

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-33-51>

УДК 551.501.81 (571.1)

## **Оценка информативности радиолокационных данных при анализе фронтальной кучево-дождевой облачности в Западной Сибири**

***В.П. Горбатенко, Л.И. Кижнер,  
Х.Т. Апостолиди, А.А. Карпова***

*Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
vpgor@tpu.ru, kdm@mail.tsu.ru*

Целью исследований является выбор набора радиолокационных параметров, характеризующих фронтальную кучево-дождевую облачность во время регистрации гроз и града метеорологическими станциями в районе Новосибирска. За период с 2021 по 2023 год проанализированы 1883 случая с грозой и 67 с градом. Рассчитаны статистические характеристики радиолокационных параметров облачности для случаев с грозой и случаев с грозой с градом. Показано их различие и рассчитаны пороговые значения по данным ДМРЛ-С Новосибирск. В число рассмотренных параметров включены, кроме уже зарекомендованных на практике идентификации конвективных явлений, такие параметры, как турбулентность и вертикально интегрированная водность.

*Ключевые слова:* Западная Сибирь, гроза, град, ДМРЛ-С, радиолокационные характеристики, пороговые значения, метеорологические наблюдения

## **Evaluation of the information content of radar data in the analysis of frontal cumulonimbus clouds in Western Siberia**

***V.P. Gorbatenko, L.I. Kizhner, C.T. Apostolidi, A.A. Karpova***

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia  
vpgor@tpu.ru, kdm@mail.tsu.ru*

The objective of the study was to select a set of radar parameters characterizing frontal cumulonimbus clouds during thunderstorms and hail events registered by meteorological stations in the Novosibirsk region. In total, 1883 thunderstorms and 67 hail events were analyzed from 2021 to 2023. Statistical characteristics of cloud radar parameters for thunderstorms and thunderstorms with hail were calculated. Differences between these parameters were demonstrated, and threshold values were calculated based on DMRL-C Novosibirsk data. In addition to the parameters already proven in practice for identifying convective phenomena, the examined parameters included turbulence and vertically integrated liquid water content.

*Keywords:* Western Siberia, thunderstorm, hail, DMRL-C, radar characteristics, threshold values, meteorological observations

## Введение

Потепление климата повлияло не только на изменение средних величин температуры воздуха и количества выпавших осадков, но и на резкое увеличение частоты многих экстремальных погодных явлений [22]. Среди увеличивающегося многообразия неблагоприятных метеорологических явлений наиболее разрушительными являются те, которые формируются в процессе развития мощной конвекции: град, шквалы, смерчи, интенсивные грозы, сильные ливни [24]. Поэтому исследование особенностей их формирования при разных синоптических условиях и в разных регионах с целью повышения качества их диагноза и своевременного прогноза имеет большое практическое значение.

Актуально повышение качества прогноза града и потому, что число случаев его выпадения в умеренных широтах Западной Сибири в последнее десятилетие увеличилось в 3–5 раз [8]. Конвективные облачные системы, в которых образуется град, становятся все более обширными по площади, а мощные конвективные ячейки, продуцирующие развитие гроз и более частое выпадение града, стали формироваться значительно чаще, чем до потепления климата Западной Сибири.

Для помощи в решении таких проблем в России с 2012 года начато формирование сети современных метеорологических радиолокаторов отечественного производства ДМРЛ-С [11], задачами которой является, в частности, идентификация явлений погоды, в том числе опасных явлений, получение сумм выпавших осадков и построение объединенных карт этих и других продуктов. Для успешного решения запланированных задач очень важна валидация радиолокационных наблюдений по данным независимых метеорологических наблюдений, таких как наблюдения за явлениями погоды на метеостанциях, регистрация времени и координат молниевых разрядов современными сетями грозопеленгаторов, самолетных наблюдений и др.

Для повышения качества краткосрочного и текущего прогнозирования (уточнение локализации и интенсивности) мощных конвективных штормов и связанных с ними опасных явлений [13] необходимо выбрать предикторы, являющиеся важными для диагноза и прогноза конвективных явлений (вторичных радиолокационных продуктов в виде трехмерной модели облачной атмосферы), которые получают в результате компьютерной обработки первичных радиолокационных продуктов [15, 21]. Успешность применения разработанного алгоритма на практике оценивается по результатам оперативных независимых испытаний. Такие исследования актуальны для всех регионов, где размещаются ДМРЛ-С, поскольку характеристики грозовой и градовой облачности в разных физико-географических регионах могут существенно различаться. Для более эффективного использования радиолокационных параметров в прогнозе опасных конвективных явлений погоды необходимо уточнение пороговых значений физических характеристик облачности. Такая корректировка особенно необходима для регионов, где зафиксировано изменение климата.

Оценка повторяемости конвективных явлений на территории Западной Сибири сегодня – особенно трудная задача, поскольку для таких явлений характерна локальность формирования как по территории, так и во времени. Сеть метеорологических наблюдений для обнаружения таких явлений в Западной Сибири редка. Здесь функционируют около 120 метеорологических станций, расстояние между которыми составляет от 100 до 500 км в южной части региона до значений около 1000 км на севере. Трудности определения параметров облачности при наличии грозовых и градовых процессов над Западной Сибирью обусловлены не только редкой сетью метеорологических станций, но и отсутствием сети метеорологических радиолокаторов. Появившиеся спутники системы Арктика-М также являются перспективой при решении диагностирования и прогноза конвективных явлений погоды на территории Западной Сибири.

В настоящее время есть надежда на достоверную диагностику грозовых и градовых облаков по данным единственного в регионе радиолокатора ДМРЛ-С, который установлен в районе г. Новосибирска, и на создание сети таких радиолокаторов на территории Западной Сибири.

Современные метеорологические радиолокаторы, созданные в России, обладают уникальными возможностями – оперативностью, способностью охватывать большие территории, давать детальную информацию о внутренней структуре зон облачности и осадков [19]. Современная радиолокационная метеорологическая информация широко используется для сверхкраткосрочного прогноза погоды (наукастинга) [5, 7, 19], в том числе для предупреждения об опасных явлениях: ливнях, грозах, граде, шквалах, смерчах.

Радиолокационные измерения ряда параметров облачности с высокой частотой обновления информации позволяют отслеживать скорость развития конвективной облачности и фиксировать процессы формирования ливневых осадков, гроз и града. Использование для конкретных регионов уточненных пороговых значений параметров грозовой и градовой облачности по данным ДМРЛ-С позволит повысить точность прогноза таких явлений, а также может быть учтено при разработке и совершенствовании системы наукастинга таких явлений для территории Западной Сибири.

Создаваемая в России сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ-С) предназначена для проведения непрерывных наблюдений в составе радиолокационной сети Росгидромета по единому регламенту с использованием единого программного обеспечения [2].

**Целью** настоящего исследования является выбор и определение значений радиолокационных параметров фронтальной кучево-дождевой облачности по информации ДМРЛ-С во время регистрации гроз и града метеорологическими станциями, расположенными в радиусе 200 км от радиолокатора, установленного в районе Новосибирска.

Известно, что радиолокационная отражаемость облачности зависит от турбулентности, водности облаков, размеров облачных частиц и их

фазового строения [7]. Различия в этих характеристиках и являются причиной того, что облака, относящиеся к одному типу, могут в одних случаях обнаруживаться, а в других – не обнаруживаться радиолокаторами. Поэтому актуальным является исследование возможности дополнительно использовать значения вертикально интегрированной водности атмосферы и турбулентности, как потенциальных предикторов уточнения идентификации гроз и града разной интенсивности и разных условий их формирования.

Град на территории Западной Сибири – явление очень локальное и кратковременное, его средняя продолжительность составляет около 5 минут [8]. В том случае, если град выпадает в районе, где нет метеостанций, а значит и информация о его выпадении в метеорологических сводках отсутствует, его диагноз с помощью ДМРЛ-С и уточнение в случае необходимости прогноза является актуальным и востребованным, поскольку на фоне наблюдающегося потепления климата Западной Сибири это важно для избегания экономических потерь в ряде отраслей экономики.

В последние годы конвективные облачные системы, в которых образуется град, становятся все более обширными по площади, а мощные конвективные ячейки, продуцирующие развитие гроз и более частое выпадение града, стали формироваться значительно чаще, чем до потепления климата Западной Сибири. Например, в анализируемой базе данных ДМРЛ-С за 06.07.2021 в течение суток на большей части метеорологических станций, расположенных в радиусе 200 км от радиолокатора, регистрировались грозы, конвективная облачность которых фиксировалась в 50 конвективных ячейках.

### Методы исследования

В работе использованы методы радиолокационных и метеорологических наблюдений, метод сравнения, статистический метод.

Анализировались данные наблюдений ДМРЛ-С, расположенного в районе Новосибирска, и 37 метеорологических станций в радиусе 200 км от него за период с 2021 по 2023 год. Проводилось сопоставление радиолокационных данных и информации о времени зарегистрированных в радиусе 10 км от метеостанций гроз и града, что считается достоверной информацией [19].

Поскольку грозы обычно подразделяются на два основных типа: фронтальные и внутримассовые, возникающие вдали от фронтальных зон и обусловленные особенностями местных воздушных масс, некоторые из радиолокационных параметров этих двух типов могут различаться.

Максимальная повторяемость града в исследуемом районе отмечена на холодных фронтах и фронтах окклюзии, поэтому в рамках настоящего исследования радиолокационные параметры конвективной облачности, из которой зарегистрировано выпадение града, анализировались и сравнивались с параметрами грозовой облачности, тоже образовавшейся

на холодных фронтах и фронтах окклюзии, а также и для случаев гроз без града. Такое сравнение необходимо для повышения качества прогноза и для определения вероятности развития гроз или гроз с градом.

Радиолокационный метод идентификации гроз и града, согласно Программному обеспечению вторичной обработки информации «ГИМЕТ-2010», является вероятностным [15], поэтому актуально и в рамках исследования сравнить совпадение данных ДМРЛ-С с информацией метеорологических станций, расположенных в зоне действия радиолокатора, как принято для верификации работы отдельных локаторов при их оперативной работе.

При оперативной работе сети ДМРЛ-С в критериях идентификации как града, так и грозы, в первую очередь используются значения высоты верхней границы облачности и вертикальный профиль радиолокационных отражаемостей [1], а именно их значения на специальных уровнях (высоте нулевой изотермы и на уровне интенсивной кристаллизации, т. е. на уровне изотермы  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , превышающей, как правило, уровень нулевой изотермы на 2–2,5 км). Большое значение для диагноза развития конвективных явлений имеет и максимальное значение радиолокационной отражаемости в столбе атмосферы [15].

Таким образом, в исследовании данных ДМРЛ-С анализировалась кучево-дождевая облачность на холодных фронтах и фронтах окклюзии, с которой связано образование гроз и гроз с градом, только для случаев, когда метеостанции в контрольном круге радиусом 200 км от радиолокатора фиксировали грозы или грозы с градом.

Для сравнения параметров конвективной облачности с грозой и градом, зарегистрированными метеорологическими станциями, анализировались следующие радиолокационные параметры ДМРЛ-С:

1. Высота верхней границы облачности (ВВГО, км) регистрируемая и радиолокаторами, и метеорологическими спутниками, поскольку эта информация позволяет прогнозировать вероятность развития конвективных явлений и их интенсивность.

2. Максимальная радиолокационная отражаемость ( $Z_{\max}$ , dBZ) в анализируемом столбе атмосферы является интегральной характеристикой конвективной ячейки и может быть использована как для диагноза состояния, так и для прогноза развития мощной конвекции, формирующей молнии и град. Детализация пороговых значений  $Z_{\max}$ , используемых в диагнозе и прогнозе вероятности образования разных конвективных явлений над Западной Сибирью, является актуальной задачей.

3. Значения радиолокационной отражаемости ( $Z$ , dBZ) на уровнях с температурой  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $Z_{0\text{ }^{\circ}\text{C}}$ , dBZ) и  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $Z_{-15\text{ }^{\circ}\text{C}}$ , dBZ) благодаря тому, что эти параметры важны для диагноза и прогноза грозовой и градовой облачности в конвективных ячейках.

4. Турбулентность атмосферы (Турб.,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ), определяющая скорость диссипации турбулентной энергии, рассчитывается при наличии

измеренной радиолокационной отражаемости анализируемой ячейки и ширине доплеровского спектра. Данная радиолокационная характеристика в настоящем исследовании проходит экспериментальную апробацию, как и при оперативной работе локаторов. Турбулентность атмосферы в разных регионах может сильно различаться, поэтому анализ турбулентности актуален [25].

5. Интегральная водность конвективных облаков в процессе образования в них гроз и града ( $VIL$ ,  $кг/м^2$ ). Величина  $VIL$  может быть хорошим индикатором для идентификации формирования гроз и града [15, 19]. Исследования возможности использования параметра  $VIL$  в качестве предиктора явлений «град слабый» – «град сильный» продолжаются [15]. Такие исследования актуальны и для Западной Сибири, поскольку в последнее десятилетие увеличилось число случаев выпадения града в 3–5 раз [8], а повторяемость градин диаметром более 10 мм в рассматриваемый период и в период 2015–2019 гг. составила 10 % [9].

## Результаты

Каждая анализируемая на карте ДМРЛ-С в рамках исследования точка характеризует фронтальную облачность с грозой и грозой с градом, зарегистрированную одной метеостанцией.

За период исследования в выборке с 2021 по 2023 год количество фронтальных гроз, соответствующих заданным критериям отбора, составило 1883 случая, а случаев града различного диаметра – 67.

Проверка точности диагностики грозовой и градовой облачности над Западной Сибирью непосредственно для ДМРЛ-С Новосибирск ранее не исследовалась, поэтому предлагаемые результаты весьма актуальны.

Анализ результатов сопоставления радиолокационных и наземных случаев регистрации гроз и града продемонстрировал достаточно высокий уровень согласования данных о наличии анализируемых явлений погоды. Несовпадение составило около 16 %. Следовательно, полученные для Западной Сибири результаты соответствуют оценке «хорошо» [19].

В табл. 1 приведены статистические характеристики всех перечисленных выше радиолокационных параметров фронтальной конвективной облачности, в которой были зарегистрированы грозы и град над Западной Сибирью метеорологическими станциями, расположенными в радиусе 200 км от радиолокатора. Есть основания полагать, что сравнение параметров фронтальной и грозовой облачности разного масштаба и разного синоптического происхождения позволит улучшить качество их прогноза и вероятности развития при уточнении пороговых значений радиолокационных параметров. Вероятность формирования гроз и града даже при наличии одинаковых пороговых значений может отличаться на территориях с разным климатом и при разных синоптических ситуациях, поэтому сопоставление результатов регистрации гроз метеостанциями и радиолокатором дает информацию о надежности регистрации явлений,

а статистические характеристики всех перечисленных выше радиолокационных параметров фронтальной конвективной облачности позволяют определить вероятность развития анализируемых явлений.

**Таблица 1.** Радиолокационные параметры фронтальной облачности

**Table 1.** Radar parameters of frontal clouds

Статистика	ВВГО, км	VIL, кг/м <sup>2</sup>	Z 0°C, dBZ	Z-15°C, dBZ	Турб., см <sup>2</sup> /с	Z <sub>max</sub> , dBZ
Грозовая облачность						
Среднее	11,0	8,5	43	36	12	43
Медиана	11,0	7	43	35	10	43
Стандартное отклонение	2,0	7	8	10	23	8
Облачность с грозой и градом						
Среднее	11,7	11,7	45	41	9	45
Медиана	12,0	8	50	45	10	50
Стандартное отклонение	2,0	8	9	10	17	9

Известно, что первым, реагирующим на развитие и эволюцию конвективных облаков, параметром облака является ВВГО [20].

Для территории Западной Сибири средние значения ВВГО грозовой и грозовой с градом облачности составляют 11,0 и 11,7 км, медианы – 11,0 и 12,0 км соответственно.

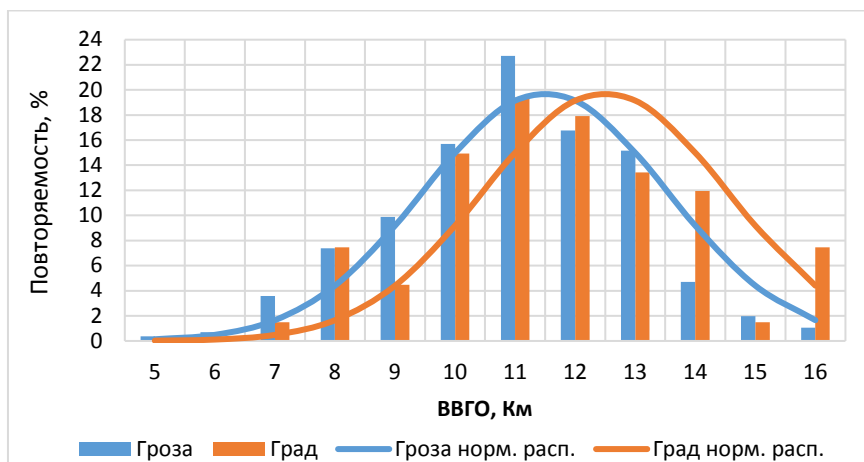
Сравнения со значениями ВВГО конвективной облачности с рассматриваемыми явлениями, регистрируемой радиолокаторами в других регионах, свидетельствует о высоких значениях параметра для Западной Сибири: наибольшее значение медианы этого параметра в Индии составляет 13,5 км, для Северного Кавказа – 10,7 км, для северо-западной части России – 9,5 км [20].

На рис. 1 дана гистограмма распределения ВВГО для случаев с грозой и с грозой, сопровождающейся градом, в сравнении с нормальным распределением характеристик.

Из рисунка видно, что наибольшая повторяемость верхней границы кучево-дождевой облачности с такими явлениями приходится на высоты 10–12 км.

Отметим, что типичной для умеренных широт высотой развития конвективной облачности считается высота 7–10 км, а все значения свыше этого считаются редко встречаемыми [6, 18]. Например, радиолокационные характеристики верхних границ грозовой облачности с вероятностью более 80 % на территории Уральского Прикамья [17] в период 1998–2002 гг. составили 10 км, а градовой 11,6 км. В результате настоящих исследований получено, что аналогичные высоты соответствуют 50 %

анализируемых явлений (табл. 2). Кроме того, результаты исследования аэрологических значений высоты верхних границ грозовой градовой облачности [9] в период 2015–2019 гг. иногда достигали 200 гПа (11,5–12 км).



**Рис. 1.** Повторяемость (%) ВВГО фронтальной грозовой и градовой облачности над Западной Сибирью за период с 2021 по 2023 г.

**Fig. 1.** Frequency (%) of VVGO frontal thunderstorm and hail clouds over Western Siberia for the period from 2021 to 2023.

**Таблица 2.** Пороговые значения ВВГО возникновения фронтальных гроз и града для территории Западной Сибири

**Table 2.** Threshold values VVGO for the occurrence of frontal thunderstorms and hail for the territory of Western Siberia

Вероятность		50 %	70 %	80 %	90 %
Высота верхней границы облаков, км	С грозой	10,5	11,5	12,3	12,8
	С градом	11,2	12,4	13,1	13,9

При этом в собранном нами массиве данных случаев с высотой верхней границы грозовой облачности выше 10 км насчитывается 63 %, для облачности с градом – 72 %. Можно сказать, что есть тенденция к повышению отметки высоты верхней границы облачности и увеличению мощности вертикального развития конвективных облаков над территорией Западной Сибири. В случаях выпадения града 8 % конвективных ячеек достигали высоты верхней границы облачности 15–16 км, для грозовой облачности такой высоты достиг только 1 % ячеек (рис. 1). Возможно, это связано с активными конвективными процессами, которые сопровождались не только градом, но и шквалами, хотя на территории Уральского Прикамья [14] при наличии шквалов высота верхней границы облачности не была выше. При этом в период исследования радиолокационных

параметров высоты верхней границы облачности при шквалах над Западной Сибирью (в районе г. Томска) до 2004 г. [4] было получено, что она составляет 10–12 км. По результатам анализа спутниковой информации максимальные значения высоты верхней границы облаков в дни с выпадением града наблюдаются в июле и составляют примерно 12 км [18], а по данным аэрологического зондирования атмосферы  $H_{\max}$  находилась в этих же пределах [8, 10, 14].

Средние значения и медианы высоты верхней границы фронтальной грозовой облачности и облачности с грозой и градом в Западной Сибири за летний период в разные месяцы немного различаются (в среднем, на 0,5–1,0 км) и достигают максимальных высот в июле. Максимальные высоты верхних границ облачности при фронтальной грозе достигали в июле 15 км.

Минимальные высоты верхней границы для грозовой и грозовой с градом облачности совпадают и составляют 7 км. В 20 % случаев высота верхней границы грозовых облаков достигает 9 км, грозовых с градом в 27 % случаев – 10 км. Эта же характеристика в 20 % случаев с грозой превышает 12 км, в то время как при градовых процессах составляет выше 13 км. Отметим, что результаты измерения ВВГО ДМРЛ-С достаточно хорошо согласуются с результатами регистрации высоты градовой облачности с метеорологических спутников [10, 26].

Рассчитанные высоты (ВВГО) для грозовых и грозовых облаков с градом на холодных фронтах и фронтах окклюзии для Западной Сибири сопоставимы с высотами аналогичной облачности для Северного Кавказа [20]. На территории Уральского Прикамья радиолокатор ДМРЛ-С регистрирует град в конвективных ячейках тоже с ВВГО выше 10 км [14].

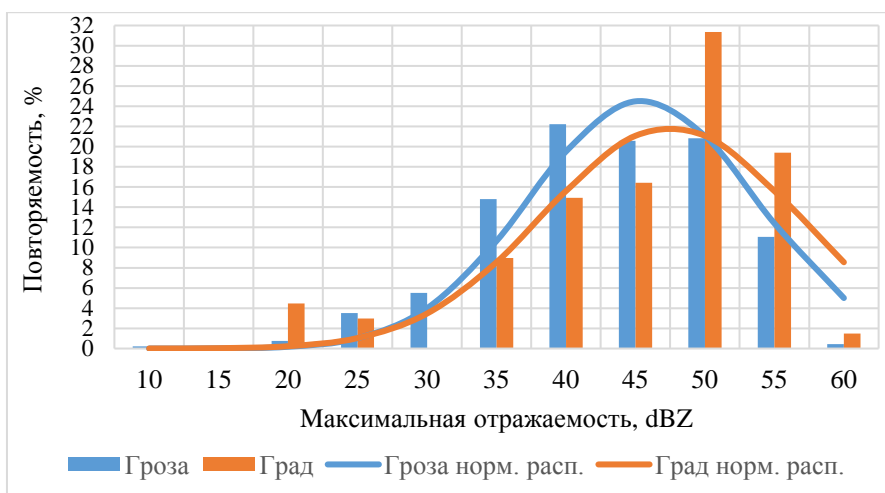
При сравнении высоты верхней границы градовых облаков с высотой тропопаузы выявлено, что если размер выпавших градин более 10 мм, то верхняя граница радиоэха облачности в июне и июле достигает высот 15–16 км. При этом верхняя граница тропопаузы, определенная по данным аэрологического зондирования, не превышает высоту 12 км. Если же размер градин менее 10 мм, то высота тропопаузы примерно совпадает с высотой верхней границы радиоэха градовой облачности, а если и превышает, то не более чем на 0,5 км.

На территории Уральского Прикамья градовые облака располагаются на 0,5–2,0 км выше уровня тропопаузы, а в среднем превышение составляет 0,7 км [14], что несколько выше, чем над территорией Западной Сибири.

Можно сделать вывод, что в случае формирования градовых процессов в июне и июле на холодных фронтах и фронтах окклюзии в Западной Сибири при выпадении града размером 10 мм и более, т. е. который может нанести ущерб, по данным ДМРЛ-С наблюдаются Сб высотой 15–16 км, пробивающие тропопаузу на значительную величину (~ 3 км), тогда как при грозах без града облака лишь достигают тропопаузы, либо превышают ее незначительно (не более 0,5 км).

Повторяемость максимальной радиолокационной отражаемости  $Z_{\max}$  (60 % всех случаев) для фронтальной грозовой деятельности приходится на диапазон 35–45 dBZ, для града – 66 % случаев приходится на диапазон 45–55 dBZ (рис. 2). Повторяемость максимальных и минимальных значений этой характеристики для грозовых фронтальных облаков составляет 11 и 1 %, для градовых облаков – 19 и 4 % соответственно.

Наибольшее значение максимальной отражаемости для фронтальной грозовой и градовой облачности Западной Сибири составляет 60 dBZ, наименьшее составило 20 и 25 dBZ соответственно.



**Рис. 2.** Повторяемость (%) максимальной отражаемости  $Z_{\max}$  фронтальной грозовой и градовой облачности над Западной Сибирью за период с 2021 по 2023 г.

**Fig. 2.** Frequency (%) of maximum reflectivity  $Z_{\max}$  of frontal thunderstorm and hail clouds over Western Siberia for the period from 2021 to 2023.

Сравнение рассчитанных для Западной Сибири значений  $Z_{\max}$  с другими регионами мира показало следующее:  $Z_{\max}$  конвективной облачности как с грозой, так и с градом в Западной Сибири оказалась выше, чем в Индии, но немного ниже, чем на Северном Кавказе, северо-западной части России и на территории Уральского Прикамья, что связано, по-видимому, с условиями формирования крупных ледяных частиц в облаке [14, 20]. Причем, максимальная отражаемость для конвективных облаков Северо-Запада Российской Федерации оказалась наибольшей в момент появления первых разрядов молнии, что объясняется увеличением отражаемости в зоне таяния ледяных частиц.

Среднее значение максимальной радиолокационной отражаемости имеет пик в июле – 44 dBZ. Максимальная отражаемость в градовых облаках выше, чем в грозовых, только на 1–2 dBZ.

Среднее значение максимальной радиолокационной отражаемости для грозовой конвективной облачности, например, на территории Индии,

Северного Кавказа, северо-западной части России составляет 44, 49 и 51 dBZ соответственно [20], на территории Уральского Прикамья – 55 dBZ [14].

Пороговые значения максимальной отражаемости ДМРЛ-С (табл. 3) для вероятностей образования гроз и для возникновения гроз с градом более 70 % различаются несущественно. Однако при вероятности развития этих явлений в 50 % пороговые значения  $Z_{\max}$  различаются больше. Есть основания предполагать, что актуальным для улучшения качества прогноза гроз и града, формирующихся в разного рода мезомасштабных конвективных ячейках, является сравнение величин  $Z_{\max}$ .

**Таблица 3.** Пороговые значения максимальной радиолокационной отражаемости возникновения фронтальных гроз и града для территории Западной Сибири

**Table 3.** Threshold values of maximum radar reflectivity for the occurrence of frontal thunderstorms and hail for the territory of Western Siberia

Вероятность		50 %	70 %	80 %	90 %
$Z_{\max}$ в облаках, dBZ	С грозой	41	46	48	51
	С градом	46	48	51	53

Радиолокационная отражаемость на уровне изотермы 0 °C для грозовых и градовых облаков совпадает, а вот *средняя отражаемость на высоте изотермы -15 °C* у градовых облаков составляет 41 dBZ, у грозовых облаков 36 dBZ. Радиолокационная отражаемость на уровне изотермы 0 °C имеет максимум так же, как ВВГО, в июле – 44 dBZ, а на уровне изотермы -15 °C не имеет выраженных значений максимума и минимума и составляет 36 dBZ.

Можно заметить, что в обоих случаях радиолокационная отражаемость на уровне изотермы 0 °C выше, чем на уровне изотермы -15 °C. По-видимому, этот факт можно объяснить тем, что максимум отражаемости фиксируется в зоне таяния, где кристаллические частицы покрываются водяной пленкой, что приводит к увеличению отражаемости за счет изменения диэлектрических свойств рассеивающих частиц [20].

Кроме выбора радиолокационных параметров грозовой и градовой облачности, расчета их статистических характеристик, задачей исследований являлось уточнение их пороговых значений над территорией Западной Сибири. Уточнение пороговых значений параметров облачности может способствовать уточнению идентификации гроз и гроз с градом по данным ДМРЛ-С, а также учитываться при прогнозе таких явлений в оперативной работе синоптиков.

Для определения пороговых значений радиолокационных параметров (высота верхней границы облачности, максимальная радиолокационная отражаемость, водность) при возникновении опасных явлений были построены гистограммы накопленных частот, которые позволяют выявить

вероятность возникновения грозовой и градовой деятельности при тех или иных значениях величин. Значимыми вероятностями, которые часто используются при анализе, являются 50, 70, 80, 90 %. Значения радиолокационных характеристик, которые имеют вышеуказанную вероятность, рассчитаны для грозовой и градовой облачности на фронтах и приведены в табл. 2 и 3.

Как видно из табл. 2 и 3, для возникновения кучево-дождевых облаков с градом высота верхней границы фронтальной облачности должна быть выше в среднем на 1 км, чем при возникновении фронтальных гроз. Так, фронтальным облакам с градом в 90 % случаев соответствует ВВГО не менее 13,9 км, а фронтальной грозе в 90 % соответствует ВВГО не менее 12,8 км. Значения высоты верхней границы облачности (табл. 2) для возникновения гроз и града, рассчитанные по данным ДМРЛ-С для Западной Сибири, оказались значительно выше, чем измеренные МРЛ-5 для Уральского региона и Прикамья [14]. Возможно, причиной таких различий является изменение климата за последнее двадцатилетие.

Для возможности повышения точности прогноза фронтальной грозовой и градовой облачности в Западной Сибири особый интерес представляют радиолокационные *параметры турбулентности и водности*. Следует заметить, что ДМРЛ-С может определить турбулентность только в облачном слое [15]. Поэтому данный параметр был рассмотрен для случаев возникновения турбулентности при наличии грозовых и градовых облаков над Западной Сибирью.

В анализируемой продукции ДМРЛ-С турбулентность представляет собой оценку скорости диссипации турбулентной энергии на основе измерений ширины спектра, радиолокационной отражаемости и рассчитанных сдвигов ветра [15]. Турбулентность в данном случае демонстрирует скорость развития кучево-дождевого облака. В базе данных ДМРЛ-С Новосибирск эта величина является самой вариативной. Интенсивность турбулентности делится на четыре категории: слабая, умеренная, сильная, чрезвычайная. Для территории Западной Сибири по результатам информации ДМРЛ-С выделено три степени развития турбулентности: слабая ( $1 \text{ см}^2/\text{с}$ ), умеренная ( $10 \text{ см}^2/\text{с}$ ) и сильная ( $100 \text{ см}^2/\text{с}$ ) (табл. 4).

**Таблица 4.** Повторяемость (%) развития грозы и града при различной степени развития турбулентности

**Table 4.** Repeatability (%) of thunderstorm and hail development at different degrees of turbulence development

Опасное явление	Уровень турбулентности в грозовых облаках, $\text{см}^2/\text{с}$			
	1	10	100	Сумма
Град	37 %	55 %	8 %	100 %
Гроза	45%	48 %	7 %	100 %

Чаще всего (48–55 %) при фронтальных грозах и грозе с градом радиолокатором регистрировалась умеренная турбулентность. Реже всего (7–8 % случаев) наблюдалась сильная турбулентность. Максимальная турбулентность фиксировалась радиолокатором в грозовых облаках с высотой верхней границы 12–16 км.

Среднее значение уровня турбулентности для грозовых облаков составляет 12 см<sup>2</sup>/с, а для градовых облаков 9,2 см<sup>2</sup>/с. При этом стандартное отклонение составляет 17 см<sup>2</sup>/с для градовой облачности и до 23 см<sup>2</sup>/с для грозовой с градом. Максимальное среднее значение турбулентности составляет 13 см<sup>2</sup>/с в июне, минимальное – 10 см<sup>2</sup>/с в августе. Это зависит, по-видимому, от сочетания метеорологических условий (разницы температур с высотой, степени устойчивости атмосферы, синоптической ситуации), динамики атмосферы (вертикального сдвига ветра, волновых движений) и свойств подстилающей поверхности (неоднородности, деформации воздушного потока).

Пороговые значения интегральной водности (VIL) для разной вероятности возникновения грозы и грозы с градом различаются (табл. 5). При выпадении града значения интегральной водности конвективных ячеек выше, чем для формирования только гроз.

**Таблица 5.** Пороговые значения водности при формировании фронтальных гроз и града

**Table 5.** Threshold values of water content during the formation of frontal thunderstorms and hail

Вероятность		50 %	70 %	80 %	90 %
Водность, кг/м <sup>2</sup>	Гроза	6,0	8,0	12,0	14,0
	Град	7,5	14,0	14,7	15,8

Диапазон изменения интегральной водности анализированных грозовых и градовых облаков варьируется в пределах 0,5–32 кг/м<sup>2</sup>. Среднее значение водности грозовой облачности в течение всего периода исследований составляет 8,5 кг/м<sup>2</sup> и во все месяцы различается достаточно вариативно, что демонстрирует величина стандартного отклонения. Интегральная водность анализируемой грозовой облачности в течение летнего периода имеет максимум средних значений в июле – 9 кг/м<sup>2</sup>, а минимум в июне – 7,7 кг/м<sup>2</sup>. Для градовых облаков среднее значение интегральной водности составляет в целом 11,7 кг/м<sup>2</sup>.

Согласно [13, 15, 23], величина VIL может быть хорошим индикатором для идентификации гроз и града. Исследования, проведенные в 2017–2019 гг. в ФГБУ «ЦАО», показали, что нижний порог значения VIL для явления «град» в большинстве случаев составляет 12 кг/м<sup>2</sup>. Если по данным метеостанции отмечено явление «град», а значения VIL в это время вблизи этой метеостанции не превышают 8 кг/м<sup>2</sup>, это очень часто означает, что

наблюдатель «крупу» принял за «град». Поскольку в результате наших исследований (табл. 5) получено, что в 50 % случаев градовой облачности значения  $VIL$  не превышают  $8 \text{ кг/м}^2$ , а в 90 % случаев –  $16 \text{ кг/м}^2$ , исследования возможности использования параметра  $VIL$  в качестве предиктора явлений «град» необходимо продолжить.

### Заключение

В результате выполненной работы для территории центральной части Западной Сибири по данным анализа радиолокационных характеристик грозовой и градовой облачности, анализируемой в радиусе 200 км от ДМРЛ-С Новосибирск, можно сделать следующие выводы.

1. Сопоставление радиолокационных и наземных случаев регистрации гроз и града выявило достаточно высокий уровень согласования – 84 %. Вероятность определения гроз с использованием ДМРЛ оценивается как высокая, если регистрируется более 80 % гроз [12]. Заметим, что анализ результатов сопоставления радиолокационных и наземных наблюдений с помощью системы «ВАЛИРАД» над Европейской территорией России тоже продемонстрировал высокий уровень согласования данных (80 %) об опасных явлениях погоды по информации сети ДМРЛ-С и по данным на метеостанциях [16, 17].

2. Высота верхней границы облачности при фронтальных грозах составляет в среднем 11 км, а и при грозах с градом – 12 км; максимальные высоты при фронтальной грозе зарегистрированы в июле (15 км), а в случае градовой облачности верхняя граница трижды (13.07.2021, 14.07.2021, 27.06.2023) достигала высоты 16 км.

3. Высоты верхней границы грозовых и градовых облаков в Западной Сибири сопоставимы с высотами аналогичной облачности в более южных широтах [14, 20] и сопоставимы с результатами регистрации высоты такой облачности с метеорологических спутников [10, 26].

4. В дни регистрации гроз и гроз с градом высота тропопаузы не превышала 12 км. Высота тропопаузы примерно совпадала с высотой верхней границы радиоэха градовой облачности в случаях, когда размер градин составлял менее 10 мм. Во время регистрации более крупного града высота верхней границы облачности превышала высоту тропопаузы в среднем на 0,5 км, но иногда и на 2–3 км.

5. Интегральная водность градовых облаков значительно выше, чем конвективных облаков с грозами. Это связано с наличием более мощного облачного слоя с интенсивными восходящими движениями, благодаря чему над Западной Сибирью формируются облачные элементы в виде градин диаметром более 10 мм. Значения  $VIL$  в таких градовых облаках меняются в пределах  $16\text{--}32 \text{ кг/м}^2$ , что соответствует инструкции для оперативно-прогностических и авиаметподразделений Росгидромета по использованию информации ДМРЛ в синоптической практике [12]. При

размере выпавших градин менее 10 мм значения VII регистрируются в диапазоне 8–16 кг/м<sup>2</sup>.

6. Грозы и гроза с градом образуются в конвективной облачности только при наличии атмосферной турбулентности. Атмосферные фронты в циклонах могут формировать и среднюю, и сильную турбулентность в зависимости от ряда факторов. Большинство случаев сильной турбулентности вызвано быстрым движением холодного фронта, содержащего большое количество влаги [3]. Чем сильнее ветер и больше коэффициент трения, зависящий от шероховатости подстилающей поверхности, тем интенсивнее динамическая турбулентность. В результате представленных исследований самая высокая турбулентность наблюдается в облачности холодных фронтов. В 8 % градовой облачности зарегистрирована «сильная» [15] турбулентность, в 55 % – умеренная, а в 37 % – слабая. Почему в проанализированной градовой облачности турбулентность меньше чем в грозовой? – вопрос остается открытым и требует дополнительных исследований, поскольку мощные кучево-дождевые облака, из которых, выпадают ливневые осадки и град, всегда формируются сильной турбулентностью.

7. В мощных градовых конвективных ячейках измеряемые значения максимальной отражаемости увеличиваются до 60 dBZ, а в грозовых – не более 55 dBZ.

8. Значения радиолокационной отражаемости на уровнях температуры 0 °C и -15 °C различаются для грозовых и градовых облаков примерно на 20 %, поэтому эти параметры могут успешно использоваться для прогноза образования града.

Успехи в повышении точности диагностирования грозовых и градовых облаков имеют важное практическое значение. Полученные результаты могут также найти применение при наукастинге явления. Одна из основных задач наукастинга – передача результатов в автоматизированную систему управления воздушным движением, что особенно актуально для развития системы воздушного транспорта в Западной Сибири.

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» Наталье Ильиничне Серебрянник за анализ представленных результатов и за ряд ценных замечаний по содержанию данной статьи, способствовавших ее улучшению.

The authors express their gratitude to Natalia Ilyinichna Serebryannik, senior researcher at the Federal State Budgetary Institution «Central Aerological Observatory», for her analysis of the presented results and for a number of valuable comments on the content of this article, which contributed to its improvement.

#### Список литературы

1. Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М. Диагностика града на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2(388). С. 114–127. DOI 10.37162/2618-9631-2023-2-114-127.

2. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 360. С. 135-148.
3. Аль-Хулайфави И.А., Иошта А.Р. Анализ грозовой активности на территории Ирака и Турции // Известия Уральского государственного горного университета. 2023. № 4 (72). С. 164-169.
4. Ананова Л.Г., Горбатенко В.П., Луковская И.А. Особенности радиолокационных характеристик конвективной облачности при шквалах на юго-востоке Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 51–56.
5. Базовые требования к технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды: РД 52.27.723-2009. Обнинск «ИГ-СОЦИН», 2009. 38 с.
6. Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалою Ю.А., Кондратюк В.И., Кулешов Ю.В., Светлова Т.П., Суворов С.С., Тимофеев В.И. Атлас облаков. СПб.: Д'АРТ, 2011. 248 с.
7. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 219 с.
8. Горбатенко В.П., Ананова Л.Г., Апостолиди Х.Т., Карпова А.А. Аэросиноптические условия образования града над юго-востоком Западной Сибири // Труды СибНИГМИ. 2023. Вып. 108. С. 17–28.
9. Горбатенко В.П., Кузевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108-117.
10. Горбатенко, В.П., Яськов А.А. Характеристики грозовых облаков, зарегистрированные спутниками Terra и Aqua // Материалы IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству. СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2023. С. 336-340.
11. Дядюченко В.Н., Павлюков Ю.Б., Вылегжанин И.С. Доплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. С. 23-27.
12. Инструкция для оперативно-прогностических и авиаметподразделений Росгидромета по использованию информации ДМРЛ в синоптической практике [Электронный ресурс]. URL: [http://omsk-meteo.ru/images/files/cci\\_doc/inv\\_n\\_3406.pdf](http://omsk-meteo.ru/images/files/cci_doc/inv_n_3406.pdf) (дата обращения 15.11.2025).
13. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Методика расчета водности и водозаписа кучево-дождевой облачности // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2008. № 1. С. 59-72.
14. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью // Метеорология и гидрология. 2005. №1. С. 84–95.
15. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М., 2019. 129 с.
16. Методическое письмо об итогах работы сети ДМРЛ Росгидромета в 2023 г. Долгопрудный. 2024. 77 с.
17. Методическое письмо об итогах работы сети ДМРЛ Росгидромета в 2024 г. Долгопрудный. 2025. 75 с.
18. Облака и облачная атмосфера. Справочник под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 646 с.
19. Павлюков, Ю.Б., Серебрянник Н.И., Карнов Б.Н. Валидация радиолокационных наблюдений опасных явлений погоды на сети ДМРЛ по данным наземной наблюдательной сети Росгидромета // Труды МФТИ. 2016. Т. 8, № 1 (29). С. 95–101.
20. Синькевич А.А., Попов В.Б., Абшаев А.М., Вое В.А., Pawar S.D., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Gopalakrishnan V., Геккиева Ж.М. Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. С. 932-936. DOI: 10.15372/AOO20201205.

21. Спрыгин А.А., Прохареня М.И. Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 6–22.

22. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание, 2022. 124 с.

23. Федеральные авиационные правила "Предоставление метеорологической информации для обеспечения полётов воздушных судов" (утв. Приказом Минтранса РФ № 60 от 03.03.2014).

24. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Корицунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27-41. DOI 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.

25. Шукин, Г.Г., Булкин В.В. Метеорологическая пассивно-активная радиолокация // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 5. С. 549-572.

26. Яськов А. А., Горбатенко В.П. Параметры грозовых и градовых облаков над Западной Сибирью по данным спутника Terra за 2020 г. // Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. 2023. С. 487-491.

## References

1. Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M. Diagnostika grada na osnovе dannykh DMRL-S i rezul'tatov chislennogo modelirovaniya [Diagnosis of hail based on DMRL-C and numerical modeling data]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2023, no. 2 (388), 114-127. DOI 10.37162/2618-9631-2023-2-114-127 [in Russ.].

2. Alekseeva A.A., Peskov B.E. Otsenka maksimal'noy skorosti konvektivnogo potoka, kharakteristik livnevnykh osadkov i grada po radiolokatsionnoy informatsii [Assessment of the maximum rate of convective flow characteristics heavy rains and hail radiolokatsionnoy informatsii]. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of Hydrometcentre of Russia]*. 2016, vyp. 360, pp. 135-148 [in Russ.].

3. Al-Khulaifawi I.A., Ioshpa A.R. Otsenka maksimal'noy skorosti konvektivnogo potoka, kharakteristik livnevnykh osadkov i grada po radiolokatsionnoy informatsii [Analysis of thunderstorm activity in Iraq and Turkey]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [News of the Ural State Mining University]*. 2023, no. 4 (72), pp. 164-169. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-4-164-169 [in Russ.].

4. Ananova L.G., Gorbatenko V.P., Lukovskaya I.A. Radar characteristics of convective clouds during squalls in the southeastern part of Western Siberia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007, vol. 32, no. 7, pp. 449-452. DOI: 10.3103/S1068373907070059.

5. Bazovyeye trebovaniya k tekhnologii podgotovki kratkosrochnykh prognozov pogody: RD 52.27-723-2009. Obninsk, IG-Sotsin Publ., 2009. 38 p. [in Russ.].

6. Bepalov D.P., Devyatkin A.M., Dovgalyuk Yu.A., Kondratyuk V.I., Kuleshov YU.V., Svetlova T.P., Suvorov S.S., Timofeyev V.I. Atlas oblakov [Atlas of Clouds]. St. Petersburg, D'ART Publ., 2011. 248 p. [in Russ.].

7. Brylev G.B., Gashina S.B., Nizdoymnoga G.L. Radiolokatsionnyye kharakteristiki oblakov i osadkov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 219 c. [in Russ.].

8. Gorbatenko V.P., Ananova L.G., Apostolidi H.T., Karpova A.A. Aerosinopticheskiye usloviya obrazovaniya grada nad yugo-vostokom Zapadnoy Sibiri [Aerosynoptic conditions of hail formation over the southeast of Western Siberia]. *Trudy Sibirskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta [Transactions of the Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute]*. 2023, vyp. 108, pp. 17-28 [in Russ.].

9. Gorbatenko V.P., Kuzhevskaya I.V., Pustovalov K.N., Chursin V.V., Konstantinova D.A. assessment of atmospheric convective potential variability in Western Siberia in changing climate. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, vol. 45, no. 5, pp. 360-367. DOI: 10.3103/S1068373920050076.

10. Gorbatenko, V.P., Yaskov A.A. Kharakteristiki grozovykh oblakov, zaregistrirovannyye sputnikami Terra i Aqua [Characteristics of thunderstorm clouds recorded by the Terra and Aqua satellites]. *Materialy IX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu [Proceedings of the IX All-Russian Scientific Conference on Atmospheric Electricity]*. St. Petersburg, A.F. Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2023. pp. 336-340 [in Russ.].

11. Дядюченко В.Н., Павлюков Ю.Б., Вылегжанин И.С. Doplerovskiye radiolokatory v Rossii [Doppler radars in Russia]. *Nauka v Rossii [Science in Russia]*. 2014, no. 1, pp. 23-27 [in Russ.].

12. Instruktsiya dlya operativno-prognosticheskikh i aviarnetpodrazdeleniy Rosgidrometa po ispol'zovaniyu informatsii DMRL v sinopticheskoy praktike [Elektronnyy resurs]. URL: [http://omsk-meteo.ru/images/files/cci\\_doc/inv\\_n\\_3406.pdf](http://omsk-meteo.ru/images/files/cci_doc/inv_n_3406.pdf) (data obrashcheniya 15.11.2025) [in Russ.].

13. Kalinin N.A., Smirnova A.A. Metodika rascheta vodnosti i vodozapasa kuchevozhdzhevoy oblachnosti [Recovery of liquid water content and stores of a cumulonimbus cloud]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle [Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences]*. 2008, no. 1. pp. 59-72 [in Russ.].

14. Kalinin N.A., Smirnova A.A. Study of radar characteristics for detection of hazardous weather associated with cumulonimbus clouds. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2005, no. 1, pp. 64-72.

15. Metodicheskiye ukazaniya po ispol'zovaniyu informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike: Tret'ya redaktsiya. Moscow, 2019. 129 p. [in Russ.].

16. Metodicheskoye pis'mo ob itogakh raboty seti DMRL Rosgidrometa v 2023 g. Dolgoprudnyy, 2024, 77 s. [in Russ.].

17. Metodicheskoye pis'mo ob itogakh raboty seti DMRL Rosgidrometa v 2024 g. Dolgoprudnyy, 2025, 75 s. [in Russ.].

18. Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik pod red. I.P. Mazina i A.KH. Khrgiana. L.: Gidrometeoizdat Publ., 1989. 646 s. [in Russ.].

19. Pavlyukov Yu.B., Serebryannik N.I., Karpov B.N. Validatsiya radiolokatsionnykh nablyudeniy opasnykh yavleniy pogody na seti DMRL po dannym nazemnoy nablyudatel'noy seti Rosgidrometa [Validation of weather radar observations of severe weather phenomena with the ROSHYDROMET ground-based weather stations]. *Trudy MFTI [Proceedings of MIPT]*. 2016, vol. 8, no. 1 (29), pp. 95-101 [in Russ.].

20. Sinkevich A.A., Popov V.B., Abshaev A.M., Boe B.A., Pawar S.D., Mikhailovsky Yu.P., Toropova M.L., Gopalakrishnan V., Gekkieva Zh.M. Radar characteristics of cu during their transition to thunderstorm in different regions of the world. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2020, vol. 33, no. 6, pp. 645-649. DOI: 10.1134/S1024856020060226.

21. Sprygin A.A., Prokharenaya M.I. Diagnostika i prognoz konvektivnykh struktur s opasnymi yavleniyami po dannym modelirovaniya i distantsionnogo zondirovaniya nad territoriyey Belarusi i Tsentral'noy Rossii [Diagnosis and forecasting of convective structures accompanied by severe weather events based on model and remote sensing data over the territory of Belarus and central Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2018, no. 3 (369), pp. 6-22. DOI 10.37162/2618-9631-2018-3-6-22 [in Russ.].

22. Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshcheye rezюме. St. Petersburg, Naukoyemkiye tekhnologii Publ., 2022, 124 p. [in Russ.].

23. Federal'nyye aviatsionnyye pravila "Predostavleniye meteorologicheskoy informatsii dlya obespecheniya polotov vozdushnykh sudov" (utv. Prikazom Mintransa RF № 60 ot 03.03.2014).

24. Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A., Korshunova N.N., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Shvets' N.V., Shikhov A.N., Yarinich Yu.I. Atmospheric severe convective events in Russia: changes observed from different data. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022, vol. 47, no. 5, pp. 343-354. DOI: 10.3103/s106837392205003x.

25. Shchukin, G.G., Bulkin V.V. Meteorologicheskaya passivno-aktivnaya radiolokatsiya [Meteorological passive-active radar observations]. *Radiotekhnika i elektronika [Journal of communications technology and electronics]*. 2011, vol. 56, no. 5, pp. 509-530. DOI: 10.1134/s1064226911030089.

26. Yaskov A.A., Gorbatenko V.P. Parametry grozovykh i gradovykh oblakov nad Zapadnoy Sibir'yu po dannym sputnika Terra za 2020 g. *Gidrometeorologiya i fizika atmosfery: sovremennyye dostizheniya i tendentsii razvitiya: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. St. Petersburg, Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. 2023, pp. 487-491.

*Поступила 23.10.2025; принята в печать 26.11.2025.*  
*Submitted 23.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.*