

Диагностические признаки интенсивной конвекции. Часть 1: по данным наземных радиолокационных наблюдений

О. В. Калмыкова^{1,2}, А. А. Спрыгин^{1,2}

¹ Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, 249038, Россия
E-mails: kov@feerc.ru, sprygin@rpatyphoon.ru

² Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия

Работа открывает цикл исследований авторов, направленных на изучение потенциала предсказуемости опасных конвективных явлений на европейской территории России и сопредельных территориях на основе анализа региональных особенностей динамики мезомасштабных конвективных систем различного типа и масштаба с привлечением комплекса данных разных видов наблюдений и численного моделирования. В первой части работы представлен литературный обзор диагностических признаков (сигнатур) интенсивных конвективных процессов по данным наземных радиолокационных наблюдений. Это наиболее хорошо описанный (детализированный) и широко представленный класс сигнатур, связанных с интенсивной конвекцией. Радарные сигнатуры могут выступать индикатором угроз формирования опасных конвективных явлений. Рассмотрены 12 видов радарных сигнатур, наиболее часто используемых преимущественно в зарубежной практике, но некоторые из которых известны и в нашей стране. В том числе приведены схемы (шаблоны) их проявлений, дано объяснение специфики их формирования в контексте динамики атмосферных процессов в системах глубокой конвекции с учётом степени их изученности, указаны связи сигнатур с конкретными классами конвективных систем и конкретными типами опасных явлений. Проанализирован известный опыт автоматической идентификации радарных сигнатур. На конкретных примерах продемонстрированы случаи проявлений радарных сигнатур при прохождении кучево-дождевых облаков с опасными явлениями на европейской территории России.

Ключевые слова: диагностические признаки, сигнатуры, интенсивная конвекция, радиолокация, радиолокационные данные, опасные конвективные явления, прогноз, наукастинг

Одобрена к печати: 29.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-9-25

Введение

Метеорологические радиолокаторы позволяют в реальном времени обнаруживать различные виды гидрометеоров в атмосфере, тем самым определять зоны интенсивных осадков, турбулентности, высокой скорости ветра и др. (<https://meteorad.ru/static/VMU-DMRL-3ed.pdf>). Интенсивные конвективные процессы характеризуются наличием мощных упорядоченных восходящих потоков — со скоростью свыше 25 м/с, сохраняющейся на протяжении длительного времени. Они обеспечивают быстрый вынос гидрометеоров (капель воды, кристаллов льда) в верхние слои облака. Это приводит к его стремительному, иногда взрывному, росту как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Прохождение таких облаков нередко сопровождается усилением ветра, шквалами, ливнями, грозами, крупным градом, иногда и смерчами. В англоязычной литературе кучево-дождевые облака с опасными явлениями часто обозначаются термином «конвективный шторм» (*англ.* convective/severe storm). В условиях сильного вертикального сдвига ветра интенсивные конвективные процессы могут порождать достаточно долгоживущие суперъячейковые облака.

В радиолокационных данных можно выделить характерные признаки — определённые типовые шаблоны (сигнатуры), указывающие на высокую интенсивность конвекции. Эти сигнатуры в основном просматриваются на изображениях горизонтальной отражаемости и доплеровской (радиальной) скорости, в некоторых случаях дополнительно анализируются и другие продукты (к примеру, дифференциальная отражаемость). Радарные сигнатуры

детально описаны в работах преимущественно зарубежных исследователей, но некоторые из них известны и в нашей стране. Далее представлен обзор наиболее часто используемых радарных сигнатур. Следует подчеркнуть, что природа проявления некоторых сигнатур изучена не в полной мере, и по этой причине не для всех связанных с ними аспектов может быть дано физическое обоснование. Это в основном относится к сигнатурам суперъячеек — долгоживущих кучево-дождевых облаков, состоящих из одной квазистационарной конвективной ячейки.

Обзор радарных сигнатур

Радарные сигнатуры интенсивной конвекции применяются в метеорологической практике уже достаточно долгое время. Наиболее существенный вклад в их изучение внесли американские метеорологи, чему способствовало активное развитие радарной сети на территории США после окончания Второй мировой войны (Atmospheric..., 2007; Lemon, 1977). Первые работы, связанные с выявлением этих сигнатур, относятся к 50-м гг. XX в., в частности, в работе Г. Э. Стаута и Ф. А. Хаффа (Stout, Huff, 1953) была впервые задокументирована сигнатура крючкообразного изгиба радиоэха (*англ.* Hook Echo).

На сегодняшний момент известно уже более десятка видов радарных сигнатур. Их можно разделить на ряд групп: по уровню рассматриваемого для их идентификации слоя атмосферы (сигнатуры верхнего (8–15 км), среднего (2–8 км), нижнего (0–2 км) уровня, многоуровневые сигнатуры); по виду облачных систем (суперъячейки, фронтальные облачные системы, градовые облака); по типу явлений, с которыми связаны те или иные сигнатуры (https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures).

Крючкообразный изгиб радиоэха

Сигнатура Hook Echo выявляется на изображениях горизонтальной отражаемости нижнего уровня, в некоторых случаях анализ этой сигнатуры проводят с использованием карты метеоявлений (*рис. 1*).

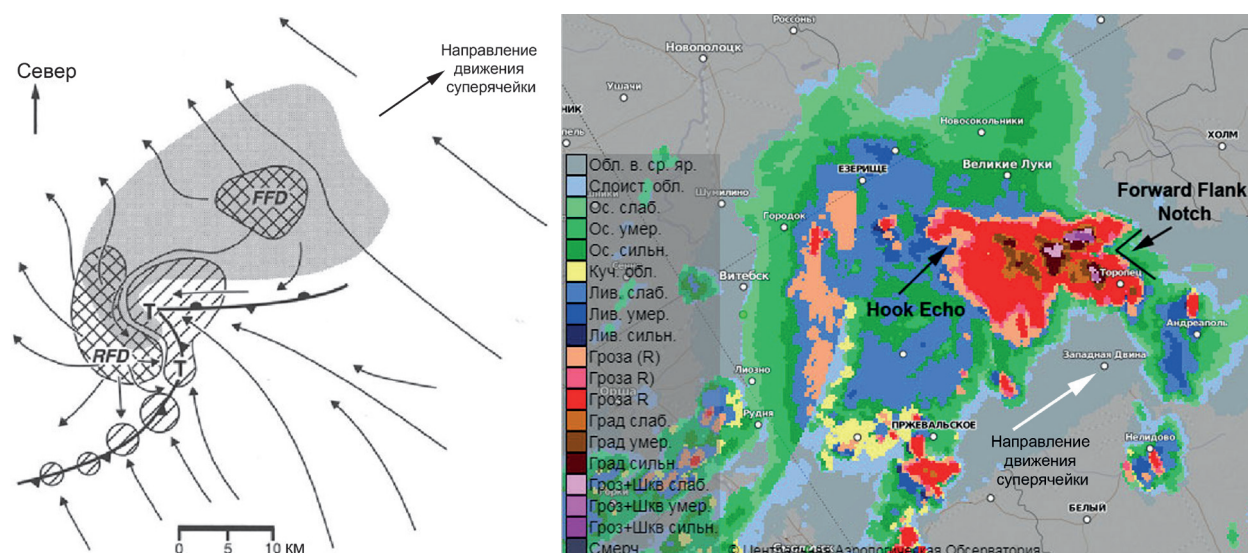


Рис. 1. Концептуальная модель суперъячейки у поверхности земли (*слева*) (серым обозначена зона радиоэха, возможные места формирования смерчей отмечены буквой Т, заштрихованная зона с Т — область притока воздуха, стрелками показаны линии тока) (Wakimoto, 2001) и примеры сигнатур Hook Echo и FFN (*англ.* Forward Flank Notch, летящий орёл) для суперъячейки 04.07.2024 на карте метеоявлений (*справа*)

Сигнатура присуща суперъячейковым облакам, в которых высока вероятность формирования опасных явлений различных типов, и в особенности смерчей (Forbes, 1981; Markowski, 2002). Специфическая форма радиоэха в данном случае связана с мезоциклоном (вихрем диаметром 2–10 км), который является неотъемлемой частью суперъячейки и возникает в условиях большого вертикального сдвига ветра, и с особенностями движения нисходящих потоков в облаке.

В суперъячейке принято выделять два принципиально отличающихся друг от друга нисходящих потока. Первый — так называемый передний поток FFD (*англ.* Forward Flank Downdraft), расположенный в передней части облака на его подветренном фланге; второй — тыловой RFD (*англ.* Rear-Flank Downdraft), формирующийся на наветренном фланге облака (см. *рис. 1а*). Передний нисходящий поток FFD образуется в результате охлаждения и последующего опускания изначально тёплого и влажного воздуха пограничного слоя, который был втянут в восходящий поток, поднят вверх, а затем вынесен вперёд по направлению движения облака на уровне нейтральной плавучести. Он обуславливает выпадение обильных осадков в передней части облака. В тыловом нисходящем потоке RFD преобладает более холодный и сухой воздух, опускающийся из наковальни облака, причём со значительно большей скоростью, чем в FFD. Осадков в тылу облака, как правило, выпадет значительно меньше.

Характерный для суперъячейки крюк радиоэха формируется на тыловой периферии мезоциклона, с наветренной стороны, где тыловой нисходящий поток, сносимый в сторону распространения суперъячейки, сталкивается с мезоциклоном, огибает зону восходящего вихревого движения, формируя изогнутую структуру (Doswell, Burgess, 1993; Weisman, 2015). По сигнатуре Hook Echo можно судить о размерах мезоциклона и его интенсивности: чем чётче и изогнутее крюк, тем сильнее скорость вращения в мезоциклоне. По некоторым оценкам данная сигнатура может проявляться за 10–20 мин до появления смерчей (Brotzge et al., 2013).

Для автоматического распознавания сигнатуры Hook Echo в работе Х. Вана с соавторами (Wang et al., 2007) предложена схема скелетизации — построения однопиксельных подобию изображений с сохранением формы и связности основных элементов, при этом анализируются такие параметры скелета, как кривизна, ориентация, размер и близость к границам облака. Применяются и подходы к глубокому машинному обучению, к примеру, с использованием свёрточных нейронных сетей (Sassa et al., 2022).

Навес радиоэха

Навес радиоэха — область, нависающая над областью слабого радиоэха и расположенная на правом наветренном фланге конвективной ячейки в процессах с правосторонним развитием и на левом наветренном фланге — в процессах с левосторонним развитием (Временные..., 2021). Такая структура возникает из-за мощного восходящего потока воздуха внутри сильной конвективной системы, чаще всего суперъячейкового облака (Абшаев и др., 2022; Lemon, 1977). В англоязычной литературе для обозначения навеса радиоэха используют термины BWER (*англ.* Bounded Weak Echo Region) или Echo Overhang. Считается, что данная сигнатура может выявляться перед формированием смерчей, крупного града, сильных осадков, иногда шквалов.

Сигнатура обнаруживается при просмотре результатов радиолокационных измерений горизонтальной отражаемости как в вертикальном сечении вдоль направления перемещения облака, так и в горизонтальном сечении на определённой высоте (как правило, среднего уровня) (Heinselman et al., 2015) (*рис. 2*, см. с. 12). В последнем случае сигнатура вырождается в область квазиокруглой формы слабого радиоэха диаметром несколько километров, окружённую со всех сторон областью более высокого радиоэха (*англ.* vault).

В работах зарубежных исследователей подчёркивается, что сигнатура навеса радиоэха BWER является результатом действия двух накладывающихся друг на друга факторов. Первый фактор связан с влиянием центробежных сил, которые обеспечивают сортировку

частиц по размерам таким образом, что в мезоциклоне остаются только мелкие частицы, а крупные выносятся на его периферию (Lemon, Doswell, 1979). В качестве второго выступает динамическое блокирование, вследствие которого интенсивный восходящий поток не даёт крупным частицам проникнуть в центральную зону. Перенос небольших гидрометеоров в мезоциклоне на высоты верхнего уровня осуществляется настолько быстро, что частицы не успевают значительно вырасти в размерах и идентифицируются радаром как область слабого радиоэха (Lemon, 1977). На некоторой высоте, где сила потока уже не может удерживать всю массу поднятых частиц, они выносятся наружу из мезоциклона. При этом осадки сносятся вниз по ветру таким образом, что основная их масса выпадает с подветренной стороны, а на наветренной стороне образуется навес. В результате в нижней и средней частях облака формируется почти вертикальный канал слабого эха, окружённый со всех сторон значительно более сильным радиоэхом выше и по бокам. Область данного канала маркирует центральную зону восходящего потока.

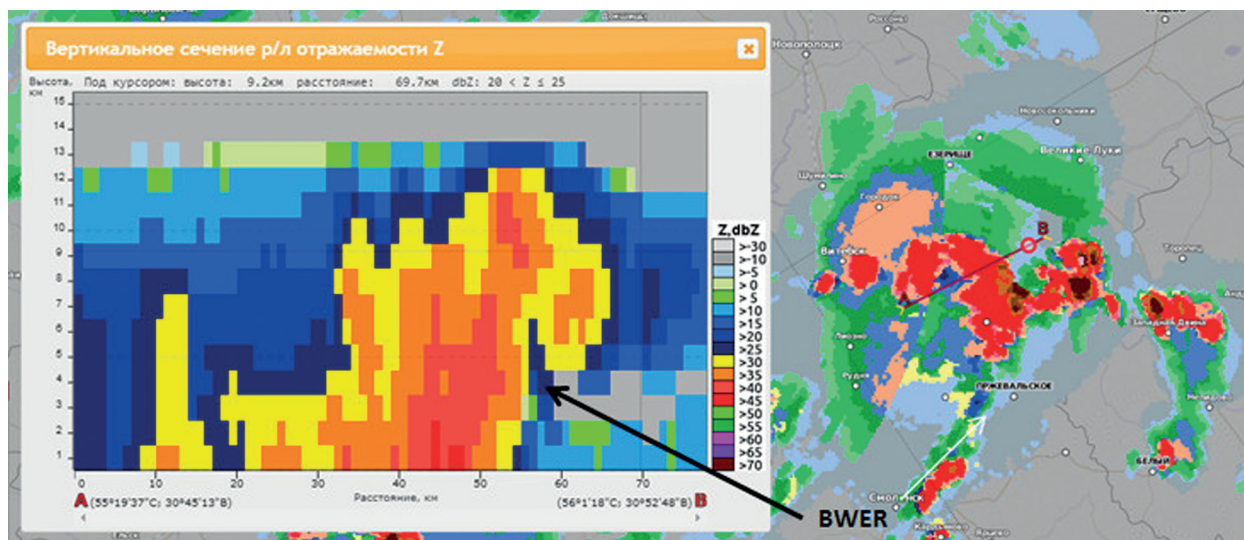


Рис. 2. Пример сигнатуры BW ER, суперъячейка 04.07.2024, карта метеоявлений с вертикальным сечением

В нашей стране эффект существования навеса радиоэха известен уже достаточно долгое время, так ещё в публикации Г. Б. Брылева с соавторами (Брылев и др., 1986) упоминается об идентификации куполообразных ниш с малыми значениями отражаемости в структуре суперъячейковых облаков. В работах отечественных противоградовых служб обнаружение навеса радиоэха служит сигналом о формировании града в облаке и основанием для применения реагентов в облако. В свою очередь исчезновение навеса или его опускание после ввода реагентов является показателем успешности проведённых активных воздействий и индикатором возможности их прекращения. Известно, что время существования навеса составляет от 10 до 20 мин, а скорость восходящих потоков может достигать от 20 до 40 м/с (Временные..., 2021). Зона ввода реагента для активных воздействий выбирается в соответствии с расположением питающих (фидерных) облаков, предполагая их местонахождение в направлении продолжения навеса (Абшаев и др., 2014).

В российской практике противоградовой защиты определён специальный алгоритм выделения навеса радиоэха (Временные..., 2021). В работах В. Лакшманана (Lakshmanan, 2000) и Н. Р. Пола с соавторами (Pal et al., 2006) рассматриваются подходы к использованию соответственно генетических алгоритмов и правил нечёткой логики для построения решающих функций для отбора областей навеса радиоэха. Изначальный список кандидатов в эту область строится на основе анализа горизонтальных сечений радиолокационных данных и выделения тех областей, которые включают в себя регион низких значений отражаемости, окружённый более высокими значениями.

Сигнатура мезоциклона

В данных высокого пространственного разрешения (не более 1 км) может идентифицироваться сигнатура, напрямую связанная с мезоциклоническим вращением в суперъячейке. Мезоциклон обычно выявляется на изображениях радиальной скорости в сечениях среднего и нижнего уровней. Он проявляется в виде компактной области так называемого куплета (*англ. couplet*) — смежных зон положительной и отрицательной радиальной скорости (Duda, Gallus, 2010). Наличие мезоциклона может указывать на угрозу формирования различных опасных явлений, и в первую очередь смерчей, что подтверждается работами отечественных исследователей (Жуков, Щукин, 2017; Новицкий и др., 2016; Попов и др., 2020; Чернокульский и др., 2022) (рис. 3).

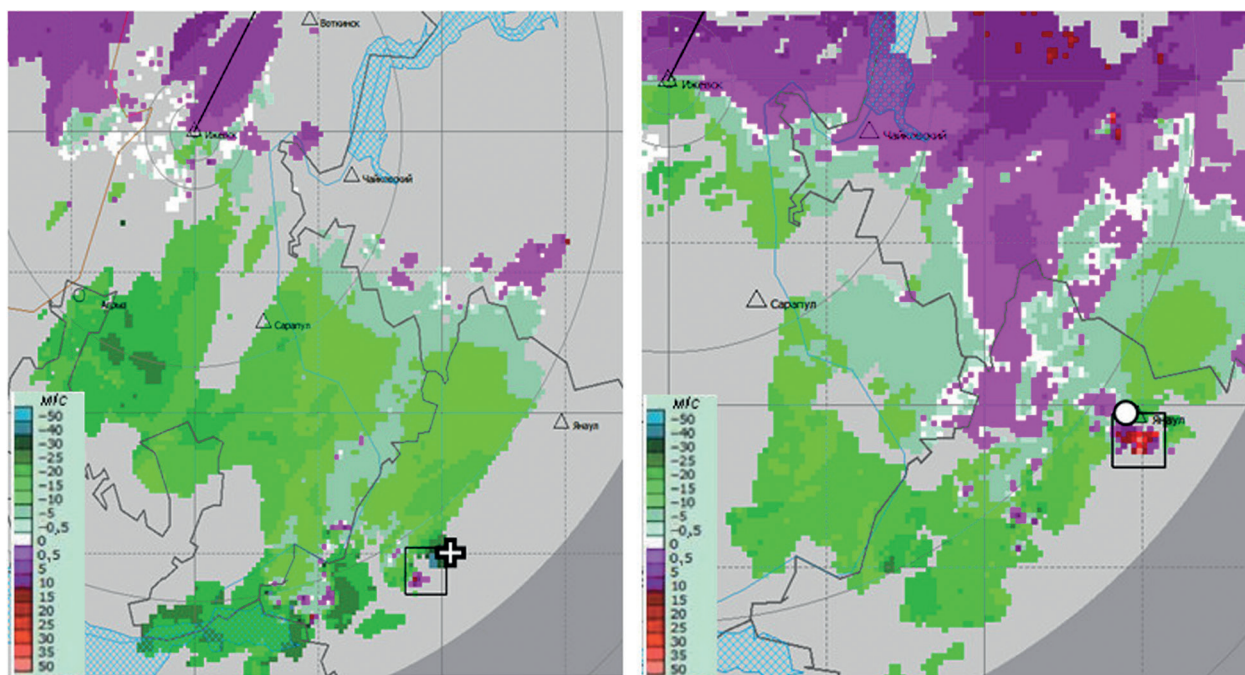


Рис. 3. Радиальная скорость на высоте 700 м за 12:03 (слева) и 12:43 (справа) всемирного скоординированного времени 29.08.2014, суперъячейка со смерчем (крестом и кругом отмечены места прохождения смерча, соответственно с. Кариево и г. Янаул; чёрным квадратом — область мезоциркуляции) (Новицкий и др., 2014)

Метеослужбами различных стран разработаны алгоритмы автоматического обнаружения мезоциклонов с учётом особенностей используемой радарной сети (Elizaga et al., 2007; Hengstebeck et al., 2017; Stumpf et al., 1998; https://hwt.nssl.noaa.gov/ewp/training_2019/2019_hwt_nmda_training.pdf). Эти алгоритмы главным образом базируются на пороговых принципах отбора куплетов: формируется перечень трёхмерных объектов куплетов-кандидатов в мезоциклон, для каждого кандидата рассчитывается набор различных параметров, по значениям которых и производится отбор.

Сигнатура летящий орёл

В передней части суперъячейки может просматриваться сигнатура в форме летящего орла — FFN — выемка переднего фланга. Она представляет собой V- или U-образную область на изображениях горизонтальной отражаемости среднего уровня или карте метеоявлений (см. рис. 1). Сигнатура может предшествовать появлению смерчей (Kumjian, Schenkman, 2008). До сих пор нет единого представления о том, каковы причины её формирования. Многие

учёные сходятся во мнении, что эта сигнатура есть результат сложного взаимодействия мощного восходящего потока в суперъячейке и набегающих ветров с верхних уровней (эффект обтекания препятствия) (Lemon, 1976).

Аномальное распространение суперъячейки

Сложная организация воздушных потоков, обуславливающая возникновение динамических возмущений давления, способствует аномальному распространению суперъячейковых облаков, под которым понимается перемещение в направлении и со скоростью, отличными от направления и скорости ведущего потока (Bunkers et al., 2000, 2022). Эту аномалию рассматривают в качестве одной из радарных сигнатур интенсивной конвекции и выявляют при последовательном просмотре радиолокационных изображений верхнего уровня, на которых лучше всего прослеживаются отклонения в движении суперъячеек. Предвестниками этой сигнатуры иногда выступают случаи разделения облаков (в условиях сильного сдвига ветра) (Rotunno, Klemp, 1985).

Автоматическая идентификация этой сигнатуры проводится посредством сравнения векторов движения суперъячейки и ведущего потока, в качестве последнего используют средне-взвешенный ветер в слое, как правило, 850–500 гПа. По известным данным о вертикальном сдвиге ветра может быть спрогнозирован характер движения (отклонение) суперъячейки (Bunkers et al., 2000).

Сигнатура доминантной ячейки

В конвективных системах с хорошо выраженным восходящим потоком высокой интенсивности (суперъячейки и многоячейковые облака) может проявляться сигнатура доминантной ячейки (англ. Single Cell) (рис. 4). Она представляет собой небольшую по размерам область высоких значений горизонтальной отражаемости (более 40 дБZ), которая обнаруживается на изображениях верхнего уровня и сохраняется в течение некоторого времени (https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures).

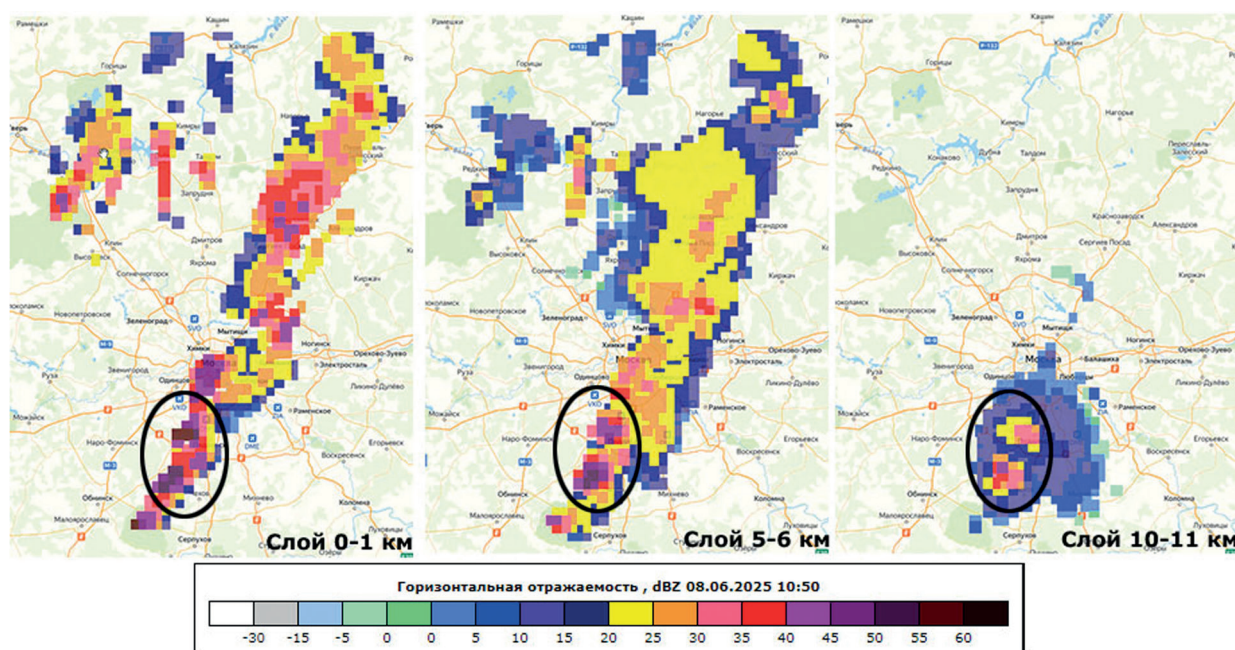


Рис. 4. Пример сигнатуры Single Cell, фронтальная система с градовыми очагами 08.06.2025 в поле горизонтальной отражаемости

Нередко эту сигнатуру рассматривают в комплексе с сигнатурой аномального распространения, предполагая, что выявленная доминантная ячейка должна перемещаться отлично от других ячеек, и в этом случае она может указывать на наличие суперъядчейки. Сигнатура может предшествовать выпадению крупного града или интенсивных осадков, если идентифицируется суперъядчейка, то к этому перечню добавляются риски формирования смерчей и шквалов.

Сигнатура слабого наклонного радиоэха

Область слабого наклонного радиоэха WER (*англ.* Weak Echo Region) без навеса может рассматриваться в вертикальном сечении облачных систем, не связанных с мезоциклоном, но имеющих явно выраженный восходящий поток высокой интенсивности. Наклон обеспечивается сносом осадков в сторону от этого потока за счёт вертикального сдвига ветра (Browning, 1965; Marwitz, 1972). Идентификация данной сигнатуры указывает на то, что восходящий поток способен удерживать достаточно большое количество гидрометеоров, доставляя их на высоту верхнего уровня, где происходит их укрупнение. Чем более сильными будут верхние ветры, тем более выраженным в итоге будет наклон радиоэха. Как правило, наклон направлен в ту же сторону, куда дует верхний ветер, а приток воздуха в облако идёт с противоположной стороны (*рис. 5*).

Сигнатура WER указывает на возможность формирования опасных явлений различных типов, при этом наиболее вероятными являются крупный град, сильные ветра и шквалы. В работе В. Пилоржа и Е. Лупикаши (Pilorz, Lupikasz, 2020) была проанализирована прогностическая значимость сигнатуры WER для территории Польши, и, как было установлено, она проявлялась примерно за 29 мин до выпадения крупного града. Известны случаи трансформации сигнатуры WER в BWER в процессе развития кучево-дождевого облака (Falk, 1997).

Сигнатура WER может быть диагностирована по характерному смещению максимума отражаемости — несовпадению положения этого максимума на верхнем и нижнем уровне (https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures/). Известны и более сложные алгоритмы автоматического распознавания этой сигнатуры, к примеру, на основе пороговых схем анализа градиентов отражаемости на различных уровнях (Shi et al., 2019).

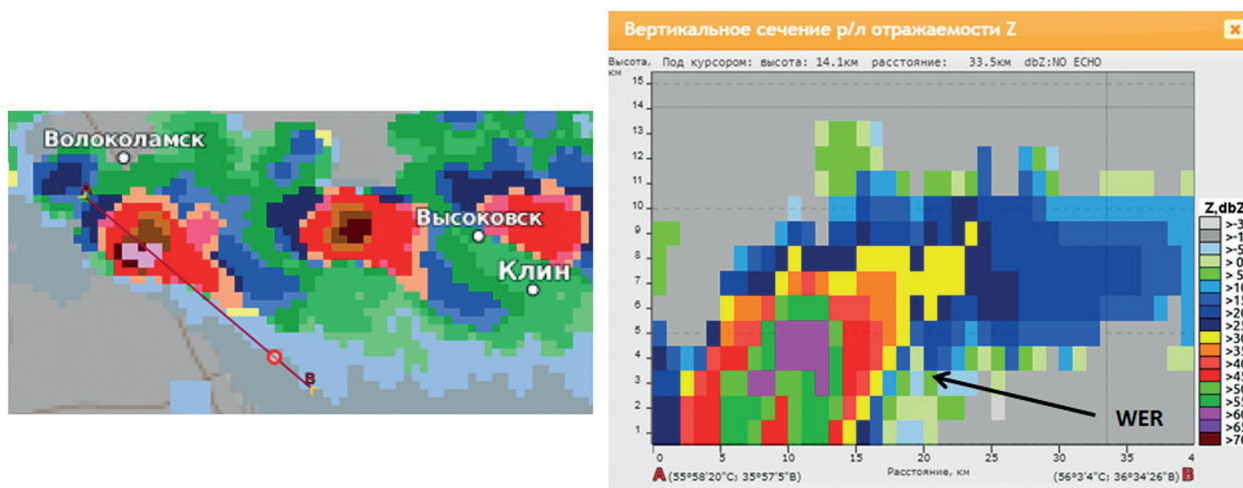


Рис. 5. Пример сигнатуры WER, облачная система со смерчем, 28.09.2024, карта метеоявлений (слева) с вертикальным сечением (справа)

Градиенты отражаемости

Резкие градиенты отражаемости на нижнем уровне (перепад 15–20 дБЗ и более в соседних точках) рассматриваются в качестве отдельной сигнатуры интенсивной конвекции (<https://www.icams-portal.gov/resources/ofcm/fmh/FMH11/FMH11D-2006.pdf>).

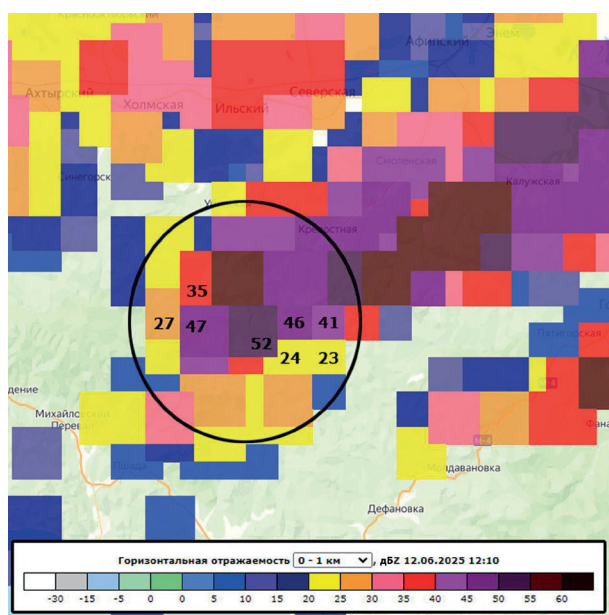


Рис. 6. Пример резких градиентов горизонтальной отражаемости в структуре градового облака 12.06.2025 (цифрами указаны значения отражаемости в дБЗ)

Природа этих градиентов обуславливается существованием зон резкого перехода между влажным воздухом, вовлекаемым в восходящий поток (низкая отражаемость), и областью интенсивного осадкообразования (высокая отражаемость). Лучше всего эти градиенты проявляются в данных высокого пространственного разрешения (не более 1 км), но иногда видны и в структуре данных более грубого разрешения (*рис. 6*, шаг сетки около 2 км). По величине градиентов можно судить об интенсивности нисходящего потока. В работе Д. Ши с соавторами (Shi et al.,

2019) эта сигнатура идентифицируется в качестве дополнительного критерия для выявления сигнатуры WER: вторая должна располагаться над областью первой.

Конвергенция и дивергенция воздушных потоков

В данных о радиальной скорости может быть обнаружена пара таких радарных сигнатур, как конвергенция потоков на нижнем уровне LLC (*англ.* Low-Level Convergence) и дивергенция на верхних высотах ULD (*англ.* Upper-Level Divergence). Эти сигнатуры при их совместном диагностировании указывают на наличие сильного, упорядоченного восходящего потока (Hameyer et al., 2023). Низкоуровневая конвергенция формирует зону вынужденного подъёма воздуха, способствует подпитке облака, а её интенсивность, как правило, коррелирует с интенсивностью восходящего потока (Ziegler et al., 1997). Как и в случае сигнатуры мезоциклона, сигнатура LLC проявляется в виде смежных областей с различными по знаку значениями радиальной скорости (*рис.* 7), но в отличие от первой вторая характеризуется более вытянутой границей смыкания этих областей, формирующейся на линии неустойчивости.

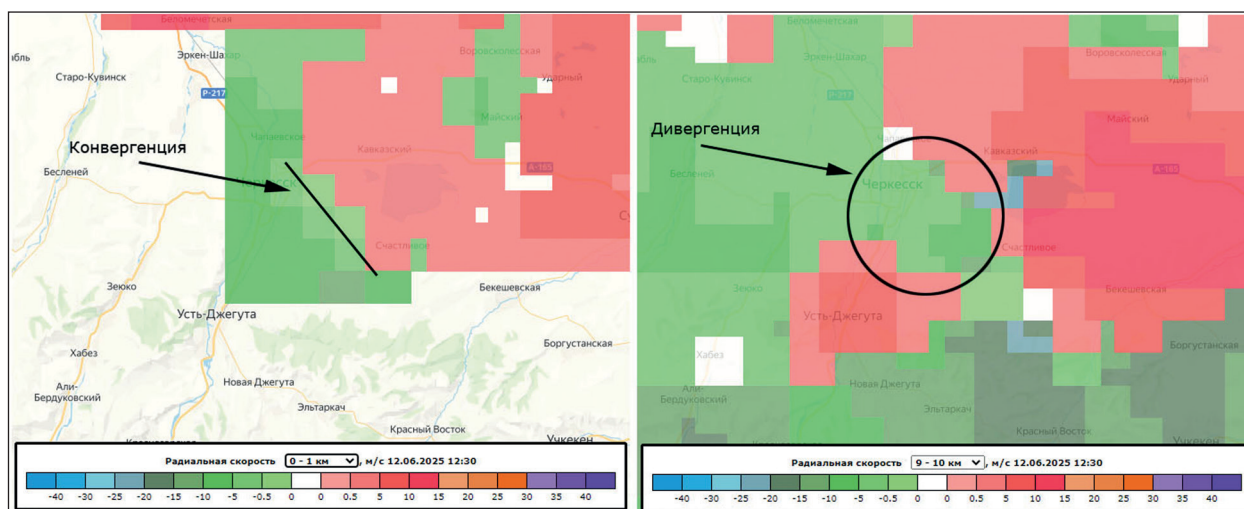


Рис. 7. Пример одновременного диагностирования конвергенции на нижнем уровне (слева) и дивергенции на верхнем (справа), гравовое облако 12.06.2025 в поле радиальной скорости

Верхнеуровневая дивергенция ULD в мощных кучево-дождевых облаках возникает вследствие переноса воздушных масс на предельные уровни (высоты) конвекции, по достижению которых воздух начинает растекаться в различные стороны от области восходящего потока, формируя наковальню облака (House, 1958). По интенсивности дивергенции можно судить об интенсивности восходящего потока и выпадающих осадков (Falk, 1997; Groot, Tost, 2023). На радиолокационных изображениях дивергенция может быть выявлена по веерообразным областям с чередующимися по знаку значениями скорости (см. *рис. 7*) (https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures/). Обе сигнатуры указывают на высокую вероятность возникновения крупного града и сильных ветров.

Дугообразный изгиб радиоэха

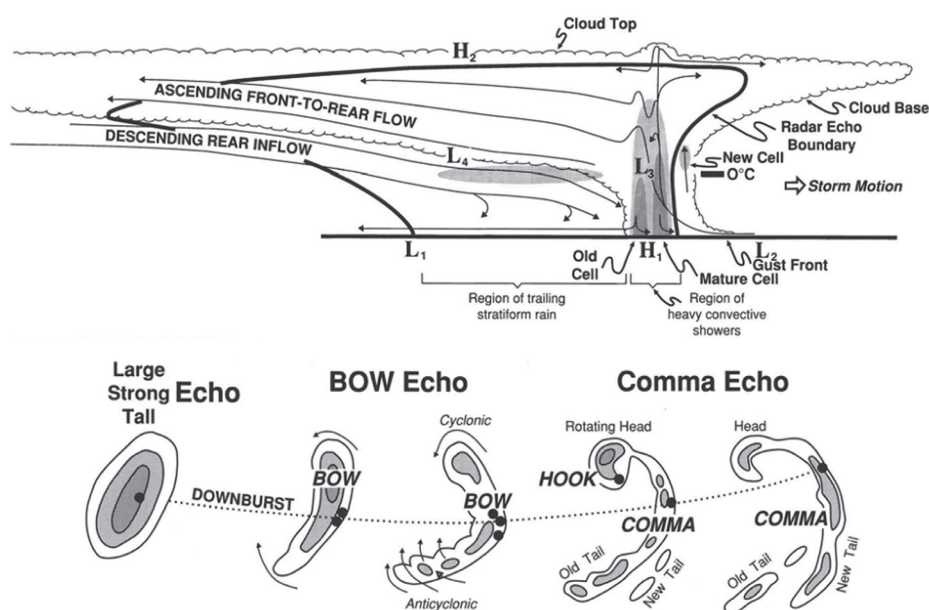


Рис. 8. Вертикальная структура линии шквалов (Н — области высокого давления, L — области низкого давления) (*сверху*). Ascending Front-to-Rear Flow — восходящий поток от передней к задней части облака, Descending Rear Inflow — задний нисходящий поток, Cloud Top — верхняя кромка облака, Cloud Base — основание облака, Radar Echo Boundary — граница радиоэха, New Cell — новая конвективная ячейка, Storm Motion — направление движения облака, Gust Front — фронт порывов ветра, Mature Cell — зрелая ячейка, Old Cell — старая ячейка, Region of heavy convective showers — область сильных ливневых осадков, Region of trailing stratiform rain — область тыловых обложных осадков. Типовая морфология развития Bow Echo (*снизу*) (Wakimoto, 2001). Large Strong Tail Echo — большое интенсивное вытянутое радиоэхо, Downburst — нисходящий порыв ветра, Bow — дуга, Cyclonic — циклонический, Anticyclonic — антициклонический, Rotating Head — вращающаяся «голова» облачной системы, Hook — крюк, Comma — запятая, Old Tail — старый очаг, New Tail — новый очаг, Head — голова облачной системы

С мультячейковыми фронтальными облачными системами, также именуемыми квазилинейными конвективными системами, в том числе большого масштаба, нередко порождающими шквалы, микропорывы, сильные ветры, иногда смерчи и деречо (долгоживущие шквалы), как правило, связана сигнатура дугообразного изгиба радиоэха (*англ.* Bow Echo). Она, чаще всего, идентифицируется на изображениях горизонтальной отражаемости нижнего уровня или на карте метеоявлений, иногда с небольшими выемками в тыловой части дуги RIN (*англ.* Rear Inflow Notches). Может проявляться как в виде отдельного сегмента, так и во всей структуре системы. В зрелой стадии развития конвективной системы сигнатура иногда принимает вид запятой (*англ.* Comma Echo) с вихревыми структурами на концах (*англ.* book-end vortices) (*рис. 8, снизу*) (Weisman, 2001).

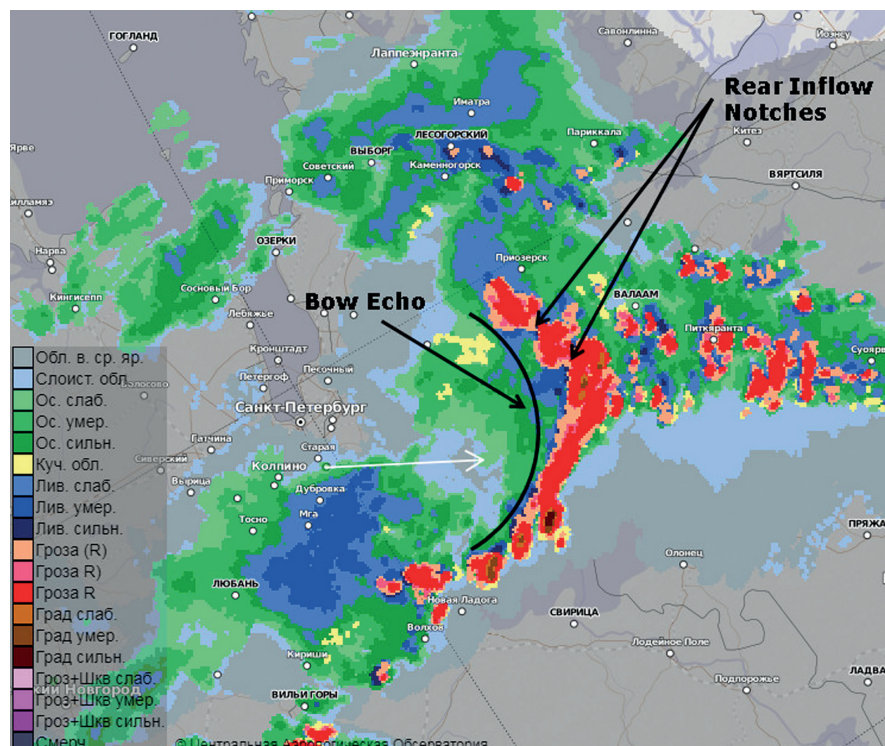


Рис. 9. Пример сигнатуры Bow Echo с выемками Rear Inflow Notches, линия шквалов 01.07.2024 на карте метеоявлений

Ключевую роль в формировании этой сигнатуры играет мощный тыловой нисходящий поток со стороны наковальни облака (*англ.* rear inflow jet), спускающийся к поверхности земли вдоль границы холодного бассейна (*англ.* cool pool) — плотной холодной воздушной массы, растекающейся в подоблачном слое и образующейся при испарении осадков (Houze et al., 1989). Поток возникает вследствие различий в давлении в области холодного бассейна (высокое давление) и передней части системы (низкое давление) (см. рис. 8, сверху). При приближении к поверхности он ускоряется и «продавливает» центральную часть системы вперёд, усиливая приземные ветры (рис. 9). Помимо этого потока усилению ветра также могут способствовать низкоуровневые мезовихри, формирующиеся вдоль линии шквалов (Wheatley et al., 2006). В их области, а также на концах дуги могут возникать смерчи.

Для автоматического обнаружения сигнатуры Bow Echo применяются различные методы, к примеру, использующие преобразование Радона, схему скелетизации и глубокое машинное обучение (Kamani et al., 2016; Mounier et al., 2022; Zeng, Hou, 2018). По опыту исследований, описанных в работе Ф. Дзэна и Ц. Хюу (Zeng, Hou, 2018), сигнатура может быть выявлена за 15 мин до регистрации сильных ветров.

Сигнатура тройного рассеяния

Системы глубокой конвекции, связанные с выпадением крупного града, имеют специфические радарные сигнатуры. Одной из наиболее выразительных является сигнатура тройного рассеяния TBSS (*англ.* Three Body Scatter Spike), которая представляет собой вытянутый «шип»/«отросток» (*англ.* flare) низких значений отражаемости, просматриваемый на изображениях среднего уровня от локаторов преимущественно S-диапазона (рис. 10, см. с. 19). Эта сигнатура обуславливается эффектом разнонаправленного рассеяния Ми (на крупных частицах) — луч отражается от частицы вниз, доходит до поверхности земли, отражается от неё и возвращается обратно к локатору (Lemon, 1998). За счёт увеличенного времени отражения локатор воспринимает этот сигнал, как будто он исходит от гидрометеоров, располагающихся

на некотором расстоянии позади от исходной частицы. Отличие реальной отражаемости от частицы и отражаемости возникшего за счёт переотражения артефакта может быть достаточно существенным. В примере на *рис. 10* отражаемость последнего приходится на диапазон 5–15 дБZ, в то время как области градового очага соответствуют значениям свыше 65 дБZ.

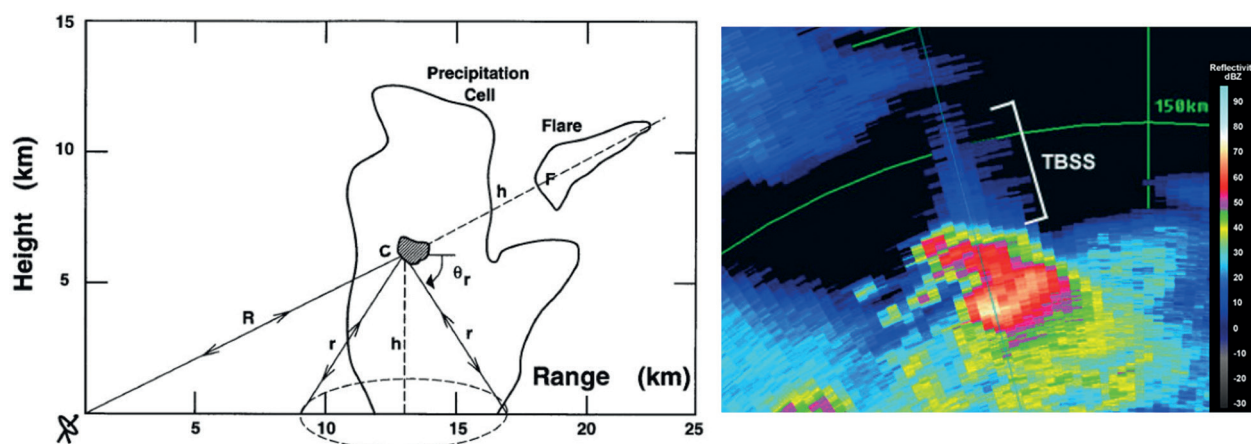


Рис. 10. Схема тройного рассеяния на крупной частице (*слева*) и пример сигнатуры TBSS на изображении горизонтальной радиолокационной отражаемости (*справа*) (https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures). Height — высота, Range — расстояние, Precipitation Cell — конвективная ячейка с осадками, Flare — шип/отросток

Сигнатура TBSS указывает на скопление крупных частиц в средней части облака (в слое роста града), которые удерживаются мощным восходящим потоком. Чем длиннее и чётче выражен отросток-артефакт, тем более интенсивным считается восходящий поток. Известные работы по автоматическому распознаванию сигнатуры TBSS связаны с использованием алгоритмов классификации на базе нечёткой логики и опорных векторов (Mahale et al., 2014; Meng et al., 2024).

Заключение

Современные метеорологические радиолокаторы позволяют обнаруживать интенсивные конвективные процессы по характерным для них типовым шаблонам (сигнатурам). Эти сигнатуры формируются вследствие сложной динамики атмосферных процессов в системах глубокой конвекции (наличия восходящих и нисходящих потоков и взаимодействия их между собой и с окружающей средой), обуславливающей особое распределение гидрометеоров в облаке. Радарные сигнатуры успешно используются в метеорологической практике многих стран ввиду их доказанной прогностической значимости — в большинстве случаев сигнатуры идентифицируются за некоторое время до регистрации опасных явлений. Сигнатуры выявляются экспертом визуально, либо средствами автоматического распознавания.

На радиолокационных изображениях суперъядерных облаков могут обнаруживаться такие сигнатуры, как крючкообразный изгиб и V-образная форма радиоэха, как возможные предшественники смерчей, а также область мезоциркуляции, навес радиоэха и аномальный вектор перемещения как сигналы вероятного появления опасных явлений различных типов. На опасность выпадения крупного града могут указывать области наклонного радиоэха и доминантной конвективной ячейки, зоны парной конвергенции на нижнем уровне и дивергенции на верхнем, а также артефакты переотражения для локаторов S-диапазона. Линии шквалов нередко идентифицируются по дугообразному изгибу радиоэха. В общем случае об интенсивной конвекции можно судить и по резким градиентам отражаемости на нижнем уровне.

В нашей стране радарные сигнатуры пока не получили широкого распространения, ввиду относительно недавнего времени, прошедшего с начала развёртывания новой современной радарной сети на территории России. Требуется исследование особенностей их проявлений в данном регионе. Проведённый авторами предварительный анализ данных радиолокационной сети Росгидромета показал, что на европейской территории России идентификация некоторых из вышерассмотренных сигнатур действительно может служить индикатором угроз возникновения опасных конвективных явлений, что согласуется с ранее приведёнными утверждениями.

В работе были использованы материалы (радиолокационные изображения), предоставленные ФГБУ «ЦАО» посредством веб-ГИС «Метеорад», а также полученные средствами визуализации радиолокационных продуктов в веб-ГИС ФГБУ «НПО «Тайфун».

Литературный обзор диагностических признаков интенсивной конвекции по данным наземных радиолокационных наблюдений выполнен при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-00357 «Опасные атмосферные конвективные явления в России: изменения, предсказуемость, риски», <https://rscf.ru/project/24-17-00357/>. Обработка и анализ радиолокационных данных на европейской территории России проводились в рамках научно-исследовательской работы по плану НИТР Росгидромета на 2025–2029 гг. (тема 6.8).

Литература

1. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Баркова М. В., Малкарова А. М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик, 2014. 500 с.
2. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Синькевич А. А. и др. Об особенностях развития суперячейкового конвективного облака в стадии максимальной грозовой активности (19 августа 2015 г., Северный Кавказ) // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 96–110. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-4-96-110.
3. Брылев Г. Б., Гашина С. Б., Низдойминова Г. Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 234 с.
4. Временные методические указания в области активного воздействия на метеорологические и другие геофизические процессы (защита сельскохозяйственных растений от градобития). 2021. 116 с. https://meganorm.ru/mega_doc/norm/akt_forma/1/vremennye_metodicheskie_ukazaniya_v_oblasti_aktivnogo.html. https://meganorm.ru/mega_doc/norm/akt_forma/1/vremennye_metodicheskie_ukazaniya_v_oblasti_aktivnogo.html.
5. Жуков В. Б., Шукин Г. Г. Пример наблюдения мезоциклона метеорологическим многопараметрическим радиолокатором // 7-е Всероссийские Армандовские чтения «Современ. проблемы дистанц. зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»: сб. ст. 2017. С. 191–196.
6. Новицкий М. А., Павлюков Ю. Б., Шмерлин Б. Я., Махнокрылова С. В., Серебрянник Н. И., Петриченко С. А., Терёб Л. А., Калмыкова О. В. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчопасной ситуации // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 32–42.
7. Попов В. Б., Синькевич А. А., Янг Д., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Довгалюк Ю. А., Вермей Н. Е., Старых Д. С. Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Финским заливом // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 5–16.
8. Чернокульский А. В., Шихов А. Н., Ажигов И. О. и др. Шквалы и смерчи на европейской части России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 71–90. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-11-71-90.
9. Atmospheric convection: Research and operational forecasting aspects / eds. Giaiotti D. B., Steinacker R., Stel F. Wien, Italy: Springer, 2007. 227 p. DOI: 10.1007/978-3-211-69291-2.
10. Brotzge J. A., Nelson S. E., Thompson R. L., Smith B. T. Tornado probability of detection and lead time as a function of convective mode and environmental parameters // Weather and Forecasting. 2013. V. 28. No. 5. P. 1261–1276. DOI: 10.1175/WAF-D-12-00119.1.
11. Browning K. Some inferences about the updraft within a severe local storm // J. Atmospheric Sciences. 1965. V. 22. No. 6. P. 669–677. DOI: 10.1175/1520-0469(1965)022<0669:SIATUW>2.0.CO;2.
12. Bunkers M. J., Klimowski B. A., Zeitle J. W. et al. Predicting supercell motion using a new hodograph technique // Weather and Forecasting. 2000. V. 15. No. 1. P. 61–79. DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0061:PSMUAN>2.0.CO;2.

13. *Bunkers M. J., Wilson M. B., Van Den Broeke M. S., Healey D. J.* Scan-by-scan storm-motion deviations for concurrent tornadic and nontornadic supercells // *Weather and Forecasting*. 2022. V. 37. No. 5. P. 749–770. DOI: 10.1175/WAF-D-21-0153.1.
14. *Doswell C. A., III, Burgess D. W.* Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models // *The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards*. Washington D. C.: American Geophysical Union, 1993. P. 161–172. DOI: 10.1029/GM079p0161.
15. *Duda J. D., Gallus W. A., Jr.* Spring and summer midwestern severe weather reports in supercells compared to other morphologies // *Weather and Forecasting*. 2010. V. 25. No. 1. P. 190–206. DOI: 10.1175/2009WAF2222338.1.
16. *Elizaga F., Conejo S., Martin F.* Automatic identification of mesocyclones and significant wind structures in Doppler radar images // *Atmospheric Research*. 2007. V. 83. No. 2–4. P. 405–414. DOI: 10.1016/j.atmosres.2005.10.023.
17. *Falk K. W.* Techniques for issuing severe thunderstorm and tornado warnings with the WSR-88D Doppler radar. National Weather Service, 1997. 44 p.
18. *Forbes G. S.* On the reliability of hook echoes as tornado indicators // *Monthly Weather Review*. 1981. V. 109. No. 7. P. 1457–1466. DOI: 10.1175/1520-0493(1981)109<1457:OTROHE>2.0.CO;2.
19. *Groot E., Tost H.* Divergent convective outflow in large-eddy simulations // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023. V. 23. No. 11. P. 6065–6081. DOI: 10.5194/acp-23-6065-2023.
20. *Heinselman P., LaDue D., Kingfield D., Hoffman R.* Tornado warning using phased-array radar data // *Weather and Forecasting*. 2015. V. 30. P. 57–78. DOI: 10.1175/WAF-D-14-00042.1.
21. *Hengstebeck T., Wapler K., Heizenreder D., Joe P.* Network radar-based detection of mesocyclones at the German Meteorological Service // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2017. V. 35. No. 2. P. 299–321. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0230.1.
22. *Homeyer C. R., Murillo E. M., Kumjian M.* Relationships between 10 years of radar-observed supercell characteristics and hail potential // *Monthly Weather Review*. 2023. V. 151. No. 10. P. 2609–2632. DOI: 10.1175/MWR-D-23-0019.1.
23. *House D. C.* Air mass modification and upper-level divergence // *Bull. American Meteorological Soc.* 1958. V. 39. No. 3. P. 137–143. DOI: 10.1175/1520-0477-39.3.137.
24. *Houze R. A., Jr., Rutledge S. A., Biggerstaff M. I., Smull B. F.* Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems // *Bull. American Meteorological Soc.* 1989. V. 70. No. 6. P. 608–619. DOI: 10.1175/1520-0477(1989)070<0608:IODWRD>2.0.CO;2.
25. *Kamani M. M., Farhat F., Wistar S., Wang J. Z.* Shape matching using skeleton context for automated bow echo detection // 2016 IEEE Intern. Conf. on Big Data. Washington, DC, USA, 2016. P. 901–908. DOI: 10.1109/BigData.2016.7840685.
26. *Kumjian M. R., Schenkman A. D.* Interpretation of the “Flying Eagle” Radar Signature in supercells // 24th Conf. on Severe Local Storms. Savannah, Georgia, USA, 2008. 7 p.
27. *Lakshmanan V.* Using a genetic algorithm to tune a bounded weak echo region detection algorithm // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2000. V. 39. P. 222–230. DOI: 10.1175/1520-0450(2000)039<0222:UAGATT>2.0.CO;2.
28. *Lemon L. R.* Wake vortex structure and aerodynamic origin in severe thunderstorms // *J. Atmospheric Science*. 1976. V. 33. P. 678–685. DOI: 10.1175/1520-0469(1976)033<0678:WVSAAO>2.0.CO;2.
29. *Lemon L. R.* New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report. 1977. 64 p.
30. *Lemon L. R.* The radar “three-body scatter spike”: An operational large-hail signature // *Weather and Forecasting*. 1998. V. 13. No. 2. P. 327–340. DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0327:TRTBSS>2.0.CO;2.
31. *Lemon L. R., Doswell C. A., III.* Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis // *Monthly Weather Review*. 1979. V. 107. No. 9. P. 1184–1197. DOI: 10.1175/1520-0493(1979)107<1184:STEAMS>2.0.CO;2.
32. *Mahale V. N., Zhang G., Xue M.* Fuzzy logic classification of S-band polarimetric radar echoes to identify three-body scattering and improve data quality // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2014. V. 53. No. 8. P. 2017–2033. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0358.1.
33. *Markowski P. M.* Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review // *Monthly Weather Review*. 2002. V. 130. No. 4. P. 852–876. DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<0852:HEARFD>2.0.CO;2.
34. *Marwitz J. D.* The structure and motion of severe hailstorms. Pt. I: Supercell storms // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 1972. V. 11. No. 1. P. 166–179. DOI: 10.1175/1520-0450(1972)011<0166:TSAMOS>2.0.CO;2.
35. *Meng L., Sang Y., Tang J.* Automatic identification of three-body scatter spike based on Jensen–Shannon divergence and support vector machine // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2024. V. 63. No. 9. P. 981–996. DOI: 10.1175/JAMC-D-24-0024.1.

36. Mounier A., Raynaud L., Rottner L. et al. Detection of bow echoes in kilometer-scale forecasts using a convolutional neural network // Artificial Intelligence for the Earth Systems. 2022. V. 1. No. 2. 20 p. DOI: 10.1175/AIES-D-21-0010.1.
37. Pal N. R., Mandal K., Pal S. et al. Fuzzy rule-based approach for detection of bounded weak-echo regions in radar images // J. Applied Meteorology and Climatology. 2006. V. 45. No. 9. P. 1304–1312. DOI: 10.1175/JAM2408.1.
38. Pilorz W., Lupikasza E. Radar reflectivity signatures and possible lead times of warnings for very large hail in Poland based on data from 2007–2015 // Environmental and Socio-economic Studies. 2020. V. 8. No. 3. P. 34–47. DOI: 10.2478/environ-2020-0016.
39. Rotunno R., Klemm J. B. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms // J. Atmospheric Sciences. 1985. V. 42. No. 3. P. 271–292. DOI: 10.1175/1520-0469(1985)042<0271:OTRAPO>2.0.CO;2.
40. Sassa K., Yamawaki M., Tanase H., Kubo T., Honda R. Automatic detection of hook echo by deep learning // Japan Geoscience Union Meeting 2022. 2022. <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2022/subject/MGI35-02/detail>.
41. Shi J., Ping W., Wang D., Jia H. Radar-based automatic identification and quantification of weak echo regions for hail nowcasting // Atmosphere. 2019. V. 10. No. 6. 21 p. DOI: 10.3390/atmos10060325.
42. Stout G. E., Huff F. A. Radar records Illinois tornadogenesis // Bull. American Meteorological Soc. 1953. V. 34. No. 6. P. 281–284. DOI: 10.1175/1520-0477-34.6.281.
43. Stumpf G. J., Witt A., Mitchell D. E. et al. The national severe storms laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D // Weather and Forecasting. 1998. V. 13. No. 2. P. 304–326. DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0304:TNSLM>2.0.CO;2.
44. Wakimoto R. M. Convectively driven high wind events // Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Soc., 2001. P. 255–298. DOI: 10.1175/0065-9401-28.50.255.
45. Wang H., Mercer R. E., Barron J., Joe P. Skeleton based hook echo detection // Proc. 2007 IEEE Intern. Conf. on Image Processing, ICIP 2007. San Antonio, Texas, USA, 2007. P. VI-361–VI-364. DOI: 10.1109/ICIP.2007.4379596.
46. Weisman M. L. Bow echoes: A tribute to T. T. Fujita // Bull. American Meteorological Soc. 2001. V. 82. No. 1. P. 97–116. DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<0097:BEATTT>2.3.CO;2.
47. Weisman M. L. Mesoscale meteorology. Convective storms: Overview // Encyclopedia of Atmospheric Sciences. N. Y.: Academic Press, 2015. P. 401–404. DOI: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00490-4.
48. Wheatley D. M., Trapp R. J., Atkins N. T. Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX // Monthly Weather Review. 2006. V. 134. No. 3. P. 791–806. DOI: 10.1175/MWR3100.1.
49. Zeng F., Hou J. Automatic detection of bow echoes from weather radar images // 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). 2018. P. 503–508. DOI: 10.1109/WCICA.2018.8630468.
50. Ziegler C. L., Lee T. J., Pielke R. A., Sr. Convective initiation at the dryline: A modeling study // Monthly Weather Review. 1997. V. 125. No. 6. P. 1001–1026. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<1001:CIATDA>2.0.CO;2.

Diagnostic features of severe convection. Part 1: Signatures derived from ground-based weather radar data

O. V. Kalmykova^{1,2}, A. A. Sprygin^{1,2}

¹ Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk 249038, Russia
E-mails: kov@feerc.ru, sprygin@rpatyphoon.ru

² A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia

The work initiates a series of studies by the authors aimed at assessing the predictability potential of severe weather convective events over the European part of Russia and adjacent territories. This is based on an analysis of regional characteristics in the dynamics of mesoscale convective systems of various types and scales, utilizing a combination of different observational data and numerical modeling. In the first part of the study, a literature review of diagnostic features (signatures) of intense convective processes derived from ground-based radar observations is presented. This is the most well-docu-

mented (detailed) and widely represented class of signatures associated with intense convection. Radar signatures can serve as indicators of threats leading to severe weather convective events. The study analyzes 12 types of radar signatures, most commonly used in international practice, though some are also known in Russia. These include schematic representations (templates) of their manifestations, explanations of their formation mechanisms in the context of atmospheric dynamics within deep convective systems, their association with specific classes of convective systems and types of severe weather. The study also reviews existing methods for automated radar signature identification and presents cases demonstrating these signatures during convective storms accompanied by severe weather events across European Russia.

Keywords: diagnostic features, signatures, severe convection, radar observations, radar data, severe weather events, forecast, nowcasting

Accepted: 29.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-9-25

References

1. Abshaev M. T., Abshaev A. M., Barekova M. V., Malkarova A. M., *Rukovodstvo po organizatsii i provedeniyu protivogradovykh rabot* (Guidelines for organizing and conducting anti-hail work), Nalchik, 2014, 500 p. (in Russian).
2. Abshaev M. T., Abshaev A. M., Sinkevich A. A. et al., Features of development of a supercell convective cloud at the stage of maximum lightning activity (August 19, 2015, the North Caucasus), *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, V. 47, No. 4, pp. 315–325, DOI: 10.3103/s1068373922040070.
3. Brylev G. B., Gaschina S. B., Nizdoiminoga G. L., *Radiolokatsionnye kharakteristiki oblakov i osadkov* (Radar characteristics of clouds and precipitation), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 234 p. (in Russian).
4. *Vremennye metodicheskie ukazaniya v oblasti aktivnogo vozdeistviya na meteorologicheskie i drugie geofizicheskie protsessy (zashchita sel'skokhozyaistvennykh rastenii ot gradobitiya)* (Temporary methodical guidelines in the field of active influence on meteorological and other geophysical processes (protection of agricultural plants from hail)), 2021, 116 p. (in Russian), https://meganorm.ru/mega_doc/norm/akt_forma/1/vremennye_metodicheskie_ukazaniya_v_oblasti_aktivnogo.html.
5. Zhukov V. B., Shchukin G. G., An example of observing a mesocyclone using a meteorological multi-parameter radar, *7-e Vserossiyskie Armandovskie chteniya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i diffraksii voln": sbornik statei* (Proc. 7th All-Russia Armandov Readings "Current Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction"), 2017, pp. 191–196 (in Russian).
6. Novitskiy M. A., Pavlyukov Yu. B., Shmerlin B. Ya. et al., The tornado in Bashkortostan: The potential of analyzing and forecasting tornado-risk conditions, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, V. 41, No. 10, pp. 683–690, DOI: 10.3103/S1068373916100034.
7. Popov V. B., Sinkevich A. A., Mikhailovskii Y. P. et al., Characteristics and structure of the cumulonimbus cloud with waterspout over the gulf of Finland, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, V. 45, No. 9, pp. 607–614, DOI: 10.3103/S1068373920090010.
8. Chernokulsky A. V., Shikhov A. N., Azhigov I. O. et al., Squalls and tornadoes over the European territory of Russia on May 15, 2021: Diagnosis and modeling, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, V. 47, No. 11, pp. 867–881, DOI: 10.3103/s1068373922110073.
9. *Atmospheric convection: Research and operational forecasting aspects*, Giaioti D. B., Steinacker R., Stel F. (eds.), Wien, Italy: Springer, 2007, 227 p., DOI: 10.1007/978-3-211-69291-2.
10. Brotzge J. A., Nelson S. E., Thompson R. L., Smith B. T., Tornado probability of detection and lead time as a function of convective mode and environmental parameters, *Weather and Forecasting*, 2013, V. 28, No. 5, pp. 1261–1276, DOI: 10.1175/WAF-D-12-00119.1.
11. Browning K., Some inferences about the updraft within a severe local storm, *J. Atmospheric Sciences*, 1965, V. 22, No. 6, pp. 669–677, DOI: 10.1175/1520-0469(1965)022<0669:SIATUW>2.0.CO;2.
12. Bunkers M. J., Klimowski B. A., Zeitler J. W. et al., Predicting supercell motion using a new hodograph technique, *Weather and Forecasting*, 2000, V. 15, No. 1, pp. 61–79, DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0061:PSMUAN>2.0.CO;2.
13. Bunkers M. J., Wilson M. B., Van Den Broeke M. S., Healey D. J., Scan-by-scan storm-motion deviations for concurrent tornadic and nontornadic supercells, *Weather and Forecasting*, 2022, V. 37, No. 5, pp. 749–770, DOI: 10.1175/WAF-D-21-0153.1.

14. Doswell C. A., III, Burgess D. W., Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models, In: *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards*, Washington D. C.: American Geophysical Union, 1993, pp. 161–172, DOI: 10.1029/GM079p0161.
15. Duda J. D., Gallus W. A., Jr., Spring and summer midwestern severe weather reports in supercells compared to other morphologies, *Weather and Forecasting*, 2010, V. 25, No. 1, pp. 190–206, DOI: 10.1175/2009WAF2222338.1.
16. Elizaga F., Conejo S., Martin F., Automatic identification of mesocyclones and significant wind structures in Doppler radar images, *Atmospheric Research*, 2007, V. 83, No. 2–4, pp. 405–414, DOI: 10.1016/j.atmosres.2005.10.023.
17. Falk K. W., *Techniques for issuing severe thunderstorm and tornado warnings with the WSR-88D Doppler radar*, 1997, 44 p.
18. Forbes G. S., On the reliability of hook echoes as tornado indicators, *Monthly Weather Review*, 1981, V. 109, No. 7, pp. 1457–1466, DOI: 10.1175/1520-0493(1981)109<1457:OTROHE>2.0.CO;2.
19. Groot E., Tost H., Divergent convective outflow in large-eddy simulations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, V. 23, No. 11, pp. 6065–6081, DOI: 10.5194/acp-23-6065-2023.
20. Heinselman P., LaDue D., Kingfield D., Hoffman R., Tornado warning using phased-array radar data, *Weather and Forecasting*, 2015, V. 30, pp. 57–78, DOI: 10.1175/WAF-D-14-00042.1.
21. Hengstebeck T., Wapler K., Heizenreder D., Joe P., Network radar-based detection of mesocyclones at the German Meteorological Service, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, V. 35, No. 2, pp. 299–321, DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0230.1.
22. Homeyer C. R., Murillo E. M., Kumjian M., Relationships between 10 years of radar-observed supercell characteristics and hail potential, *Monthly Weather Review*, 2023, V. 151, No. 10, pp. 2609–2632, DOI: 10.1175/MWR-D-23-0019.1.
23. House D. C., Air mass modification and upper-level divergence, *Bull. American Meteorological Soc.*, 1958, V. 39, No. 3, pp. 137–143, DOI: 10.1175/1520-0477-39.3.137.
24. Houze R. A., Jr., Rutledge S. A., Biggerstaff M. I., Smull B. F., Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems, *Bull. American Meteorological Soc.*, 1989, V. 70, No. 6, pp. 608–619, DOI: 10.1175/1520-0477(1989)070<0608:IODWRD>2.0.CO;2.
25. Kamani M. M., Farhat F., Wistar S., Wang J. Z., Shape matching using skeleton context for automated bow echo detection, *2016 IEEE Intern. Conf. on Big Data*, Washington, DC, USA, 2016, pp. 901–908, DOI: 10.1109/BigData.2016.7840685.
26. Kumjian M. R., Schenkman A. D., Interpretation of the “Flying Eagle” Radar Signature in supercells, *24th Conf. on Severe Local Storms*, Savannah, Georgia, USA, 2008, 7 p.
27. Lakshmanan V., Using a genetic algorithm to tune a bounded weak echo region detection algorithm, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2000, V. 39, pp. 222–230, DOI: 10.1175/1520-0450(2000)039<0222:UAGATT>2.0.CO;2.
28. Lemon L. R., Wake vortex structure and aerodynamic origin in severe thunderstorms, *J. Atmospheric Science*, 1976, V. 33, pp. 678–685, DOI: 10.1175/1520-0469(1976)033<0678:WVSAAO>2.0.CO;2.
29. Lemon L. R., *New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report*, 1977, 64 p.
30. Lemon L. R., The radar “three-body scatter spike”: An operational large-hail signature, *Weather and Forecasting*, 1998, V. 13, No. 2, pp. 327–340, DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0327:TRTBSS>2.0.CO;2.
31. Lemon L. R., Doswell C. A., III, Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis, *Monthly Weather Review*, 1979, V. 107, No. 9, pp. 1184–1197, DOI: 10.1175/1520-0493(1979)107<1184:STEAMS>2.0.CO;2.
32. Mahale V. N., Zhang G., Xue M., Fuzzy logic classification of S-band polarimetric radar echoes to identify three-body scattering and improve data quality, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2014, V. 53, No. 8, pp. 2017–2033, DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0358.1.
33. Markowski P. M., Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review, *Monthly Weather Review*, 2002, V. 130, No. 4, pp. 852–876, DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<0852:HEARFD>2.0.CO;2.
34. Marwitz J. D., The structure and motion of severe hailstorms. Pt. I: Supercell storms, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 1972, V. 11, No. 1, pp. 166–179, DOI: 10.1175/1520-0450(1972)011<0166:TSAMOS>2.0.CO;2.
35. Meng L., Sang Y., Tang J., Automatic identification of three-body scatter spike based on Jensen–Shannon divergence and support vector machine, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2024, V. 63, No. 9, pp. 981–996, DOI: 10.1175/JAMC-D-24-0024.1.
36. Mounier A., Raynaud L., Rottner L. et al., Detection of bow echoes in kilometer-scale forecasts using a convolutional neural network, *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2022, V. 1, No. 2, 20 p., DOI: 10.1175/AIES-D-21-0010.1.

37. Pal N. R., Mandal K., Pal S. et al., Fuzzy rule-based approach for detection of bounded weak-echo regions in radar images, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2006, V. 45, No. 9, pp. 1304–1312, DOI: 10.1175/JAM2408.1.
38. Pilorz W., Lupikasza E., Radar reflectivity signatures and possible lead times of warnings for very large hail in Poland based on data from 2007–2015, *Environmental and Socio-economic Studies*, 2020, V. 8, No. 3, pp. 34–47, DOI: 10.2478/environ-2020-0016.
39. Rotunno R., Klemp J. B., On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms, *J. Atmospheric Sciences*, 1985, V. 42, No. 3, pp. 271–292, DOI: 10.1175/1520-0469(1985)042<0271:OTRAPO>2.0.CO;2.
40. Sassa K., Yamawaki M., Tanase H., Kubo T., Honda R., Automatic detection of hook echo by deep learning, *Japan Geoscience Union Meeting 2022*, 2022, <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2022/subject/MGI35-02/detail>.
41. Shi J., Ping W., Wang D., Jia H., Radar-based automatic identification and quantification of weak echo regions for hail nowcasting, *Atmosphere*, 2019, V. 10, No. 6, 21 p., DOI: 10.3390/atmos10060325.
42. Stout G. E., Huff F. A., Radar records Illinois tornadogenesis, *Bull. American Meteorological Soc.*, 1953, V. 34, No. 6, pp. 281–284, DOI: 10.1175/1520-0477-34.6.281.
43. Stumpf G. J., Witt A., Mitchell D. E. et al., The national severe storms laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D, *Weather and Forecasting*, 1998, V. 13, No. 2, pp. 304–326, DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0304:TNSSLM>2.0.CO;2.
44. Wakimoto R. M., Convectively driven high wind events, In: *Severe Convective Storms*, Boston: American Meteorological Soc., 2001, pp. 255–298, DOI: 10.1175/0065-9401-28.50.255.
45. Wang H., Mercer R. E., Barron J., Joe P., Skeleton based hook echo detection, *Proc. 2007 IEEE Intern. Conf. on Image Processing, ICIP 2007*, San Antonio, Texas, USA, 2007, P. VI-361–VI-364, DOI: 10.1109/ICIP.2007.4379596.
46. Weisman M. L., Bow echoes: A tribute to T. T. Fujita, *Bull. American Meteorological Soc.*, 2001, V. 82, No. 1, pp. 97–116, DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<0097:BEATTT>2.3.CO;2.
47. Weisman M. L., Mesoscale meteorology. Convective storms: Overview, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, New York: Academic Press, 2015, pp. 401–404, DOI: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00490-4.
48. Wheatley D. M., Trapp R. J., Atkins N. T., Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX, *Monthly Weather Review*, 2006, V. 134, No. 3, pp. 791–806, DOI: 10.1175/MWR3100.1.
49. Zeng F., Hou J., Automatic detection of bow echoes from weather radar images, *13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2018, pp. 503–508, DOI: 10.1109/WCICA.2018.8630468.
50. Ziegler C. L., Lee T. J., Pielke R. A., Sr., Convective initiation at the dryline: A modeling study, *Monthly Weather Review*, 1997, V. 125, No. 6, pp. 1001–1026, DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<1001:CIATDA>2.0.CO;2.