

УДК 551.515.6

Анализ быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции по картам спутникового диагноза

М.В. Бухаров¹, В.М. Бухаров²

¹Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии
«Планета», Москва, Россия;

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
rprogn@mail.ru

Рассмотрено применение карт спутникового диагноза для анализа свойств быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции. По этим картам установлено, что диаметр внезапно возникшей почти круглой облачности вблизи Неаполя 5 сентября 2015 г. за 3 часа вырос до 300 км и продолжал быстро расти, а на его периферии распознавалось упорядоченное в виде кольца скопление суперячейковых грозоградовых облаков. Это позволило назвать такую систему быстро растущим мезомасштабным конвективным комплексом суперячейковых облаков (МККССО). Проведен анализ фаз развития и получены оценки средней скорости вертикальных восходящих движений в МККССО, скоростей роста его диаметра и переноса.

Ключевые слова: карты спутникового диагноза, суперячейковые облака, мезомасштабный конвективный комплекс, грозы, град в облаках, шквалы

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-23-38>

Analysis of the rapidly growing mesoscale system of deep convection on satellite maps of the diagnosis

M.V. Bukharov¹, V.M. Bukharov²

¹State Research Center "Planeta, Moscow, Russia;

²Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
rprogn@mail.ru

The application of satellite maps of the diagnosis for the analysis of the properties of the rapidly growing mesoscale system of deep convection is considered. Satellite maps of diagnosis found that the diameter of the round almost suddenly arisen cloud rose to 300 km for 3 hours and has continued to grow rapidly, and at its periphery is recognized as an ordered ringcluster supercells thunderstorm clouds. This allowed us to call such a system rapidly growing mesoscale supercells complex convective clouds (MCCSC). Analysis of the development phases and high vertical speed estimates upward movements in MCCSC, speeds growth its diameter and transfer.

Keywords: satellite maps of diagnosis, supercells clouds mesoscale convective complex, thunderstorms, hail, clouds, gusts

Введение

Взрывной характер возникновения и быстрое развитие скоплений грозоопасных и градоопасных кучево-дождевых облаков, сопровождающихся сильными ливнями и шквалами, представляет большую опасность для хозяйственной деятельности и нередко – жизни людей. Как правило, такие явления связаны с мезомасштабными системами глубокой конвекции. Для уточнения времени и места возникновения таких мезомасштабных систем, их эволюции и скорости перемещения традиционно используется радиолокационная и спутниковая информация, а также данные метеорологической сети наблюдений.

В последнее десятилетие для метеорологического обслуживания авиации специалисты Московского авиационного узла стали использовать карты автоматизированного спутникового диагноза, создаваемые в ФГБУ «НИЦ «Планета» [6] на основе алгоритмов диагноза метеорологических элементов, параметров конвекции и связанных с ней опасных конвективных явлений погоды и их интенсивности, разработанных совместно с сотрудниками ФГБУ «Гидрометцентр России» [2, 3]. Карты спутникового диагноза создаются в реальном режиме времени с периодичностью спутниковой съемки 15 и 30 минут. Используются измерения с геостационарных спутников Meteosat. Кроме того, в разработанных алгоритмах диагноза спутниковая информация комплексирована с прогностическими модельными данными, специально сопряженными по пространственному разрешению со спутниковой информацией [10]. Используются прогностические вертикальные профили температуры, влажности и скорости ветра, а также поля приземного давления в Гидродинамической модели регионального прогноза (ГМРП) с ежечасной дискретностью со сроков расчета в 00 и 12 ч ВСВ с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Интерполяция модельных данных на момент спутниковой съемки (с дискретностью 15 и 30 минут) осуществляется по ближайшим ежечасным прогностическим данным.

Описание и примеры карт спутникового диагноза, выпускаемых в настоящее время для территории России, а также информация о точности диагноза разных параметров доступны на сайте виртуальной лаборатории дистанционного обучения спутниковой гидрометеорологии ИПК Росгидромета [http://meteovlab.meteorf.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=900&Itemid=206&lang=ru] и в работах [7, 8].

Специализированные карты автоматизированного спутникового диагноза опасных для авиации метеоусловий на территории России, передаваемые в реальном времени на автоматизированное рабочее место (АРМ) руководителей полетов и АРМ метеорологов, используются уже более 10 лет. За это время перечень диагностированных характеристик в АРМ существенно расширился. Рассматриваемые в данной статье диагностические карты являются составной частью комплекта создаваемых карт.

Карты спутникового диагноза позволяют оперативно оценить вероятность гроз, града в облаках, интенсивность осадков, максимальную скорость ветра при порывах у земли и ряд других параметров [2–5]. Пространственное разрешение таких карт близко к 10 км, а в географической привязке облачности исключены погрешности (в виде параллакса), имеющиеся в исходных спутниковых снимках [8].

Практика применения карт показала, что они полезны не только для оперативного предупреждения о районах возможного возникновения опасных атмосферных явлений, но и для получения дополнительных сведений о свойствах и эволюции С_б в мезомасштабных системах глубокой конвекции. Представления о свойствах одноячейковых, многоячейковых и наиболее опасных суперячейковых кучево-дождевых облаков, а также их скоплений разного пространственного масштаба формировались на основе спутниковых и радиолокационных измерений, представленных, например, в [1, 9, 11, 13].

Спецификой измерений метеорологических радиолокаторов является ограниченность по дальности обнаружения облаков разной мощности и существенное затухание излучения в ливневых осадках [13]. Спутниковые данные в синоптической практике до недавнего времени использовались только в виде снимков облачности.

До сих пор прогноз взрывных быстро развивающихся конвективных процессов для целей превентивного принятия мер защиты остается не до конца решенной задачей. Поэтому не потеряли актуальности исследования закономерности развития и пространственного упорядочивания С_б в системах глубокой конвекции, пространственный масштаб циркуляции в которых быстро изменяется.

Согласно классификации Р.А. Мэддокса [9], облачные системы глубокой конвекции близки к системам симметричного типа; их принято разделять на два класса: скопления кучево-дождевых облаков β -мезомасштаба (20–200 км) и мезомасштабные конвективные комплексы (МКК) α -мезомасштаба (200–2000 км). На основе анализа карт спутникового диагноза выделен еще и подкласс опасных МКК с суперячейковыми облаками (МККСО). Их особенностью является внезапное возникновение, быстрый рост диаметра облачности (от ~60 до 400 км и более за несколько часов), большая скорость переноса и кольцеобразное расположение суперячейковых облаков по периферии облачности МККСО, имеющей по виду на снимках облачности с ИСЗ почти округлую или овальную форму с резко очерченными границами.

В данном исследовании проведен анализ отдельного случая МККСО с целью получения новых знаний об их свойствах с использованием спутниковых данных о радиационной температуре, а также разработанных карт диагностированных параметров конвекции, метеорологических явлений и их интенсивности.

1. Свойства грозоградовых облаков

Кратко остановимся на известных представлениях о свойствах опасных грозоградовых облаков. Информация об облачности – ее форме, активности, эволюции – является надежным индикатором состояния атмосферы. Согласно [2, 3, 5], зоны активной конвекции (ЗАК), с которыми связаны конвективные явления погоды в грациях неблагоприятных (НЯ) и опасных (ОЯ) явлений погоды, имеют на спутниковых снимках облачности площадь, ограниченную изотермой радиационной температуры $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, размеры которой в диаметре не превышают 400 км. Внутри такой зоны обязательно отмечаются очаги с температурой ниже $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем очагам с более низкой температурой соответствуют явления большей интенсивности; горизонтальный градиент радиационной температуры по контуру очага в этих случаях составляет более $20\text{ }^{\circ}\text{C}/150\text{ км}$. В случае анализа снимков облачности с ИСЗ такие скопления кучево-дождевых облаков представляют собой округлые яркие области, изолированные или выделяющиеся на фоне облачности атмосферных фронтов. Такие ЗАК могут состоять из одноячейковых, многоячейковых и суперячейковых грозоградовых облаков.

Одноячейковые облака возникают в малоградиентных барических полях, состоят из нескольких малоподвижных или перемещающихся, подчиняясь локальным циркуляциям, конвективных ячеек с поперечными размерами 5–20 км, временем жизни 30–50 мин, максимальной высотой верхней границы облаков (Нвго) до 8 км и с малыми сдвигами ветра.

Многоячейковые облака состоят из 2–4 конвективных ячеек размером 20–40 км и Нвго $\sim 10\text{--}14\text{ км}$. Максимальная скорость восходящих потоков в таких ячейках может достигать 20–30 м/с, а их время жизни составляет около 10–20 мин. Образуются такие облака при умеренных и сильных ветрах в тропосфере с умеренным вертикальным сдвигом ветра.

Суперячейковые облака возникают из нескольких конвективных ячеек, имеют протяженность 20–40 км, Нвго $\sim 12\text{--}15\text{ км}$ и время жизни от одного до нескольких часов. Такие облака имеют длительно существующую обширную зону (5–15 км) мощного ламинарного восходящего потока (максимальная скорость до 20–40 м/с), который проникает до высоты 8–10 км и смещается со скоростью 25–40 км/ч. Диаметр выпадающего града может достигать 5–10 см.

Согласно [13], при возникновении суперячейковых облаков наблюдаются средние и сильные по величине сдвиги ветра. Большие сдвиги ветра являются причиной, упорядочивающей внутриоблачную циркуляцию благодаря разделению восходящего и нисходящего потоков. В нижнем слое ветер имеет правый поворот с высотой.

Проанализируем свойства облаков по картам спутникового диагноза, рассмотрим для случая развития МККСО 5 сентября 2015 г., когда на Неаполь и близлежащие города обрушилась и бушевала в течение

получаса сильная гроза с аномально крупным градом (до 5–10 см в диаметре), сильным ливнем и ветром. От разбушевавшейся стихии массово пострадали автомобили, здания и сооружения, не успевшие спрятаться жители и животные, повалены деревья. Фермеры сообщали об огромных убытках: град практически полностью уничтожил урожай. Это был самый крупный град в этом районе за последние 20 лет. В некоторых местах градина не могла уместиться в ладони взрослого человека.

К процессам такой разрушительной силы привело скопление конвективной облачности на активном атмосферном фронте над акваторией Средиземного моря, которое образовалось утром 5 сентября и двинулось на Италию, накрыв Неаполь и близлежащие территории. Для анализа воспользуемся картами спутникового диагноза, фрагменты которых представлены на рис. 1. Съемка с Meteosat-10 проведена 5 сентября 2015 г. в 8.00 ч ВСВ.

На фрагментах карт на рис. 1а, б, г нанесены изобары (белые линии) через 2 гПа, на рис. 1а, б, в указано направление переноса атмосферы на уровне 500 гПа (черные стрелки). На рис. 1г отмечено направление ветра (синие стрелки), а также проведены изотермы температуры воздуха у земли через 5 °С (коричневые линии). Границы облачности, высота верхней границы которой (Нвго) превышает 6 км, на рис. 1в для наглядности обведены белыми линиями, черными изолиниями через 2 дкм нанесены изогипсы поверхности 500 гПа.

Отмеченная на рис. 1 ситуация рассчитана на момент спутниковой съемки по выходным модельным данным [10], т. е. на рис. 1 приведены результаты комплексирования прогнозируемых модельных и диагностируемых спутниковых данных.

По фрагменту карты радиационной температуры (рис. 1а) видно, что в момент съемки над центральной Италией располагался МКК, который имел почти округлую форму диаметром ~160 км (масштаб мезо-β [9]). Он располагался на периферии слабо выраженной ложбины (изобара 1012 гПа) в малоградиентном барическом поле, а радиационная температура (Т_р) на верхней границе облачности оказалась меньше -60 °С.

На карте спутникового диагноза метеорологических явлений (рис. 1б) заметно упорядоченное скопление грозоградовых облаков по периферии МКК в виде кольца, Нвго этих облаков достигала 14–15 км (рис. 1в), а у земли имели место локальные усиления ветра до 20–27 м/с (рис. 1г).

По данным радиолокационных наблюдений было установлено [11, 13], что при достижении Нвго ~14–15 км грозоградовые облака являются суперячейковыми, для которых типичны грозы, град, ливни и шквалы. Поэтому рассмотренную систему глубокой конвекции (рис. 1) β-мезомасштаба, в которой доминируют кольцеобразно упорядоченные скопления суперячейковых облаков, в момент спутниковой съемки (8.00 ч ВСВ) можно отнести к подклассу МККСО [9].

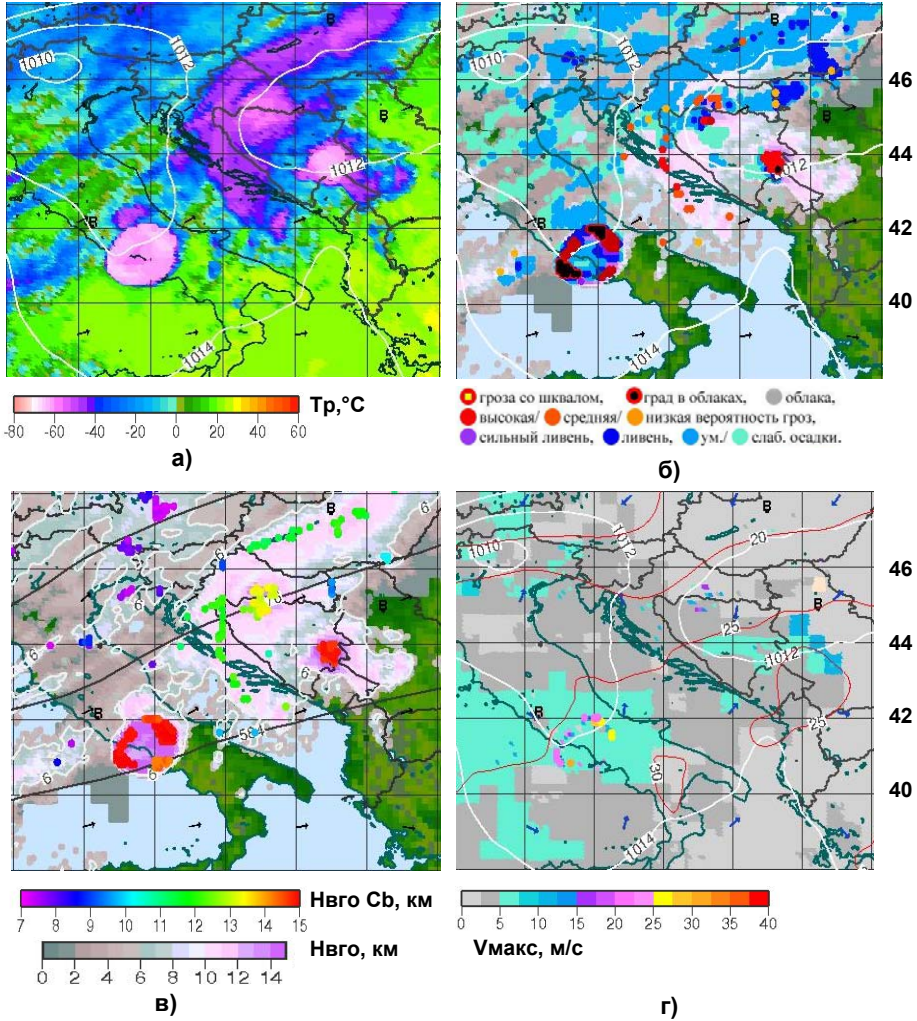


Рис. 1. Фрагменты карт радиационной температуры (а); метеорологических явлений (б); высоты верхней границы Сb облаков (в); максимальной скорости ветра (г) в районе МККСО над центральной Италией. Съемка ИСЗ Meteosat-10, 05.09.2015, 08.00 ч ВСУ.
Fig. 1. Fragments of radiation temperature maps (a), meteorological phenomena (б), cloud upper boundary height Cb (в) and maximum wind speed (г) in the ICCS area over central Italy. The survey was conducted on 05.09.2015 at 08.00 UTC jnMeteosat-10.

Для получения представлений о метеорологических условиях в центральной части исследуемого МККСО, проанализируем графики модельных вертикальных профилей температуры воздуха, ее вертикального градиента, скорости и направления ветра, рассчитанных по данным ГМРП на момент спутниковой съемки с заблаговременностью 8 ч (рис. 2).

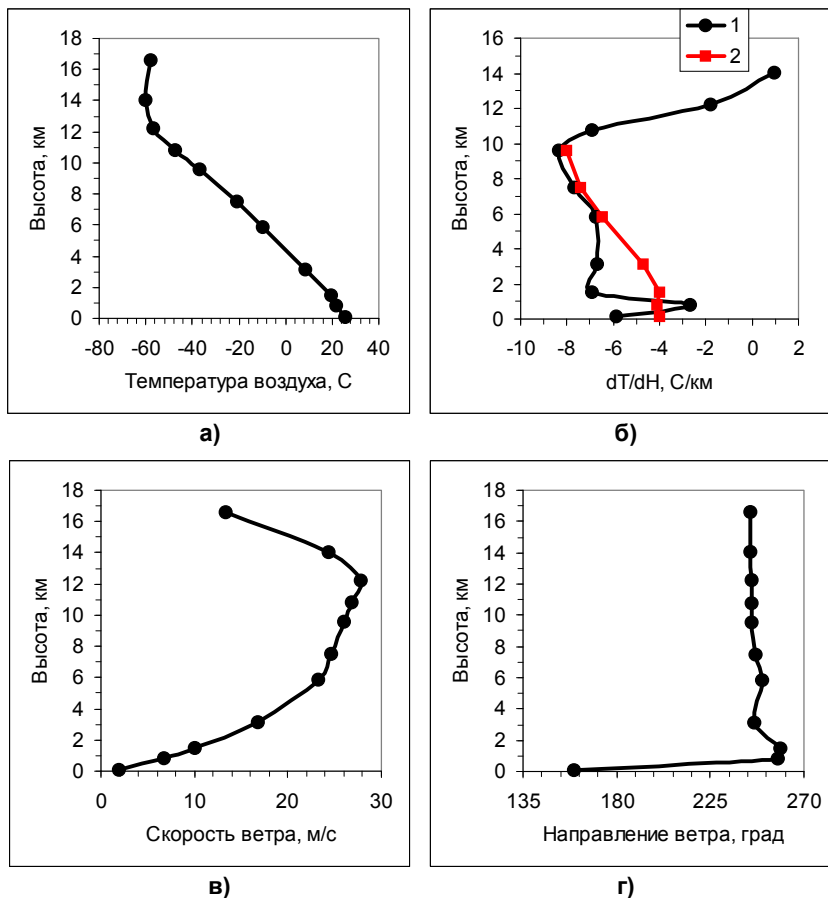


Рис. 2. Графики изменения с высотой температуры воздуха (а), вертикального градиента температуры (б), скорости (в) и направления (г) ветра в центральной части МККСО по данным ГМРП за 05 сентября 2015 г. в 08.00 UTC. 1 – вертикальный градиент температуры; 2 – влажноадиабатический градиент.

Fig. 2. Vertical temperature profile (а), vertical temperature gradient (б), wind velocity (в) and wind direction (г) in the central part of ICSE according to the data of GMRP for September 05, 2015 at 08.00 UTC. Prognostic (1) and humid adiabatic (2) vertical temperature gradients.

Согласно графику вертикального профиля температуры воздуха (рис. 2а), высота тропопаузы в районе МККСО составила ~12 км. Сравнение влажноадиабатического градиента (кривая 2 на рис. 2б) с вертикальным градиентом температуры (критерии неустойчивости взяты из [11]), показывает, что влажнеустойчивыми (разница между значениями на кривых 1–3 °С) оказались слои тропосферы, расположенные в диапазоне высот 0–1 км и 1,5–6 км. При такой неустойчивости средняя вертикальная скорость восходящих движений в МККСО может быть близка к 5 м/с [12].

До высоты 6 км в атмосфере прогнозировался сильный сдвиг ветра, а выше 6 км меньшее изменение скорости ветра с высотой (рис. 2в) и слабое изменение его направления (рис. 2г). Максимальная скорость ветра (около 27 м/с) по модельным данным ожидалась на высоте около 12 км (рис. 2в). В диапазоне высот от 2 до 4 км, где неустойчивость атмосферы оказалась наибольшей, скорость прогнозируемого ветра монотонно возрастала от 12 до 19 м/с, а направление менялось слабо. В самом нижнем слое тропосферы до высоты примерно 2 км (рис. 2г) прогнозировался правый (по часовой стрелке) поворот ветра с высотой (примерно на 100°).

Вышеперечисленные спрогнозированные метеорологические условия являются типичными для существования суперячейковых облаков [13]. Поэтому наличие суперячейковых облаков, Нвго которых близка к 15 км, может являться основным критерием мезомасштабных систем глубокой конвекции осесимметричного типа, рассматриваемых в качестве МККСО.

Далее оценим минимальный горизонтальный размер скоплений кучево-дождевых облаков, при котором растущую систему глубокой конвекции, наблюдающуюся на картах спутникового диагноза, можно отнести к подклассу МККСО, также рассмотрим динамику развития облачности и изменения ее свойств.

2. Динамика свойств быстро растущего МККСО

2.1. Фазы развития МККСО

Для анализа воспользуемся выборкой фрагментов из четырех карт спутникового диагноза (радиационной температуры, диагностированных метеорологических явлений, высоты верхней границы кучево-дождевых облаков и максимальной скорости ветра) в районе МККСО над центральной Италией 5.09.2015 г., представленных на рис. 3. Выборка сделана с детализацией по времени 15 мин в период с 6.45 до 9.00 ч ВСВ.

Анализ фрагментов карт радиационной температуры (Тр) (рис. 3а), метеорологических явлений (рис. 3б), высоты верхней границы (Нвго) Сб (рис. 3в) и максимальной скорости ветра у земли (V_{\max}) (рис. 3г), а также всей последовательности карт спутникового диагноза, построенных в рассмотренный период времени, показал наличие четырех фаз в развитии МККСО.

1. *Возникновение первого суперячейкового облака* наблюдалось в течении 15 мин после того, как на северо-восточной периферии слабой депрессии (1012 гПа) в 6.15 ч ВСВ над морем появилось первое многоячейковое облако (Тр $\sim -50^\circ\text{C}$, Нвго ~ 10 км, диагностировалась низкая вероятность грозы, $V_{\max} \sim 18$ м/с). К 6.30 ВСВ это многоячейковое облако превратилось в суперячейковое (Тр $\sim -65^\circ\text{C}$, Нвго $\sim 14,5$ км, диагностировалась высокая вероятность гроз с градом в облаке, $V_{\max} \sim 4$ м/с), а впереди (по направлению переноса) появилось еще два многоячейковых облака, распознаваемых по Нвго ~ 10 и $12,5$ км.

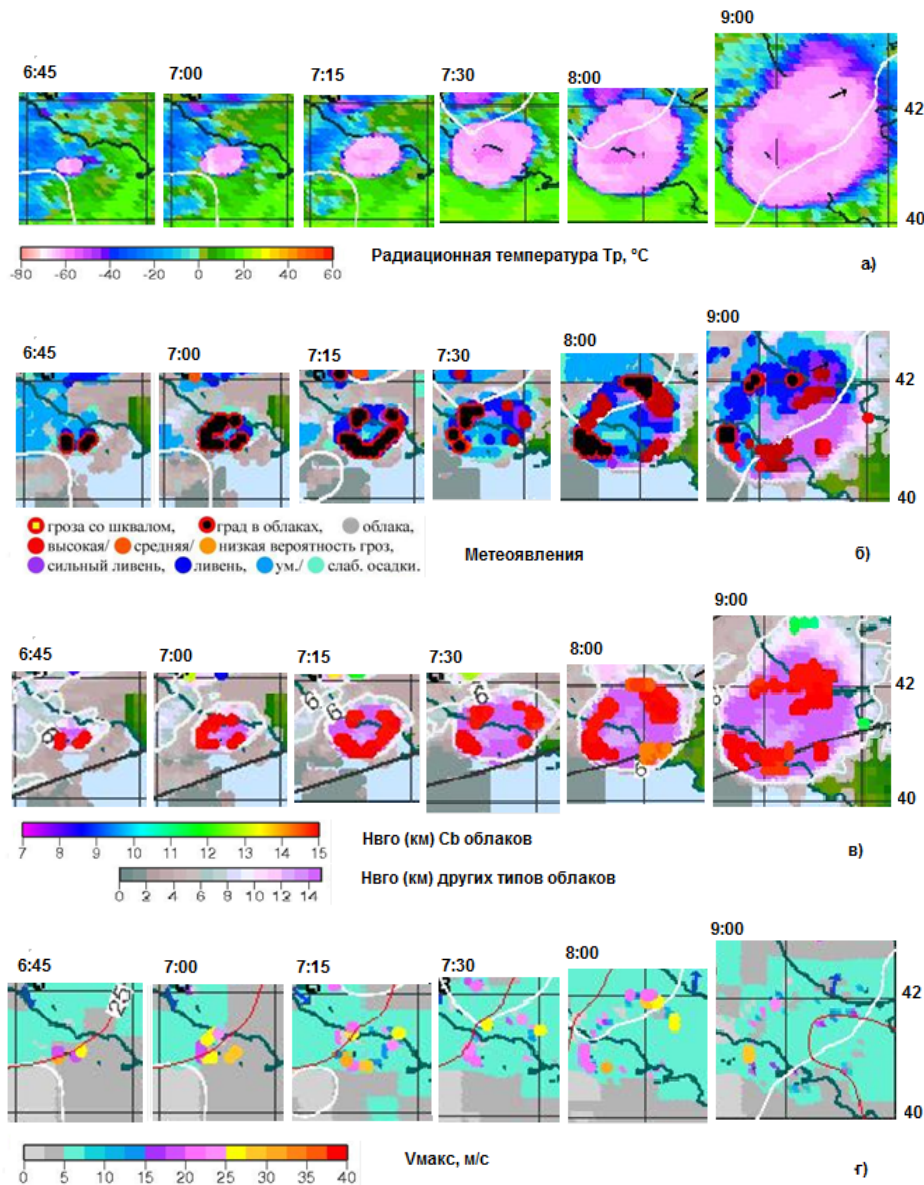


Рис. 3. Фрагменты карт радиационной температуры (а) и диагностированных метеорологических явлений (б), высоты верхней границы кучево-дождевых облаков (в) и максимальной скорости ветра (г) в районе МККСО над центральной Италией. Съемка ИСЗ Meteosat-10, 05.09.2015, 6.45, 7.00, 7.15, 7.30, 8.00 и 9.00 ч ВСВ.

Fig. 3. Fragments of radiation temperature maps (a) and diagnosed meteorological phenomena (б), Cb top height (в) and the maximum wind speed (г) in the ICCS area over central Italy. The survey was held on September 05, 2015 at 6.45, 7.00, 7.15, 7.30, 8.00 and 9.00 UTC with Meteosat-10.

2. **Возникновение МККСО** распознано в последующие 30 мин наблюдений (6.45 – 7.15 ч ВСВ). Сначала в 6.45 ВСВ образовалось скопление из двух суперячейковых облаков (рис. 3б, в, г) с Нвго ~15 км, которые имели общую облачность (рис. 3а) почти округлой формы с диаметром ~60 км. К 7.00 ВСВ (рис. 3б, в, г) количество скоплений из суперячейковых Сб (с диагностированными грозами, градом в облаках и шквалами) резко возросло, и они образовали почти сплошное кольцо, которое охватило всю периферийную часть облачности МККСО. При этом наименьшие значения T_r в скоплениях Сб были ниже $-65\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3а), Нвго достигала ~15 км (рис. 3в), а горизонтальная протяженность Сб составляла примерно 15–30 км.

Момент времени, когда первые суперячейковые Сб образовали скопление с явно выраженным упорядочением на периферии облачности округлой формы (рис. 3б, 6.45 ч ВСВ), можно рассматривать как момент возникновения МККСО диаметром ~60 км (β -мезомасштаб, [9]). В таком МККСО одновременно возможны доминирующая закрытая (создающая облачность округлой формы на рис. 3а) и открытая (в виде кольцеобразного расположения суперячейковых облаков на рис. 3б, в) конвективные циркуляции.

3. **Быстрый рост диаметра МККСО.** В последующие два часа (с 7.15 до 9.30 ч ВСВ) продолжался быстрый рост диаметра округлой облачности МККСО, который увеличился со 110 км в 7.15 ВСВ до ~280 км (α -мезомасштаб) к 9.00 ч ВСВ (рис. 3а). Примерно так же рос и внешний диаметр кольцеобразного скопления суперячейковых облаков (Нвго ~15 км), во многих из которых продолжали распознаваться грозы с градом в облаках и ливни (рис. 3б), а также возможность возникновения шквалов (рис. 3г).

Особенностью этой фазы является появление быстро меняющихся больших разрывов в кольцеобразном упорядочивании суперячейковых облаков на периферии МККСО, а также существенная неустойчивость размеров их локальных скоплений и расположения на периферии быстро растущей облачности почти округлой формы.

4. **Уменьшение активности МККСО.** В период примерно с 10.00 до 12.00 ч ВСВ и позднее облачность МККСО стала заметно вытягиваться в направлении переноса на северо-восток, а активность суперячейковых облаков и их скоплений – ощутимо убывать, хотя еще и продолжала диагностироваться высокая вероятность гроз.

2.2. Динамика скоростей конвекции, роста и смещения МККСО

Упрощенную оценку средней вертикальной скорости конвекции в МККСО можно сделать в предположении, что весь объем воздуха, выносимого вверх под влиянием закрытой конвективной циркуляции МККСО, равномерно распределяется по его внешней периферии, обеспечивая рост

радиуса почти округлой облачности МККСО. Количественно это условие можно записать в следующем виде:

$$W_k \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \approx V_R \cdot \pi \cdot D \cdot H, \quad (1)$$

где W_k – средняя (по МККСО) вертикальная скорость конвекции; V_R – средняя (по МККСО) скорость роста радиуса округлой облачности МККСО; D и H – диаметр и высота верхней границы облачности МККСО соответственно. При этом $H \approx 15$ км (высота верхней границы Сб), а значения D и V_R можно оценить по картам радиационной температуры, которые представлены на рис. 3а.

Отметим, что заметный вклад в среднее значение W_k в МККСО, по-видимому, могут давать и обширные (5–15 км) зоны мощных ламинарных восходящих потоков со скоростями до 20–40 м/с, возникающие в каждом суперячейковом облаке [11, 13].

После преобразования соотношения (1) для оценки W_k получаем следующее выражение:

$$W_k \approx 4H \cdot V_R / D. \quad (2)$$

Для получения количественных представлений о значениях диаметра облачности МККСО, радиальной скорости его роста, а также о средней вертикальной скорости конвекции и скорости переноса МКК, обратимся к рис. 4.

На рис. 4а видно, что с момента возникновения первого суперячейкового (Нвго ~14–15 км) облака в 6.15 ч ВСВ, диаметр облачности МККСО (кривая 1) в течение первых двух часов быстро увеличился с ~30 до 200 км, а в следующие 3 часа вырос уже до 400 км. При этом смещение центра МККСО (относительно места его возникновения) за 2 часа составило ~125 км (кривая 2 на рис. 4а), а за 5 часов достигло 320 км.

Скорость роста диаметра МККСО в первый час после возникновения облачности МККСО оказалась максимальной (~110 км/ч, кривая 1 на рис. 4б), а в последующие часы несколько уменьшилась (до 80 км/ч). При этом некоторая немонотонность скорости роста диаметра МККСО возникла через 2 ч 45 мин, когда в его закрытую циркуляцию был вовлечен и поглощен облачный массив, автономно развивавшийся к северу от МККСО. Процесс вовлечения хорошо виден на последовательности фрагментов карт рис. 3а, построенных в 7.30, 8.00 и 9.00 ч ВСВ.

Рассчитанная по формуле (2) средняя вертикальная скорость конвекции оказалась максимальной (~34 м/с на рис. 4в) в момент возникновения первого суперячейкового Сб, что согласуется с известными радиолокационными наблюдениями [11, 13]. В момент возникновения МККСО значение W_k резко уменьшилось до 17 м/с, а в процессе роста диаметра МККСО величина W_k монотонно убывала до 5 м/с и далее до 2 м/с

при $D \sim 160$ и 400 км соответственно. Причем значение $W_k \sim 5$, рассчитанное по формуле (2) для $D \sim 160$ км (в 8.00 ч ВСВ, рис. 1а), совпадает с его оценкой, независимо сделанной выше по величине влажноадиабатической неустойчивости тропосферы (рис. 2б) в центральной части МККСО.

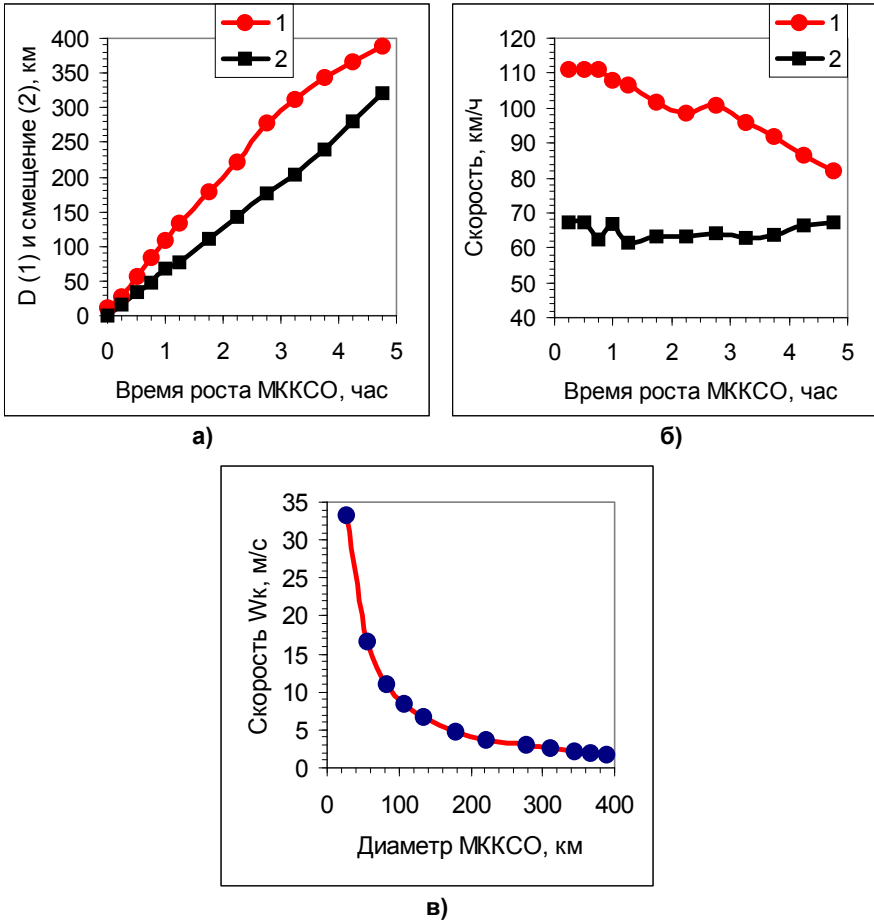


Рис. 4. Графики изменения со временем диаметра D (а, кривая 1) облачности МККСО, смещения (а, кривая 2) его центра относительно пункта возникновения, а также скорости роста диаметра (б, кривая 1), скорости смещения (б, кривая 2) центра МККСО и оценочной средней вертикальной скорости конвекции в МККСО при его разном диаметре (в). Время роста МККСО, равное нулю, соответствует 06.15 ВСВ 05 сентября 2015 г.

Fig. 4. Graphs of change with time of diameter D (а-1) of cloud of ICCS, displacement (а-2) of its center relative to initiation place, as well as speed of diameter growth (б-1), speed of displacement (б-2) of center of ICCS and estimated average vertical velocity of convection in ICCS at its different diameter (в). The ICCS growth time of zero corresponds to 06.15 UTC on September 05, 2015.

Отметим, что с ростом диаметра МККСО уменьшение значений W_k сопровождалось ростом неустойчивости пространственной структуры упорядочивания и появления дополнительных скоплений суперячейковых облаков в МККСО, что видно на рис. 3б, в.

Средняя скорость смещения центра МККСО в рассмотренный период времени оказалась близкой к 65 км/ч, или 18 м/с (кривая 2 на рис. 4б), и слабо изменялась (в пределах ± 3 км/ч). Согласно рис. 2в, такие значения могли наблюдаться на высоте $\sim 3,5$ км, которая близка к высоте нулевой изотермы (рис. 2а) и где возможна большая влажноадиабатическая неустойчивость атмосферы (рис. 2б).

При радиальной скорости роста МККСО, близкой к 55 км/ч, получаем, что передняя (или северо-восточная) граница МККСО смещалась с максимальной скоростью, близкой к 120 км/ч, а задняя (ЮЗ) граница – с минимальной скоростью ~ 10 км/ч. Из-за этого задняя граница МККСО длительное время оказывалась как бы «привязана» к месту возникновения МККСО.

Обобщая результаты анализа, можно сформулировать следующим образом основную закономерность динамики развития МККСО, обнаруженную по картам спутникового диагноза.

Локальные восходящие потоки тепла и влаги, существующие в отдельных суперячейковых облаках и их скоплениях, могут провоцировать возникновение МККСО и подпитывать его развитие от размера β -мезомасштаба до α -мезомасштаба. При этом закрытая конвективная циркуляция в МККСО, со своей стороны, стимулирует возникновение суперячейковых Сб в основном на периферии облачности МККСО, поскольку только там имеются условия для усиления нисходящих и связанных с ними восходящих вертикальных движений. Обнаруженные свойства МККСО позволяют рассматривать его в качестве подкласса облачных систем глубокой конвекции осесимметричного типа, размер которых быстро изменяется от β - до α -мезомасштаба.

Другой случай анализа карт спутникового диагноза за 29 августа 2014 г. показал, что именно вблизи резкой границы облачной шапки МККСО могут возникать не только шквалы, но и такое разрушительное явление, как смерч, который в этот день наблюдался в Башкирии [5].

Выводы

Рассмотрено применение карт спутникового диагноза для анализа свойств быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции. При распознавании одноячейковых, многоячейковых и суперячейковых грозоградовых облаков использованы известные данные наблюдений метеорологических радиолокаторов о высоте их верхней границы и поперечных размерах. По картам спутникового диагноза установлено, что

диаметр внезапно возникшей облачности почти округлой формы за 3 часа вырос до 300 км и продолжал быстро расти, а на ее периферии диагностировалось упорядоченное в виде кольца скопление суперячейковых грозоградовых облаков. Быстрый рост диаметра МККСО создал проблему в применении к нему традиционной классификации масштабов (β - или α -мезомасштаба [9]), которая принята для облачных систем глубокой конвекции осесимметричного типа. Поэтому предложено выделить МККСО в подкласс редких быстро растущих мезомасштабных конвективных комплексов суперячейковых облаков.

По прогностическим модельным данным, рассчитанным на момент спутниковой съемки, проведен анализ вертикальных профилей температуры воздуха, ее вертикального градиента, скорости и направления ветра в центральной части МККСО. Отмечено, что значения этих параметров оказались типичными для районов существования суперячейковых облаков [12], что подтвердило справедливость их распознавания по картам спутникового диагноза.

Проведен анализ динамики изменения свойств быстро растущего МККСО в разных фазах его развития, начиная с возникновения первого суперячейкового облака и заканчивая уменьшением активности МККСО, когда еще продолжала диагностироваться высокая вероятность гроз. Отмечена устойчивая тенденция возникновения и упорядочивания суперячейковых облаков (Нвго ~ 15 км) в виде кольца на периферии почти округлой облачности МККСО в разные фазы его развития.

По значениям диаметра облачности МККСО, высоты ее верхней границы и радиальной скорости роста МККСО проведена количественная оценка динамики изменения средней вертикальной скорости конвекции, W_k , в МККСО. Установлено, что значение W_k оказалось максимальным (~ 34 м/с) в момент возникновения первого суперячейкового S_b и стало быстро уменьшаться с ростом диаметра облачности МККСО. Уменьшение W_k сопровождалось ростом неустойчивости кольцеобразного упорядочивания скоплений суперячейковых S_b на периферии и возникновением некоторых из них вблизи центральной области МККСО.

Показано, что распознавание МККСО стало возможным при использовании комплекса одновременно выпускаемых карт спутникового диагноза, который позволяет анализировать размеры облачности, распознавать районы с кучево-дождевыми облаками, оценивать высоту их верхней границы и дает представление о формировании грозоградовых процессов.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения карт спутникового диагноза для дальнейшего изучения процессов возникновения и развития опасных атмосферных явлений, что важно при совершенствовании методов их прогнозирования и изучения пространственной структуры.

Список литературы

1. Абдуллаев С.М., Желнин А.А., Ленская О.Ю. Структура мезомасштабных конвективных систем в Центральной России // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 1. С. 20-32.
2. Алексеева А.А., Бухаров М.В., Лосев В.М., Соловьев В.И. Диагноз осадков и гроз по измерениям уходящего теплового излучения облачности с геостационарных спутников // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 8. С. 33-42.
3. Бухаров М.В. Диагноз вероятности гроз по спутниковой информации // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 8. С. 5-16.
4. Бухаров М.В. Применение карт спутникового диагноза для анализа условий обледенения ледяными кристаллами // Одиннадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2013 г. Тезисы докладов. С. 155.
5. Бухаров М.В., Дмитриева Т.Г., Миронова Н.С. Применение карт спутникового диагноза для анализа метеорологических условий при смерче в Башкирии 29 августа 2014 г. // Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 10–14 ноября 2014 г. Тезисы докладов. С. 169.
6. Бухаров М.В. Кухарский А.В., Мисник Л.А. Автоматизированное рабочее место «Планета-метеобзор» для мониторинга опасных атмосферных явлений, связанных с конвективной облачностью // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 2. С. 64-69.
7. Бухаров М.В., Миронова Н.С., Сизенова Е.А. Анализ статистики соответствия между результатами автоматизированного распознавания осадков и гроз по информации с геостационарных спутников и наземными данными об этих явлениях // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса*. 2008. Т. 5, № 1. С. 424-428.
8. Бухаров М.В., Миронова Н.С., Ущико И.Г. Методические вопросы верификации результатов автоматизированного распознавания осадков и гроз по информации с геостационарных спутников // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Т. 2, № 4. С. 40-45.
9. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М., 2006. 101 с.
10. Лосев В.М. Гидродинамическая конечно-разностная модель регионального прогноза на ЭВМ CRAY // *Труды Гидрометцентра России*. 2000. Вып. 334. С. 69-90.
11. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 2000. 779 с.
12. Приходько М.Г. Справочник инженера-синоптика. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 327 с.
13. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1980, 231 с.
14. Шихов А.Н., Быков А.В. Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 1, С. 137-148.

References

1. Abdullaev S.M., Zhelnin A.A., Lenskaya O.Y. The structure of mesoscale convective systems in central Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 1, pp. 12–20. DOI: 10.3103/S1068373912010025.
2. Alekseeva A. A., Bukharov M.V., Losev V.M., and Solov'ev V.I. Diagnosis of Precipitation and Thunderstorms from Measurements of Outgoing Heat Radiation of a Cloud Cover from Geostationary Satellites. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2006, vol. 31, no. 8, pp. 20-26.
3. Bukharov M.V. Satellite diagnosis of thunderstorm probability. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 8, pp. 515–521. DOI: 10.3103/S1068373913080013.
4. Bukharov M.V. Primenenie kart sputnikovogo diagnoza dlya analiza usloviy obledeneniya ledyanymi kristallami // 11 Vserossiyskaya otkrytaya konferenciya «Sovremennye problemy

distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa», Moscow, IKI RAN, 11–15 noyabrya 2013. Tezisy dokladov. Moscow, 2013, pp. 155 [in Russ.].

5. Buharov M.V., Dmitrieva T.G., Mironova N.S. Primenenie kart sputnikovogo diagnoza dlya analiza meteorologicheskikh usloviy pri smerche v Bashkirii 29 avgusta 2014 g. 12 Vse-rossiyskaya otkrytaya konferenciya «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa», Moscow, IKI RAN, 10–14 noyabrya 2014. Tezisy dokladov. Moscow, 2014, 169 p. [in Russ.].

6. Bukharov M.V., Kukharskii A.V., Misnik L.A. Automated work place “Planeta-Meteobzor” for monitoring hazardous weather associated with convective clouds. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, pp. 102–105. DOI: 10.3103/S1068373908020064.

7. Bukharov M.V., Mironova N.S., Sizenova E.A. Analiz statistiki sootvetstviya mezhdu rezul'tatami avtomatizirovannogo raspoznavaniya osadkov i groz po informacii s geostacionarnykh sputnikov i nazemnymi dannymi ob etih yavleniyah. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2008, vol. 5, no. 1, pp. 424–428 [in Russ.].

8. Bukharov M.V., Mironova N.S., Ushcheko I.G. Metodicheskie voprosy verifikacii rezul'tatov avtomatizirovannogo raspoznavaniya osadkov i groz po informacii s geostacionarnykh sputnikov. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2007, vol. 2, no. 4, pp. 40–45 [in Russ.].

9. Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M. Mezometeorologicheskie processy. Moscow, 2006, 101 p. [in Russ.].

10. Losev V.M. Gidrodinamicheskaya konechno-raznostnaya model' regional'nogo prognoza na EVM CRAY. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2000, vol. 334, pp. 69–90 [in Russ.].

11. Matveev L.T. Fizika atmosfery [Atmospheric physics]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 2000, 779 p. [in Russ.].

12. Prihod'ko M.G. Spravochnik inzhenera-sinoptika. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 327 p. [in Russ.].

13. Rukovodstvo po primeneniyu radiolokatorov MRL-4, MRL-5 i MRL-6 v sisteme gradozashchity. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1980, 231 p. [in Russ.].

14. Shikhov A.N., Bykov A.V. Assessment of forecast quality of mesoscale convective systems in Western Urals region using WRF model and MODIS satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2016, vol. 13, no. 1, pp. 137–148 [in Russ.].

Поступила в редакцию 30.04.2019 г.

Received by the editor 30.04.2019.