поэтому представляется возможным ограничиться использованием только индекса С, так как он содержит в себе информацию и о статической устойчивости атмосферы, и об условиях циркуля-

ции. Прогнозы С и Г на 6 и 12 ч близки к данным анализа, тогда как в полях прогноза этих индексов на большие сроки многие области неустойчивости теряются, значения минимумов и максимумов значительно меньше по модулю, порой область неустойчивости сдвинута (рис. 4).

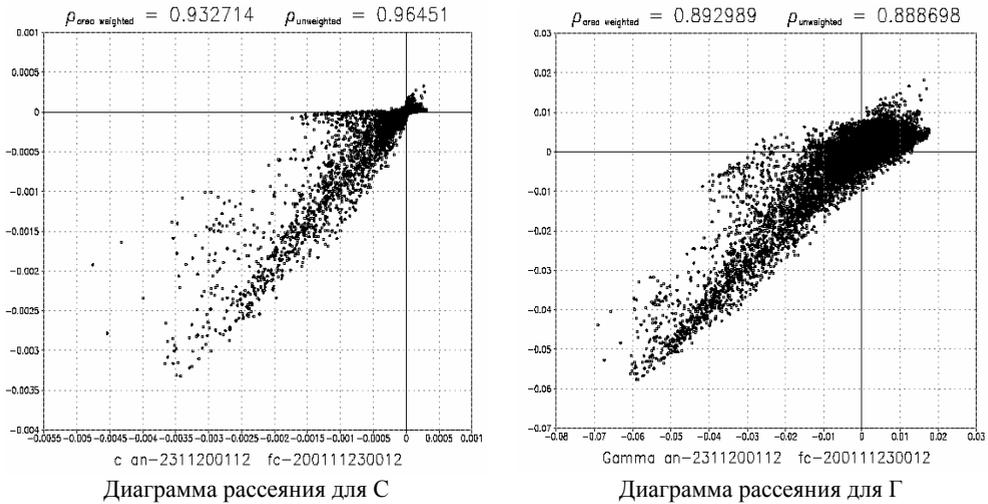


Рис. 3. Диаграммы рассеяния параметров состояния атмосферы для прогноза на 12 ч по данным анализа за 23.11.2001 12:00 UTC и прогноза за 23.11.2001 00:00 UTC.

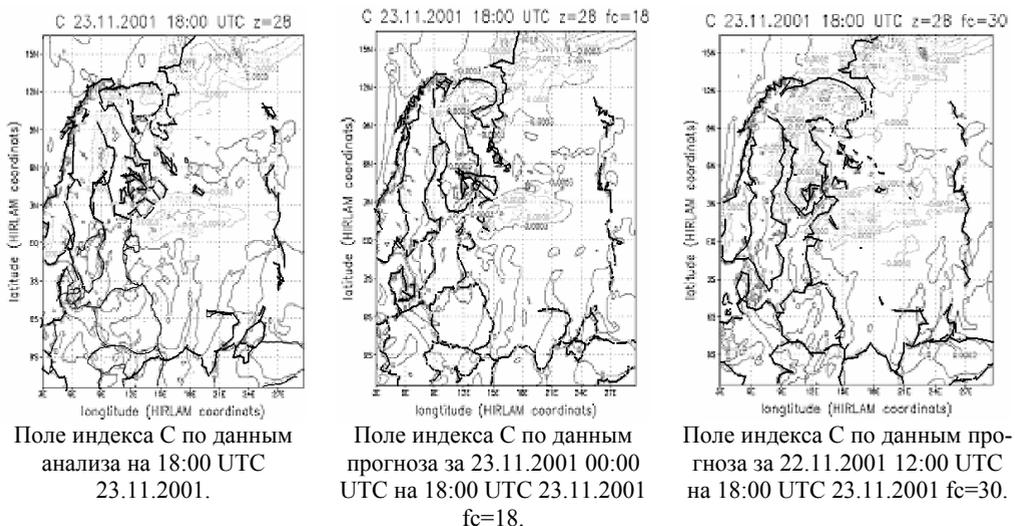


Рис. 4. Значения С на уровне 950 гПа на 23.11.2001.

Индекс статической неустойчивости атмосферы и обобщенный параметр конвективной неустойчивости имеют наилучший коэффициент корреляции для прогнозов на 6 и 12 ч по сравнению с остальными индексами (см. рис. 1). Рас-
92

смотрение приземных карт погоды и полей индексов, рассчитанных по данным анализа на тот же срок, для дней первой группы выявило, что значения CAPE хорошо выделяют область возможного возникновения ОЯ, а районы положительных значений MOCON позволяют конкретизировать области развития влажной конвекции, оценить интенсивность ожидаемых явлений. Положительные значения HEI, как правило, ассоциируются с наличием Сб. Области неустойчивости в атмосфере значительно уменьшаются по площади от прогноза на 12 ч к прогнозу на 24 ч, расположение районов неустойчивости не совпадает. Это проявление действия механизма подавления конвекции в модели. Как видно из диаграмм рассеяния, наилучшие характеристики коэффициента корреляции принадлежат индексам С и Г. В период с 16 по 20 июля 2003 г. над Скандинавским полуостровом и северо-западной частью России не наблюдалось интенсивных или частых конвективных явлений. Поля индексов характеризовались или низкими, или нулевыми значениями CAPE и MOCON, диапазон значений HEI варьировался, но не позволил выделить какой-либо закономерности. Поля С и Г, по данным анализа, большей частью являлись положительными. Даже анализ полей χ не позволил выделить области возможного развития конвекции, хотя в действительности ОЯ наблюдались. В качестве примера, когда явных ОЯ не наблюдалось, а параметры атмосферы говорили о наличии неустойчивости, были взяты данные за 22–24.11.2001 над территорией Скандинавского полуострова и Северо-Западом России. С помощью полей CAPE, MOCON, HEI была выделена область дождей и ливневых дождей, протянувшаяся от Финского залива до Урала. Параметры С, χ и Г оказались не столь репрезентативны при данном состоянии атмосферы и не смогли выделить интересующую область ОЯ.

Основные выводы

Значения показателя χ , рассчитанные по прогнозу, в целом довольно существенно отличаются от показателей, найденных по анализу, и не могут применяться для оценки состояния атмосферы при прогнозировании более чем на 6 ч и пространственном разрешении 22 км. Такую же характеристику можно было отнести и к HEI. К сожалению, параметры CAPE и MOCON также не могут использоваться для прогноза более чем на 12 ч. Наилучшие коэффициенты корреляции данных прогноза и данных анализа наблюдались для индекса неустойчивости второго рода С и характеристики статической неустойчивости атмосферы Г. Их прогноз близок к реальному состоянию атмосферы даже на интервале, равном 24 ч, а для индекса С и того больше.

Можно заключить, что использование выходных данных HIRLAM с пространственным разрешением 22 км для вычисления прогностических значений рассматриваемых индексов возможно при заблаговременности, не превышающей 6 ч. Представляется полезным использовать рассчитанные индексы конвекции для оценки эффективности используемых в модели схем параметризации конвекции или эффекта уменьшения шага модели по пространству.

Благодарности

Хочется выразить искреннюю признательность за поддержку и консультации научным руководителям проф. Г.Г. Тараканову и А.И. Погорельцеву, сотрудникам кафедры метеопрогнозов, особенно Е.В. Курзеновой и О.В. Анискиной, сотрудникам ФМИ (Хельсинки), а именно Лауре Ронту за предоставление данных HIRLAM и ценные комментарии.

Литература

1. Буз А.И. Развитие мощной конвекции в мезомасштабных метеорологических областях // Труды Всесоюзного симпозиума. Исследование взаимодействия мезо- и макромасштабных процессов в атмосфере и применение статистических методов в метеорологии. – М., 1985, с. 55–58.
2. Русин И.Н., Тараканов Г.Г. Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. – СПб.: изд. РГГМИ, 1996. – 308 с.
3. Calas C., Ducrocq V., S n si S. Mesoscale analyses and diagnostic parameters for deep convection nowcasting. // Meteorol. Appl. 2000, 7, p. 145–161.
4. Ducrocq V., Tzanos D., S n si S. Diagnostic tools using a mesoscale NWP model for the early warning of convection. // Meteorol. Appl. 1998, 3, p. 329–349.
5. Gray M.E.B. The impact of mesoscale convective system potential-vorticity anomalies on numerical-weather- prediction forecasts // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society., 2001, No. 571, p. 73–89.
6. IFS Documentation Cycle CY25r1. Chapter 5 ‘Convection’, Part IV: ‘Physical processes’, 2003, p. 68–71.
7. Improvement of techniques for early warning of convection. Project I.1, Improvement of Nowcasting Techniques, Theme I: Strong Convection, COST Action 78, Final report, p. 37–66.
8. HIRLAM Documentation Manual, System 2.5, June 1996, Edited by E. Kallen.
9. Holton, James R. An Introduction to Dynamic Meteorology, International Geophysics Series. Vol. 23, Second Edition, Academic Press, 1979.
10. Mesoscale Meteorology. A primer for Naval Forecasters. Foundation Topics. Principles of Convection I: Buoyancy and CAPE/ <http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/cape/print.htm>.
11. Riosalido R., Carretero O., Elizsga F., Martin F. An experimental tool for Mesoscale Convective Systems (MCS) nowcasting. Nowcasting and Very Short Range Forecasting. SAF Training Workshop. 9–11 December, 1998.
12. S n si S., Ducrocq V., Rose-May Thepenier R.-M., Calas C. MSG and the nowcasting of convective systems: Relevance of instability indices and other convection-related diagnostics. Nowcasting and Very Short Range Forecasting. SAF Training Workshop. 9–11 December, 1998.
13. Stensrud D.I., Cortinas I.V., Brooks H.E. Discriminating between Tornadoic and Nontornadoic Thunderstorms Using Mesoscale Model Output. // Weather and Forecasting. September, 1997, vol. 12, № 3, p. 613–632.
14. Tuduri E., Ramis C. The Environments of Significant Convective Events in the Western Mediterranean. // Weather and Forecasting. // 1997, vol. 12, № 2, p. 294–306.