

УДК [551.501.8+551.509.326](470+476)

Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России

А.А. Спрыгин¹, М.И. Прохареня²

¹ *Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный, Россия;*

² *Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, г. Минск, Республика Беларусь
spralexandr@gmail.com, maryprokharenya@gmail.com*

В статье приводится комплексный диагноз мощных конвективных структур (конвективных штормов) и образования мезомасштабного конвективного комплекса над территорией Республики Беларусь, впоследствии перемещавшегося через центральные районы России, который сопровождался возникновением опасных конвективных явлений, на примере анализа случая 13 июля 2016 года. Для диагноза штормов использовались спутниковые и радарные данные, а также данные грозопенггационных сетей. Проанализированы условия для развития мощных конвективных процессов и опасных явлений и успешность их прогноза по данным глобальной прогностической модели GFS.

Ключевые слова: мезомасштабный конвективный комплекс, суперячейка, hook echo, Cold-U/V – сигнатура, спутниковый и радиолокационный диагноз, индексы неустойчивости, прогностическая модель GFS

Diagnosis and forecasting of convective structures accompanied by severe weather events based on model and remote sensing data over the territory of Belarus and central Russia

A.A. Sprygin¹, M.I. Prokharenya²

¹ *Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Moscow region, Russia;*

² *Center of Hydrometeorology, Radioactive Contamination and Environmental Monitoring of the Republic of Belarus, Minsk, the Republic of Belarus
spralexandr@gmail.com, maryprokharenya@gmail.com*

The complex diagnosis of severe convective structures (convective storms) and the analysis of formation of the mesoscale convective complex over the territory of the Republic of Belarus and its movement through the central regions of Russia are presented. The mesoscale convective complex was accompanied by the destructive convective events and was observed on July 13, 2016. To diagnose the storms, satellite, radar, and lightning location network data are used. Conditions for the development of severe convective processes and severe weather events and the skill of their forecasting with the GFS global forecast model are analyzed.

Keywords: mesoscale convective complex, supercell, hook echo, Cold-U/V signature, radar and satellite diagnosis, instability indexes, GFS forecast model

Введение

Среди многообразия опасных метеорологических явлений те из них, которые связаны с процессами мощной конвекции в атмосфере (интенсивные грозы, сильные ливни, град, шквалы, смерчи), являются наиболее разрушительными, и поэтому их исследование с целью повышения качества диагноза и прогноза имеет большое практическое значение. Важно, при подобных исследованиях, применение комплексного подхода: сочетание использования как фактических данных дистанционного зондирования атмосферы (радарных, спутниковых и др.), аэрологического зондирования, данных сети метеостанций, так и их сопоставление с расчетами прогностических моделей.

В статье приведен комплексный анализ одного из случаев формирования изолированных мощных штормов, перерастающих в мезомасштабный конвективный комплекс (МКК). Комплекс зародился над территорией Беларуси 13.07.2016 г. и перемещался в течение дня над территорией Смоленской и Московской областей России, затем ночью 14.07.2016 г. распался над территорией Владимирской и Нижегородской областей. Прохождение штормов сопровождалось опасными явлениями (ОЯ), такими как шквалы, ливни, смерч и высокая молниевая активность, вызвавшими локальные разрушения и приведшими к человеческим жертвам.

В исследовании при расчетах индексов конвекции и визуализации метеорологических полей по модельным данным использовалось программное обеспечение OpenGrads. Для диагноза штормов – спутниковые данные Meteosat-9 (MSG-2) в виде как RGB-композиционных изображений (построенные с помощью ПО MSGProc), так и изображений, полученных с помощью специальных алгоритмов обработки [5] с помощью скрипта, написанного на языке программирования Python, а также данные метеорологических радиолокаторов ДМРЛ и сетей грозопеленгации – из архива Центральной аэрологической обсерватории.

Анализ условий формирования мощной конвекции (синоптический масштаб)

Над Европейской территорией СНГ 13.07.2016 г. погоду определял циклон с центром над Кольским полуостровом. В ложбине этого циклона, на его периферии, над территорией Беларуси, располагался волновой циклон (рис. 1). Отметим, что волновые возмущения на широтно-ориентированном полярном атмосферном фронте, протянувшемся от центральной до восточной Европы и Европейской территорией СНГ, возникали и накануне, 12.07.2016 г., и смещались вдоль линии фронта, разделявшего тропическую воздушную массу (к югу от линии фронта) и умеренную (к северу). Фронтальные волны были хорошо выражены в поле облачности и осадков. При этом в тропической воздушной массе, немного

жнее вершин волн, возникали и линии неустойчивости. Здесь также развивалась активная конвекция, формировались кучево-дождевые облака и мезомасштабные конвективные системы (МКС).

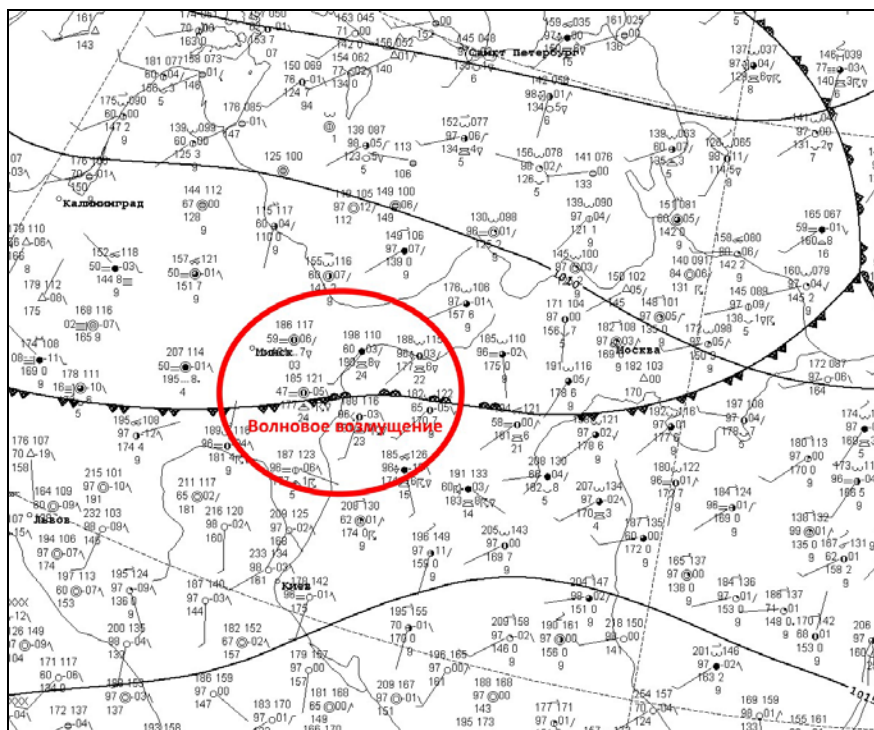


Рис. 1. Кольцевая карта погоды (фрагмент) за 00 ч ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 1. Surface analysis (map fragment), 13.07.2016, 00 UTC.

Вышеописанный волновой циклон возник на фоне достаточно большого температурного контраста воздушных масс, который отмечался на высотных и термобарических картах. Так, на поверхности 850 гПа контраст температур составил до 8 °С на 500 км. На поверхности 500 гПа регион формирования МКС находился в зоне влияния высотного гребня со скоростями ветра 20–25 м/с, а на 300 гПа – на южной (антициклональной) стороне струйного течения со скоростями ветра до 35–40 м/с (рис. 2).

Струйное течение было связано с хорошо выраженной высотной фронтальной зоной, разделявшей тропическую и умеренную воздушную массу.

В целом, в средней и верхней тропосфере в регионе зарождения МКС присутствовали умеренные и сильные потоки западной четверти, связанные с высокими градиентами температуры и геопотенциала во фронтальной зоне.

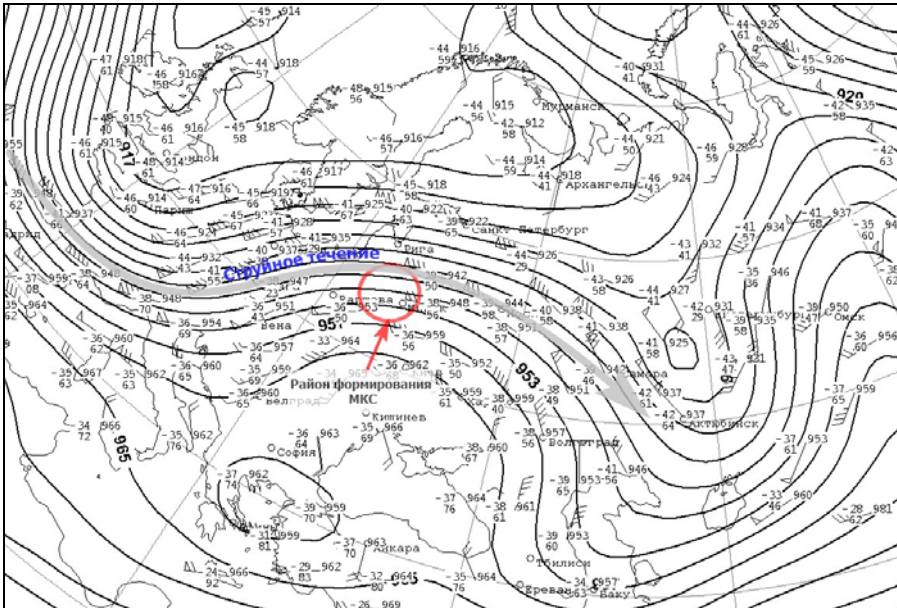


Рис. 2. Карта АТ-300 (фрагмент) за 00 ч ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 2. 300 hPa analysis (map fragment), 13.07.2016, 00 UTC.

Мезомасштабный анализ

Интенсивная конвекция и связанное с ней формирование отдельных конвективных штормов началось в регионе (над территорией Беларуси, к западу от Минска) уже в утренние часы. Этому способствовала, кроме неустойчивого состояния атмосферы, конвергенция (сходимость) потоков вблизи вершины волны, в зоне высокой влажности во всей толще тропосферы.

В течение дня 13.07.2016 г. можно выделить три основные стадии развития мощной конвекции: стадия формирования суперячейкового шторма (до 12–14 ч ВСВ), стадия формирования МКК путем объединения нескольких зон активной конвекции (к 15 ч ВСВ) и стадия максимального развития МКК (в 17–20 ч ВСВ). Эти стадии и временные отрезки будут основными (опорными) при рассмотрении атмосферных процессов в статье.

Стадия формирования суперячейкового шторма

С 6 ч ВСВ началось формирование нескольких грозовых штормов к западу от Минска. Один из штормов над западной частью Беларуси к 10 ч ВСВ достиг в своем развитии зрелой стадии: высота верхней границы по радарным данным достигла 15 км, радиоэхо имело крючкообразный вид,

т. н. *hook echo* (рис. 3). Такая сигнатура, как известно, характерна для суперячейковых штормов [4]. С прохождением данного шторма были связаны опасные явления над регионом: грозы, шквалы, местами вызвавшие разрушения и повреждения инфраструктуры, в т. ч. в аэропорту Минск-2.

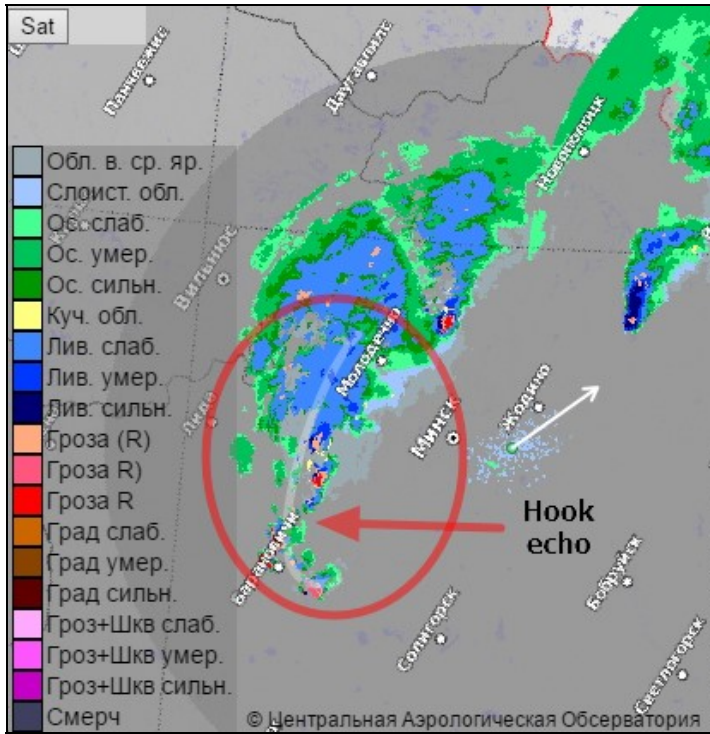


Рис. 3. Мощный конвективный шторм с *hook echo* сигнатурой по радарным данным, 10.30 ч ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 3. Severe convective storm with *hook-echo* signature by radar data, 13.07.2016, 10:30 UTC.

По спутниковым снимкам Meteosat-9 с RGB-отображением инфракрасного канала $10.8 \mu\text{m}$ в это время (11–13 ч ВСВ) уверенно идентифицируется *Cold-V* сигнатура (рис. 4), также характерная для мощных конвективных штормов и, в частности, для суперячеек. Суть описываемой сигнатуры состоит в определенном распределении температуры верхней границы штормов: более холодных (U/V – образных или кольцеобразных) областей на периферии шторма и более теплых областей – в его внутренней области [2, 3, 7], связанной, возможно, с выносом более теплых частиц на верхнюю границу конвективного шторма мощными восходящими потоками из нижележащей части шторма и экранированием части наковальни, имеющей минимальную радиационную температуру в зрелой стадии развития шторма.

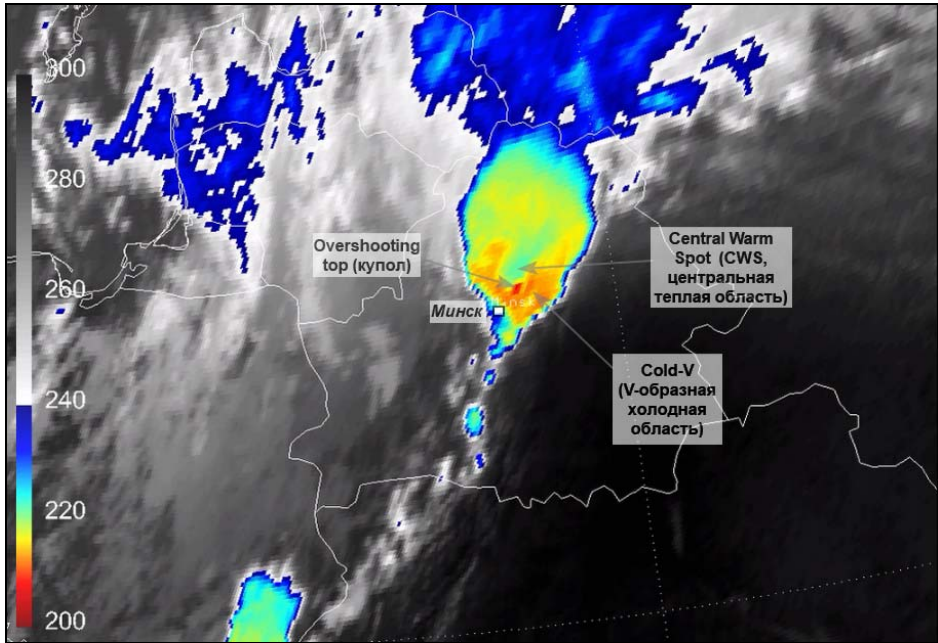


Рис. 4. Cold-V сигнатура мощного конвективного шторма над Беларусью, Meteosat-9 (MSG-2), RGB IR10.8-БТ (цветовая шкала радиояркостной температуры в канале 10.8 μm), 12.00 ч ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 4. Cold-V signature of the severe convective storm over Belarus, Meteosat-9 (MSG-2), RGB IR10.8-BT (color scale: infrared brightness temperature at 10.8 μm), 13.07.2016, 12:00 UTC.

Для идентификации зон наиболее мощных конвективных процессов в штормах, наличия вероятного пробоя тропопаузы с частым формированием в таких случаях куполообразных выступов вершин (*Overshooting tops* – OT) при анализе случая был применен диагностический алгоритм (далее – алгоритм MSG_Stratification), основанный на совместном использовании как геостационарных спутниковых данных, так и модельных данных, описанный в [5]. Алгоритм позволяет оценить не только интенсивность пробоя по выявлению вершин облаков, имеющих существенно более низкую температуру (IR), чем расчетная модельная (NWP) температура тропопаузы (отрицательные значения разности IR-NWP), но и позволяет выявлять зоны высокого содержания водяного пара (положительные значения разности WV-IR), вынесенного на верхнюю границу облачности интенсивными устойчивыми восходящими потоками, возникающими в мощных конвективных штормах в зрелую стадию их развития. На рис. 5 показано изображение, построенное на выходных данных алгоритма, где хорошо выделяется зона максимальной (по модулю) разницы IR-NWP, показанная желтыми и красными оттенками, на фоне более обширной области

положительной разности WV-IR (синими оттенками). Видно, что область максимальных (по модулю) значений (-6...-8 К) разности IR-NWP расположена к северо-востоку от Минска и неплохо совпадает с зоной опасных явлений по данным ДМРЛ Минск за этот же срок (рис. 6), диагностированной с юга-юго-востока от Минска, когда в аэропорту Минск-2 зафиксирован сильный разрушительный шквал. Основные ОЯ по ДМРЛ зафиксированы в основном по югу-юго-востоку (см. цветовую шкалу, рис. 6), а на востоке и северо-востоке от Минска – грозы разной интенсивности.

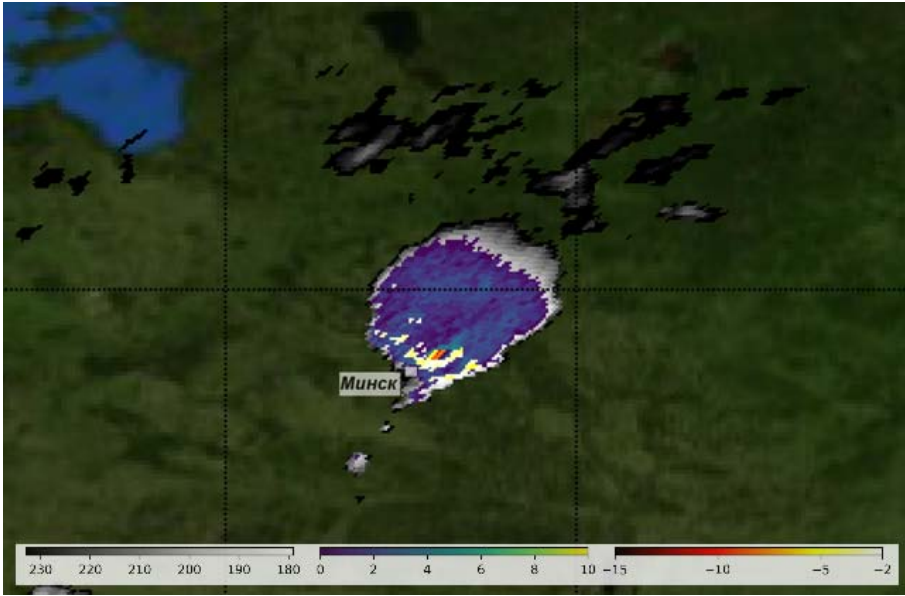


Рис. 5. Мощный конвективный шторм по данным спутникового алгоритма MSG_Stratification, 12.00 ч ВСВ 13.07.2016 г. Шкалы (слева направо, значения в К): IR 10.8, BTD WV-IR, IR-NWP.

Fig. 5. Severe convective storm by satellite algorithm MSG_Stratification data, 13.07.2016, 12:00 UTC. Scales (from left to right; values in K): IR 10.8, BTD WV-IR, IR-NWP.

По-видимому, некоторую разность спутниковых и радиолокационных данных за одно и то же время можно объяснить особенностью спутниковых данных: наличием эффекта параллакса – смещения к северу на расстояние порядка десятка км, видимых с геостационарной орбиты вершин облачности от их проекции (перпендикуляра) на земную поверхность. При этом значение параллакса варьируется в зависимости от расстояния от спутника до объекта (облачности) и от высоты облачности. Поэтому при доработке алгоритма спутникового распознавания целесообразно было бы ввести соответствующие поправки.

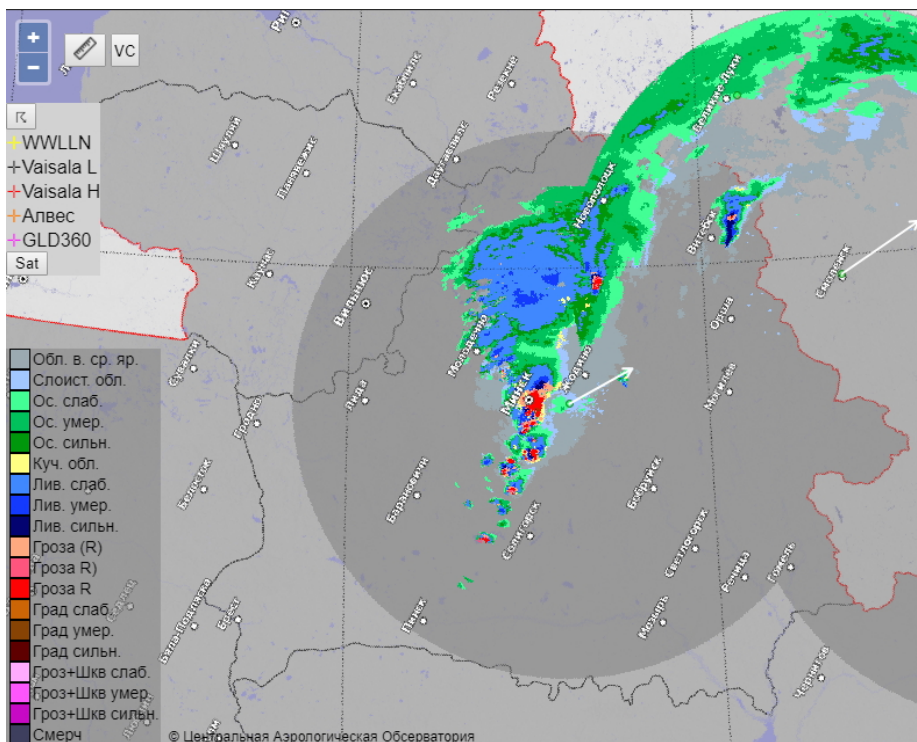


Рис. 6. Данные ДМРЛ Минск, 12.00 ч ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 6. Radar Minsk data, 13.07.2016, 12:00 UTC.

Представляет интерес сопоставить диагностические дистанционные данные и данные прогностической модели для выявления специфических условий формирования мощной организованной конвекции. Для оценки условий применялся расчет различных индексов неустойчивости, плавучести, параметров сдвига ветра, конвергенции потоков, температурной адвекции и температурного градиента, завихренности, влажности в приземном слое и в слое облакообразования и др. параметров, а также расчет комплексных индексов, использующих в расчете сочетание нескольких параметров.

Для расчетов параметров использовались данные глобальной прогностической модели GFS (срок счета 13.07.2016 г., 12.00 ч ВСВ) с шагом сетки $0,25^\circ$. В статье далее на рисунках представлена визуализация значений некоторых комплексных индексов. На рис. 7 показан результат расчета индексов SWEAT и MCS на 12 ч ВСВ. Известно, что индекс SWEAT применяется для прогноза условий развития опасных явлений, связанных с конвективной облачностью, индекс MCS – для прогноза генерации мезомасштабных конвективных систем и комплексов [1].

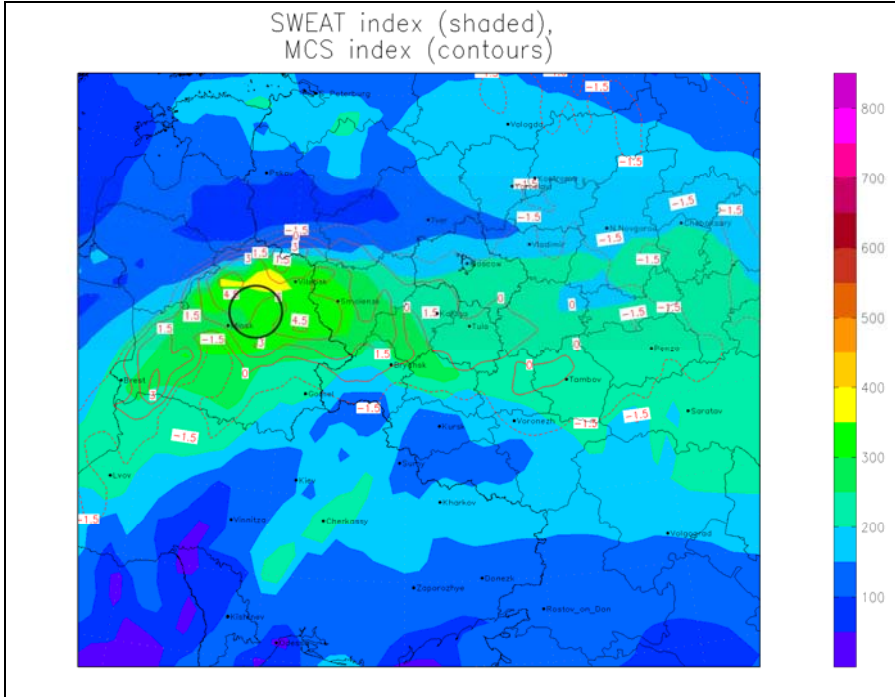


Рис. 7. Индекс SWEAT (цветовая шкала), MCS (изолинии), модель GFS, 12.00 ч ВСВ 13.07.2016 г. Положение мощного конвективного шторма отмечено черным кружком.

Fig. 7. SWEAT index (color scale), MCS index (isolines). The location of the severe storm is marked by a black circle. GFS model data, 13.07.2016, 12:00 UTC.

Оба индекса характеризуют благоприятные условия для генерации мощной организованной конвекции по сочетанию нескольких важнейших параметров: индекс SWEAT учитывает температурно-влажностные характеристики на поверхностях 850 и 500 гПа, а также сдвиг ветра (между указанными уровнями) и потенциал для развития вращательных движений в конвективных штормах, а индекс MCS – плавучесть в нижней половине тропосферы, сдвиг ветра в слое 0–3 км и температурную адвекцию на поверхности 700 гПа, формулы индексов приведены в [1]. Значения индексов в зоне сформировавшегося мощного шторма (показана кружком на рис. 7) составили: SWEAT = 300–350, MCS = 3–4,5, что является высокими показателями вероятности развития мощной организованной конвекции. Для оценки вероятности развития суперячеек был рассчитан специальный индекс SCP (Supercell Composite Parameter), формула которого представлена в [1]. Индекс учитывает сочетание неустойчивости (CAPE), сдвига ветра в слое 0–6 км (DLS) и динамический параметр относительной завихренности (SRH). Значения индекса SCP в зоне сформировавшегося

мощного конвективного шторма составили до 8–10 (рис. 8), что является высоким показателем вероятности развития мезоциклонов и суперячейковых облаков Сb.

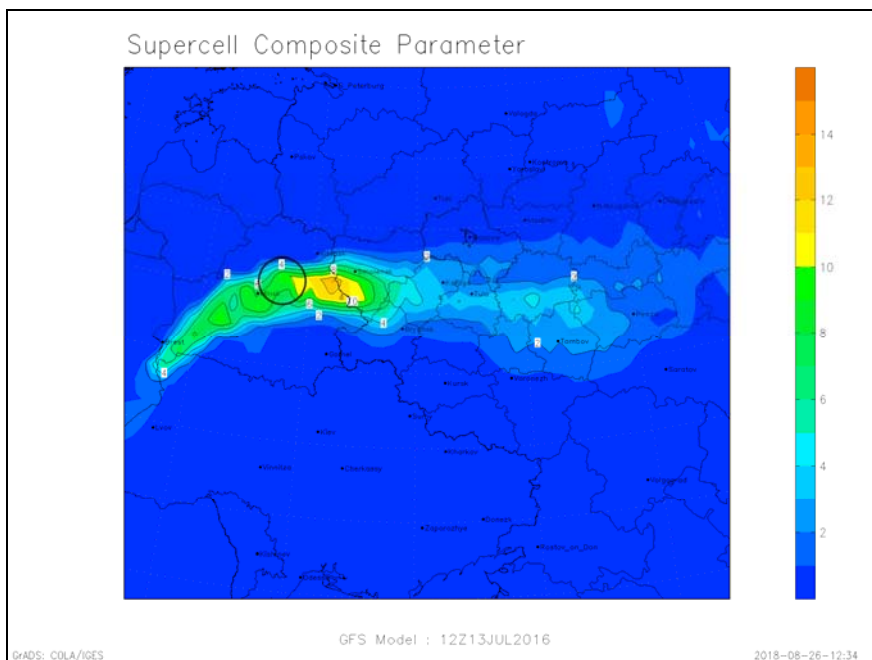


Рис. 8. Индекс SCP, модель GFS, 12 ч UTC 13.07.2016 г. Положение мощного конвективного шторма отмечено черным кружком.

Fig. 8. SCP index. The location of the severe storm is marked by a black circle. GFS model data, 13.07.2016, 12:00 UTC.

Стадии формирования и максимального развития мезомасштабного конвективного комплекса (МКК)

К 15 ч ВСВ над территорией Смоленской области России произошло формирование мезомасштабного конвективного комплекса (концептуальная модель описана в [6]) путем объединения расположенных рядом нескольких зон активной конвекции, включая и вышеописанный шторм.

Форма МКК по спутниковым и радарным данным была устойчивой на протяжении долгого времени от зарождения до диссипации. Высота верхней границы облачности в пределах МКК в зрелую фазу развития (к 17–19 ч ВСВ) по радарным данным превышала 15 км (рис. 8), наблюдались высокие значения отражаемости (> 45 dBz) до больших высот (13–14 км), что говорило о возможном наличии мощных вертикальных движений. По радарным данным также прослеживалось наличие конвективного и слоистообразного регионов (рис. 9). В первом регионе,

расположенном всегда на передней фронтальной (по направлению движения) стороне МКК, как отмечается во многих работах, например в [4], развивалась интенсивная грозовая деятельность: наблюдалась очень высокая молниевая активность (рис. 10). К 18 ч МКК подошел к западу Московской области, где зафиксирован смерч и сильные шквалы, которые привели к человеческим жертвам.



Рис. 9 Вертикальное сечение (по линии A-B) радиолокационной отражаемости через центральную часть МКК, находящегося в зрелой стадии развития, 17.40 ч ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 9. Cross section (along the line A-B) of the radar reflectivity across the central part of the MCC in mature stage. 13.07.2016, 17:40 UTC.

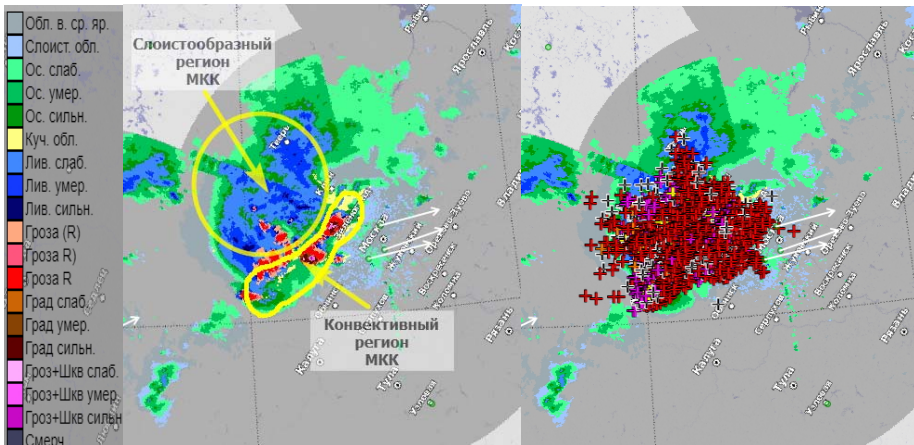


Рис. 10. Слоистообразный и конвективный регионы МКК по радарным данным (слева) и молниевые разряды по данным сетей грозопеленгации (справа), 19.00 ч ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 10. Stratiform and convective regions of the MCC by radar data (left) and with lightning data (right). 13.07.2016, 19:00 UTC.

Приведем диагностические данные и данные моделирования на срок 18 ч ВСВ в зрелую стадию жизненного цикла МКК.

По приведенным диагностическим данным (рис. 11, 12) видно, что внутри МКК (ближе к его восточной периферии, в конвективном регионе) наблюдались, по данным ДМРЛ, зоны шквалов и града, которые примерно соответствовали минимумам значений (-5...-7 К) разницы IR-NWP по данным алгоритма MSG_Stratification, что косвенно говорило о возможном наличии здесь мощных вертикальных движений, которые, в свою очередь, могли являться «генераторами» опасных явлений.

На рис. 13, 14 приведены карты с результатами расчета индексов SWEAT, MCS и SCP на срок 18 ч ВСВ по модели GFS (расчет модели от 12 ч ВСВ) с наложением положения МКК. Видно, что в зрелую фазу его развития наблюдались высокие значения индексов (SWEAT = 350–400, MCS = 3–4,5, SCP = 2–6), характеризующих благоприятные условия для формирования таких организованных конвективных структур, как МКК.

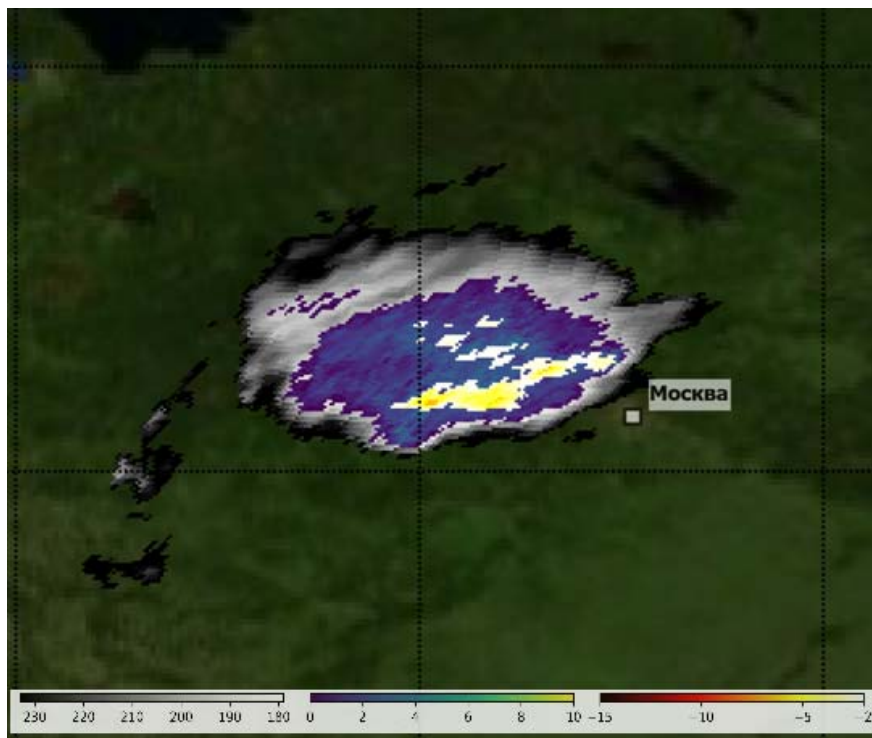


Рис. 11. Мезомасштабный конвективный комплекс к западу от Москвы по данным спутникового алгоритма MSG_Stratification, 18.00 UTC 13.07.2016 г. Шкалы (слева направо, значения в К): IR 10.8, BTД WV-IR, IR-NWP.

Fig. 11. Mesoscale convective complex to the west from Moscow by satellite algorithm MSG_Stratification data, 13.07.2016, 18:00 UTC. Scales (from left to right; values in K): IR 10.8, BTД WV-IR, IR-NWP.

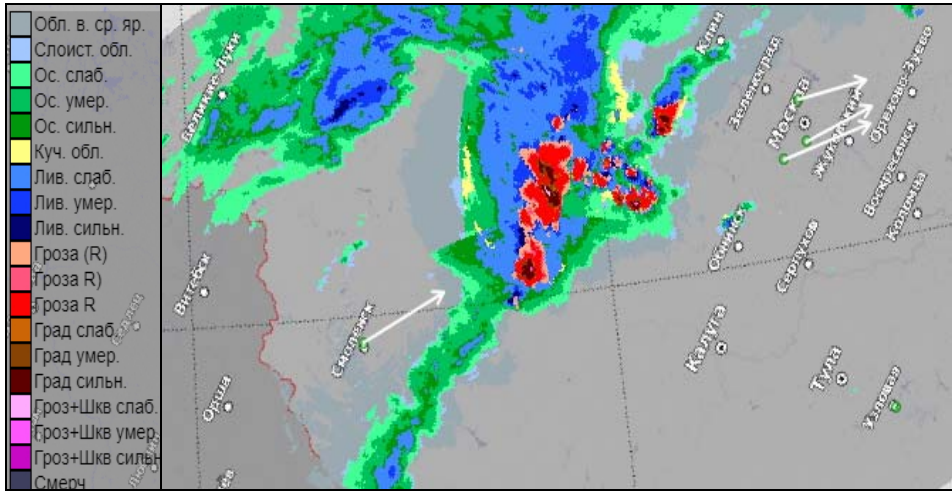


Рис. 12. Данные сети ДМРЛ, 18.00 UTC 13.07.2016 г.
Fig. 12. Radar network data, 13.07.2016, 18:00 UTC.

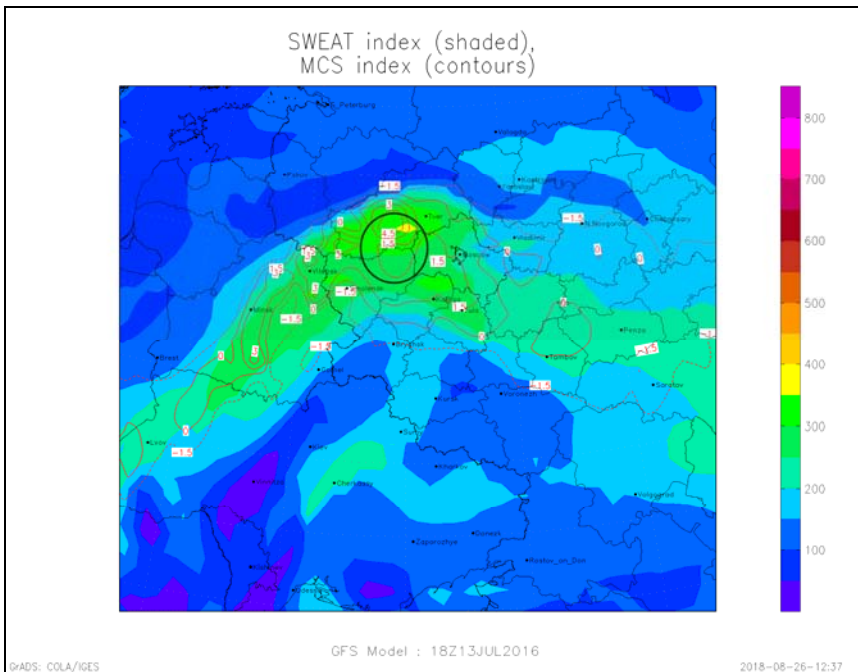


Рис. 13. Индекс SWEAT (цветовая шкала), MCS index (изолинии), модель GFS, 18.00 ч ВСВ 13.07.2016 г. Срок счета модели в 12.00 ч ВСВ 13.07.2016 г. Положение МКК отмечено черным кружком.

Fig. 13. SWEAT index (color scale), MCS index (isolines), GFS model data, 13.07.2016, 18:00 UTC (model run in 13.07.2016, 12:00 UTC). The location of the MCC is marked by a black circle.

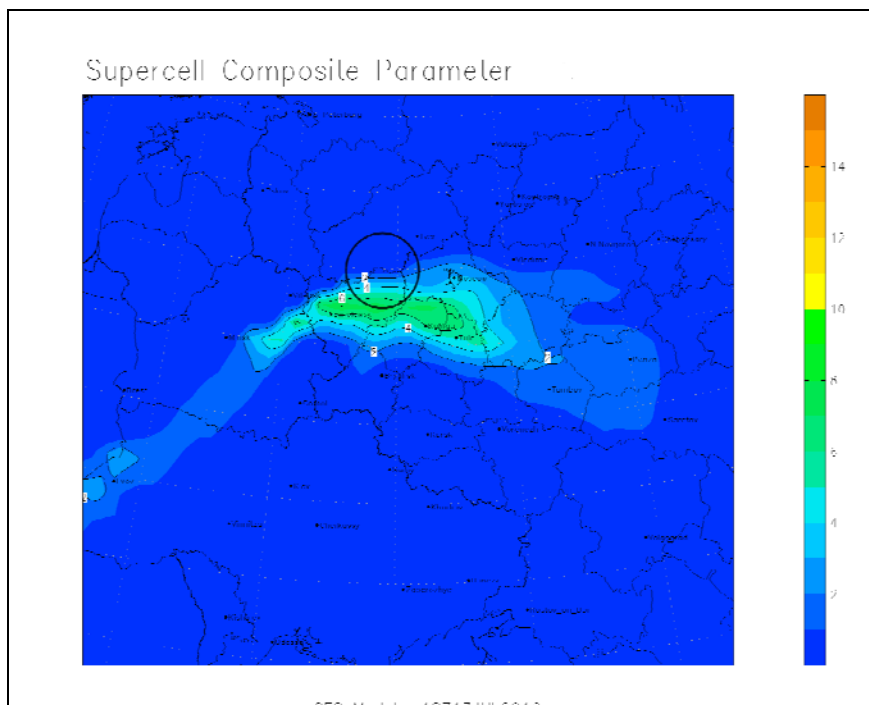


Рис. 14. Индекс SCP, модель GFS, 18:00 UTC 13.07.2016 г. Срок счета модели в 12.00 ч ВСВ 13.07.2016 г. Положение МКК отмечено черным кружком.

Fig. 14. SCP index, GFS model data, 13.07.2016, 18:00 UTC (model run in 13.07.2016, 12:00 UTC). The location of the MCC is marked by a black circle.

Примерно с 22–23 ч 13.07.2016 г. активность МКК стала снижаться и с 00 до 03 ч ВСВ 14.07.2016 г. наблюдалась его постепенная диссипация над Владимирской и Нижегородской областями.

Выводы

В данной работе была предпринята попытка применения комплексного подхода к исследованию образования мощных организованных конвективных структур (штормов) на примере использования имеющихся в доступе средств диагноза и прогноза. Использовалась методология пространственно-временного анализа события: процесс анализировался на определенных опорных временных отрезках, отражающих различные стадии процесса. Основные выводы данного исследования:

1. Формированию первого по времени, мощного (предположительно суперячейкового) конвективного шторма способствовало сочетание над регионом критических значений таких предикторов, как неустойчивость

воздушной массы, сдвиг ветра по направлению и скорости в нижней половине тропосферы (способствующая развитию здесь завихренности потоков), наличие струйного течения в верхней тропосфере, конвергенция потоков (в нижних слоях) в развивающемся волновом циклоне и дивергенция в верхних, высокая влажность воздушной массы в нижних и средних слоях.

2. По спутниковым и радарным данным выявлялись определенные сигнатуры (такие как *Cold-V* и *hook echo*), позволяющие с достаточной степенью надежности судить о потенциальной мощности шторма и его типе (суперячейка).

3. Траектория движения шторма и формирование соседних штормов вдоль вытянутой зоны неустойчивости и других предикторов, характеризующих развитие мощной организованной конвекции, могло служить причиной образования здесь мезомасштабного конвективного комплекса (путем слияния нескольких рядом расположенных штормов в единую систему – МКК).

4. В зоне формирования МКК, а также и вдоль траектории его перемещения, наблюдались высокие значения комплексных индексов прогноза организованных структур: мезомасштабных конвективных систем (MCS), суперячеек (SCP), а также индекса прогноза опасных конвективных явлений (SWEAT), рассчитанных по данным глобальной модели GFS, что косвенно говорило о сочетании благоприятных факторов (таких как высокая неустойчивость и плавучесть, наличие сдвига ветра, завихренности и конвергенции потоков, высокого влагосодержания и др. параметров) для развития мощных организованных структур.

5. Сравнение данных, полученных в результате реализации специального алгоритма спутникового диагноза (MSG_Stratification), и радарных выявило непротиворечивое совпадение зон активной конвекции как на стадии суперячейки, так и в зрелую фазу развития МКК.

Исследование случая мощных конвективных штормов и образования мезомасштабного конвективного комплекса представляет практический интерес. Он заключается в построении алгоритма использования в оперативной прогностической практике разнообразных диагностических данных и методов их обработки, а также выбора предикторов для выявления возможности развития таких штормов с использованием данных моделирования. Это необходимо для повышения качества краткосрочного и текущего прогнозирования (уточнение локализации) мощных конвективных штормов и связанных с ними опасных явлений. Конечно, об успешности применения разрабатываемого алгоритма на практике можно будет судить только после оперативных независимых испытаний, которые позволят оценить качество алгоритма, в т. ч. таких важных показателей диагноза и прогноза, как предупреденность и наличие ложных тревог.

Представляет интерес разработка комплексного прогностического индекса мощных организованных конвективных структур на основе отбора наиболее значимых параметров (предикторов) для их формирования, в т. ч. по характерным значениям известных индексов. Для этой цели авторами проводится исследование ряда случаев мощных конвективных штормов с генерацией опасных явлений по Европейской территории СНГ с формированием базы данных, включающей указанные параметры (индексы). Рассматривается возможность расчета параметров по мезомасштабной модели WRF.

Существенным дополнением к используемым для анализа данным могла бы быть информация о динамике ветровых потоков по доплеровским данным сети метеорологических радиолокаторов, которой авторы, к сожалению, не располагали.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-45-520003 p_a).

Список литературы

1. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101-119.

2. Bedka K. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // *Atm. Res.* 2011. Vol. 99, no. 2. P. 175-189.

3. Bedka K., Brunner J., Dworak R., Feltz W. Objective satellite-based overshooting top and enhanced-V/cold ring detection: Validation and relationship with severe // 6th European Conference on Severe Storms (ECSS 2011), 3-7 October 2011, Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain.

4. Bluestein H.B. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Berlin: Springer Praxis Books, 2013. 456 p.

5. C. Pinta da Silva Neto et al. A method for convective storm detection using satellite data // *Atmosfera.* 2016. Vol. 29, is. 4. P. 343-358.

6. Maddox R. A. Mesoscale convective complexes // *B. Am. Meteorol. Soc.* 1980. Vol. 61. P. 1374-1387, doi:10.1175/1520-0477(1980)061<1374:MCC>2.0.CO;2

7. Setvak M., Lindsey D.T., Novak P., Wang P.K., Radova M., Kerkmann J., Grasso L., Su, S.-H. Rabin, R.M. Stastka, J., Charvat Z. Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds // *Atmospheric Research.* 2010. Vol. 97. P. 80-96.

References

1. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. Prognoz opasnykh konvektivnykh yavleniy v Permskom krae s ispol'zovaniem global'nykh prognosticheskikh modeley [The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 363, pp. 101-119. [in Russ.].

2. *Bedka K.* Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe. *Atm. Res.*, 2011, vol. 99, no. 2, pp. 175-189.

3. *Bedka K., Brunner J., Dworak R., Feltz W.* Objective satellite-based overshooting top and enhanced-V/cold ring detection: Validation and relationship with severe. *6th European Conference on Severe Storms (ECSS 2011)*, 3-7 October 2011, Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain.

4. *Bluestein H.B.* Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Berlin: *Springer Praxis Books*, 2013, 456 p.

5. *Da Silva Neto C.P., Alves Barbosa H., Assis Beneti C.A.* A method for convective storm detection using satellite data. *Atmósfera*, 2016, vol. 29, no. 4, pp. 343-358.

6. *Maddox R. A.* Mesoscale convective complexes. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 1980, vol. 61, pp. 1374-1387, doi:10.1175/1520-0477(1980)061<1374:MCC>2.0.CO;2.

7. *Setvak M., Lindsey D.T., Novak P., Wang P.K., Radova M., Kerkmann J., Grasso L., Su, S.-H. Rabin, R.M. Stastka, J., Charvat Z.* Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds. *Atmospheric Research*, 2010, vol. 97, no. 1-2, pp. 80-96.

Поступила в редакцию 28.06.2018 г.

Received by the editor 28.06.2018.