НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ/ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.63

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ МНОГОЯЧЕЙКОВЫХ ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА

Научная статья

Инюхин В.С.[1, *], Чередник Е.А.[2]
[1] ORCID : 0000-0001-6865-1799;
[2] ORCID : 0000-0003-0432-0653;
[1, 2] Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (inuhin51[at]mail.ru)

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблематике — исследованию градовых облаков. Объектом изучения являются наиболее часто встречающихся в природе многоячейковые градовые облака. На Северном Кавказе повторяемость многоячейковых градовых процессов составляют от 70 до 80%. В работе использовались архивные радиолокационные данные центральной части Северного Кавказа, полученные за период с 2003 по 2023 гг. Рассматривались распределения следующих параметров: максимальная отражаемость Z_{10}, высота уровня повышенной отражаемости радиоэха H_{45}, время жизни, скорость и направление перемещения для многоячейковых градовых облаков. Полученные данные могут быть использованы для разработки более точных прогнозов градоопасности и оптимизации стратегий противоградовой защиты.

Ключевые слова: градовая ячейка, многоячейковые облака, суперячейка, эмпирическая модель облака, град, радиолокатор МРЛ-5.

RADAR MONITORING OF MULTICELLULAR HAILSTORM CLOUDS IN THE CENTRAL CAUCASUS

Research article

Inyukhin V.S.[1, *], Cherednik E.A.[2]
[1] ORCID : 0000-0001-6865-1799;
[2] ORCID : 0000-0003-0432-0653;
[1, 2] High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

* Corresponding author (inuhin51[at]mail.ru)

Abstract

The article is devoted to a topical issue — the study of hailstorm clouds. The research object is the most common type of hailstorm clouds found in nature: multicellular hailstorm clouds. In the North Caucasus, the recurrence of multicellular hailstorm processes ranges from 70 to 80%. The archival radar data for the central part of the North Caucasus obtained between 2003 and 2023 were used in the work. The distributions of the following parameters were reviewed: maximum reflectivity Z_{10}, height of the increased reflectivity level of radio echo H_{45}, life span, speed and direction of movement for multicellular hailstorm clouds. The obtained data can be used to develop more accurate hailstorm risk forecasts and optimise hail protection strategies.

Keywords: hailstorm cell, multicellular clouds, supercell, empirical cloud model, hailstorm, MRL-5 radar.

Введение

Объектом исследования являются радиоэхо наиболее часто встречающихся в природе многоячейковых градовых облаков.

Известно, что грозоградовые процессы подразделяются на одноячейковые, многоячейковые и суперячейковые. Характерные особенности структуры и динамики конвективных ячеек различных типов довольно подробно описаны в работах [1], [2], [3], [4]. Многоячейковые градовые облака кратко можно охарактеризовать следующим образом:

- состоят из нескольких одновременно существующих конвективных ячеек, находящихся на разных стадиях развития;
- в зависимости от пространственной структуры ветра в атмосфере могут реализоваться в виде трех подтипов многоячейковых градовых облаков: упорядоченные, неупорядоченные и переходного типа [5], [6], [7].

Упорядоченные многоячейковые градовые процессы имеют фронтальное происхождение и развиваются в дни, когда направление ветра в слое облакообразования почти не меняется, а его скорость растет с высотой. Они представляют собой класс хорошо организованных по структуре и динамике развития градовые процессы.

Ячейки в неупорядоченных градовых облаках осесимметричны или слабо несимметричны, перемещаются в различных направлениях (либо по ведущему направлению, либо следуя орографии), короткоживущие, средней интенсивности, град из них выпадает пятнами.

В процессах переходного типа одна из ячеек развивается по типу суперячейковой [8].

На Северном Кавказе повторяемость многоячейковых градовых процессов составляет от 70 до 80% [5]. Представляет интерес для каждого типа градовых облаков на основании многолетних радиолокационных наблюдений разработать эмпирическую модель, включающую распределения ключевых параметров, характерные для того или иного типа. Это необходимо сделать по многим причинам.

Во-первых, такая модель позволит более точно прогнозировать выпадение града, что критически важно для сельского хозяйства и других отраслей экономики, подверженных риску градобития.

Во-вторых, эмпирическая модель, основанная на радиолокационных данных, может служить основой для разработки и совершенствования алгоритмов автоматического распознавания типов градовых облаков. Это значительно упростит и ускорит процесс анализа радиолокационной информации, что особенно важно в условиях быстро меняющейся метеорологической обстановки.

В-третьих, детальное изучение распределения ключевых параметров различных градовых облаков позволит лучше понять физические процессы, происходящие внутри них, и, следовательно, улучшить существующие численные модели грозоградовых явлений. Это, в свою очередь, приведет к более точным прогнозам интенсивности и продолжительности градобития. Целью данной работы являлось детальное изучение распределения ключевых параметров многоячейковых градовых облаков, статистическая обработка полученных результатов и на ее основе построение эмпирической модели многоячейкового облака.

В работе использовались радиолокационные данные, полученные за период с 2003 по 2023 годы в центральной части Северного Кавказа. Для написания статьи использовалась архивная информация, собранная в Базах радиолокационных данных градовых облаков (БД) за летние сезоны 2003–2023 годов [9], [10]. Для оперативного выбора необходимых данных были разработаны специальные запросы к БД. Статистический анализ радиолокационных данных позволил получить распределения некоторых параметров мощных градовых ячеек.

Основная часть

Одним из параметров, определяющих состояние облака, является его радиолокационная отражаемость Z_{10}.

На рис. 1 представлены гистограммы повторяемости максимальной отражаемости Z_{10} в период максимального развития ячеек (а), входящих в состав многоячейковых градовых облаков, и превышение уровня H_{45} над нулевой изотермой (б).

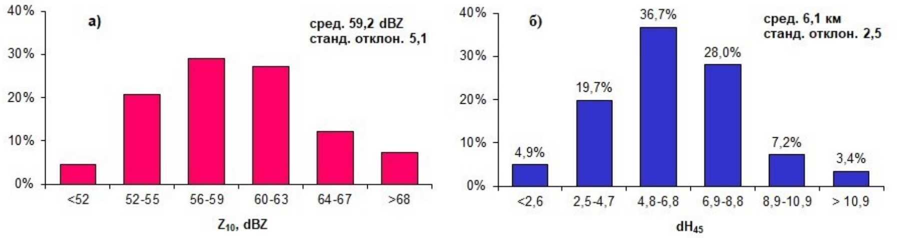

Рисунок 1 - Повторяемость значений отражаемости Z_{10} для ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков (*а*), и повторяемость dH_{45} (*б*)

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.63.1

Из рис. 1а видно, что примерно половина облаков имеют высокую отражаемость (больше 60 dBZ). Высокая отражаемость в многоячейковых градовых облаках указывает на большой размер града, кинетической энергии, ледности и некоторых других параметров.

Важной характеристикой облака является ее вертикальная протяженность. Чем сильнее облако проникает в области отрицательных температур, тем больше вероятность появления большого количества ледяных кристаллов. Толщина переохлажденной части облака dH45 характеризует его градоопасность и является одним из ключевых параметров, используемых для оценки потенциальной интенсивности града. Чем больше dH45, тем больше времени и пространства у ледяных кристаллов для роста и агрегации, что, в свою очередь, увеличивает вероятность выпадения крупных градин на землю. Кроме того, вертикальная протяженность облака косвенно связана с интенсивностью восходящих потоков воздуха внутри него. Поэтому мониторинг вертикальной протяженности облаков, особенно в сочетании с данными о скорости восходящих потоков, является важным инструментом для прогнозирования и предупреждения о градоопасных явлениях. На рис. 1б представлена гистограмма превышения уровня H_{45} над нулевой изотермой. Анализ рис. 1б показывает, что превышение уровня H_{45} над нулевой изотермой в среднем равно 6,1 км, что соответствует в летнее время температуре - 36^{o}С.

Совершенствование методов активных воздействий на градовые процессы предъявляют повышенные требования к прогнозу скорости и направления перемещения градовых облаков. Это необходимо для решения многих задач и, в частности, разработки краткосрочного прогноза начала выпадения твердых или жидких осадков в заданных пунктах. При радиолокационных исследованиях параметры перемещения облаков оцениваются по скорости и направлению перемещения радиоэха облаков на экране радара. На рис. 2 приводится гистограмма повторяемости скорости перемещения ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков.

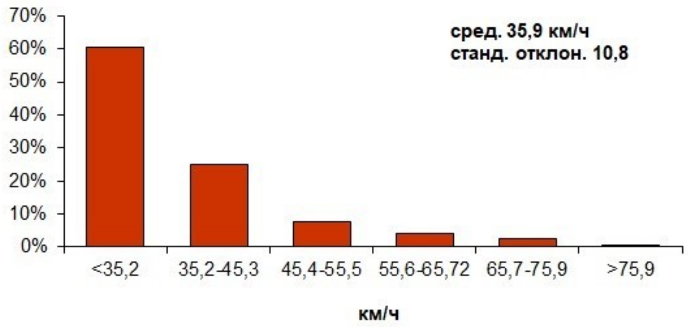

Рисунок 2 - Повторяемость скорости перемещения ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.63.2

На рис. 3 представлены гистограммы повторяемости направления перемещения ячеек (а) и расстояний перемещения ячеек (б), входящих в состав многоячейковых градовых облаков. Из рис. 3а видно, что наибольшее количество ячеек двигаются с запада и юго-запада. Среднее направление перемещения градовых ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков, равно 238,5 градусов. Важным параметром, характеризующим динамику градового облака, является расстояние перемещения ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков. В среднем этот параметр равен 64 км. На пути своего движения из облака может выпадать град. И чем больший путь проходит облако, тем больше градовая дорожка, и, следовательно, наносимый ущерб. Из рис. 3б видно, что среднее расстояние перемещения ячеек составляет 64,1 км.

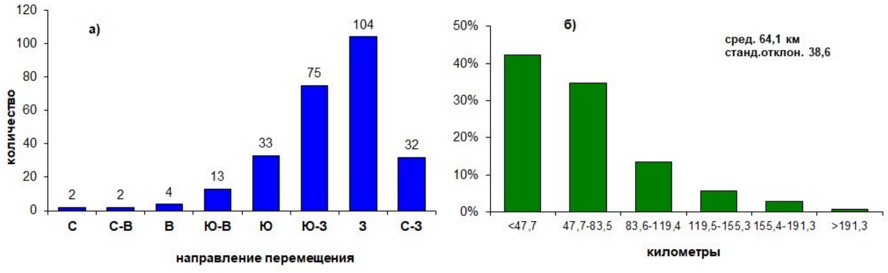

Рисунок 3 - Повторяемость направления перемещения (*а*) и расстояний перемещения (*б*) ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.63.3

Важным параметром, определяющем ее динамические характеристики, является время жизни градовой ячейки. Чем оно больше, тем дольше градовая ячейка будет существовать, поддерживая процесс градообразования.

На рис. 4 представлены гистограммы повторяемости времени жизни (а) и времени достижения максимального развития (б) для ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков. Из рис. 4а видно, что среднее время жизни ячеек составляет 1,76 часа. Важным параметром, определяющем ее динамические характеристики, является время достижения максимального развития градовой ячейки. Этот период от момента зарождения до пика интенсивности напрямую влияет на размер градин, скорость их выпадения и, как следствие, на потенциальный ущерб, который может быть нанесен сельскохозяйственным культурам. Из рис. 4б видно, что среднее время достижения максимального развития для ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков, составляет 0,8 часа.

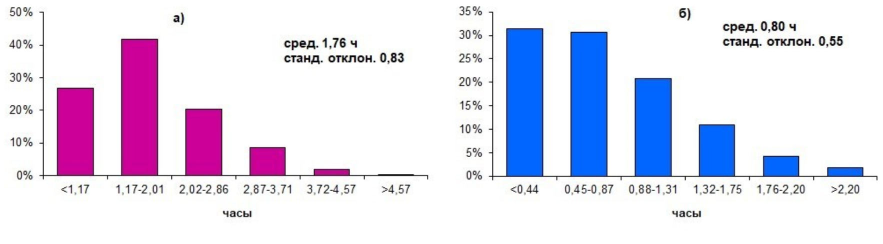

Рисунок 4 - Повторяемость времени жизни (*а*) и времени достижения максимального развития (*б*) ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.63.4

Заключение

В работе проведён комплексный статистический анализ ключевых параметров многоячейковых градовых облаков с целью выявления закономерностей их развития и перемещения.

Рассмотрены следующие параметры многоячейковых градовых облаков:

· максимальная отражаемость Z_{10} (в dBZ) — индикатор интенсивности градообразования;

· высота уровня повышенной отражаемости радиоэха H_{45} — показатель вертикальной структуры облака;

· время жизни градовых ячеек — продолжительность существования конвективных элементов;

· скорость и направление перемещения облаков — динамика их движения.

Основные результаты исследования заключаются в следующем.

1. Выявлено преобладание значений максимальной отражаемости Z_{10} в диапазоне 50−65 dBZ. Это свидетельствует о:

· высокой интенсивности процессов градообразования;

· значительном размере ледяных частиц в облаке;

· повышенной потенциальной опасности для наземных объектов.

2. Установлено, что превышение уровня H_{45} над нулевой изотермой в среднем составляет 6,1 км. В летний период это соответствует температуре −36∘C, что:

· указывает на обширную зону переохлаждённых капель — основу для роста градин;

· служит ключевым критерием для оценки градоопасности облака.

3. Получено следующее распределение продолжительности существования ячеек:

· основная группа: 60−120 минут — типичная длительность для большинства ячеек;

· долгоживущие ячейки: более 4 часов — редкие, но особо опасные случаи, требующие повышенного внимания.

4. Выявлена преобладающая траектория движения облаков — с юго-запада на северо-восток. Это:

· коррелирует с господствующими воздушными потоками в регионе в дни развития мощных градовых процессов;

· позволяет прогнозировать зоны потенциального воздействия града.

Работа вносит следующий научный вклад в изучение градовых процессов:

· впервые на обширном материале систематизированы динамические характеристики многоячейковых градовых облаков;

· построены гистограммы распределений ключевых параметров, что даёт основу для статистического моделирования;

· количественно оценены критерии градоопасности (например, порог H_{45} и диапазон Z_{10}).

Практическая значимость. Результаты исследования позволяют:

1. Уточнить региональные модели развития градовых процессов за счёт ввода эмпирически обоснованных параметров.

2. Повысить точность прогнозов градоопасности благодаря:

– использованию критериев интенсивности (Z_{10});

– учёту вертикальной структуры облаков (H_{45});

– анализу временных и пространственных закономерностей.

3. Оптимизировать методы активного воздействия (например, противоградовой защиты) через:

– заблаговременное определение зон риска;

– корректировку стратегий засева облаков с учётом скорости и направления движения ячеек.

Перспективы применения. Полученные данные могут быть интегрированы в:

· автоматизированные системы прогнозирования града;

· алгоритмы работы противоградовых служб;

· учебные курсы по физике облаков и активной защите от опасных явлений.

Таким образом, исследование создаёт фундамент для развития более эффективных методов мониторинга и снижения ущерба от градовых событий.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Marwitz J.D. The structure and motion of severe hailstorms. Parts I–III. / J.D. Marwitz // Journal of Applied Meteorology. — 1972. — № 11. — P. 166–201.

2. Абшаев М.Т. Структура и динамика развития грозоградовых процессов Северного Кавказа. / М.Т. Абшаев // Труды ВГИ. — 1984. — № 53. — С. 6–22.

3. Аппаева Ж.Ю. Некоторые особенности развития одноячейковых градовых облаков па Северном Кавказе / Ж.Ю. Аппаева, И.Н. Березинский, В.С. Инюхин и др. // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. — Нальчик: Аэтерна, 2017. — Ч. 1. — С. 237–245.

4. Инюхин В.С. Физико-статистическая модель отдельной градовой ячейки / В.С. Инюхин, И.Н. Березинский, Е.А. Чередник // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. — Нальчик: Аэтерна, 2017. — С. 261–275.

5. Инюхин В.С. Радиолокационные исследования распределения зон формирования первого радиоэха градовых облаков / В.С. Инюхин, С.А. Кущев, К.Б. Лиев и др. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2016. — Т. 52. — № 6. — С. 691–698. — DOI: 10.7868/S0002351516060080

6. Газаева З.А. Распределение траекторий перемещения многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе / З.А. Газаева, В.С. Макитов // Труды ВГИ. — 1991. — Вып. 80. — С. 93–99.

7. Федченко Л.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа / Л.М. Федченко, Г.Г. Гораль, В.А. Беленцова и др. — Москва: Гидрометеоиздат, 1991. — 425 с.

8. Абшаев М.Т. Руководство по организации и проведению противоградовых работ / М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев, М.В. Барекова и др. — Нальчик: Печатный двор, 2014. — 508 с.

9. Vasiloff S.V. Investigation of the transition from Multicell to supercell storm. / S.V. Vasiloff, E.A. Brandes, R.P. Davies-Jones // J. of Climate and Appl. Meteorology. — 1986. — № 25. — P. 1022–1036.

10. Березинский И.Н. Радиолокационные характеристики градовых облаков. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017620749 / Березинский И.Н., Инюхин В.С., Кущев С.А. [и др.]. — Заявка № 2017620085 от 30.01.2017.

11. Инюхин В.С. Радиолокационные параметры мощных градовых ячеек Центрального Кавказа / Инюхин В.С., Чередник Е.А. — Свидетельство о регистрации базы данных RU 2024622141, 21.05.2024. — Заявка № 2024621850 от 08.05.2024.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Marwitz J.D. The structure and motion of severe hailstorms. Parts I–III. / J.D. Marwitz // Journal of Applied Meteorology. — 1972. — № 11. — P. 166–201.

2. Abshaev M.T. Struktura i dinamika razvitiya grozogradovy'x processov Severnogo Kavkaza [Structure and dynamics of thunderstorm processes in the North Caucasus]. / M.T. Abshaev // Proceedings of the VGI. — 1984. — № 53. — P. 6–22. [in Russian]

3. Appaeva Zh.Yu. Nekotorie osobennosti razvitiya odnoyacheikovikh gradovikh oblakov pa Severnom Kavkaze [Some features of the development of single-cell hail clouds in the North Caucasus] / Zh.Yu. Appaeva, I.N. Berezinskii, V.S. Inyukhin et al. // Reports of the All-Russian Conference on Cloud Physics and Active Impacts on Hydrometeorological Processes. — Nalchik: Aeterna, 2017. — Pt. 1. — P. 237–245. [in Russian]

4. Inyukhin V.S. Fiziko-statisticheskaya model otdelnoi gradovoi yacheiki [Physical and statistical model of a single grad cell] / V.S. Inyukhin, I.N. Berezinskii, Ye.A. Cherednik // Reports of the All-Russian Conference on Cloud Physics and Active Impacts on Hydrometeorological Processes. — Nalchik: Aeterna, 2017. — P. 261–275. [in Russian]

5. Inyukhin V.S. Radiolokatsionnie issledovaniya raspredeleniya zon formirovaniya pervogo radioekha gradovikh oblakov [Radar studies of the distribution of zones of formation of the first radio echo of hail clouds] / V.S. Inyukhin, S.A. Kushchev, K.B. Liev et al. // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosferi i okeana [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and ocean physics]. — 2016. — Vol. 52. — № 6. — P. 691–698. — DOI: 10.7868/S0002351516060080 [in Russian]

6. Gazaeva Z.A. Raspredelenie traektorii peremeshcheniya mnogoyacheikovikh gradovikh protsessov na Severnom Kavkaze [Distribution of trajectories of multicellular hail processes in the North Caucasus] / Z.A. Gazaeva, V.S. Makitov // Trudi VGI [Proceedings of the VGI]. — 1991. — Iss. 80. — P. 93–99. [in Russian]

7. Fedchenko L.M. Opasny'e konvektivny'e yavleniya i ix prognoz v usloviyax slozhnogo rel'efa [Dangerous convective phenomena and their forecast in difficult terrain conditions] / L.M. Fedchenko, G.G. Goral', V.A. Belenczova et al. — Moscow: Gidrometeoizdat, 1991. — 425 p. [in Russian]

8. Abshaev M.T. Rukovodstvo po organizacii i provedeniyu protivogradovy'x rabot [Guidelines for the organization and conduct of anti-hail work] / M.T. Abshaev, A.M. Abshaev, M.V. Barekova et al. — Nal'chik: Pechatny'j dvor, 2014. — 508 p. [in Russian]

9. Vasiloff S.V. Investigation of the transition from Multicell to supercell storm. / S.V. Vasiloff, E.A. Brandes, R.P. Davies-Jones // J. of Climate and Appl. Meteorology. — 1986. — № 25. — P. 1022–1036.

10. Berezinsky I.N. Radiolokacionnye harakteristiki gradovyh oblakov. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2017620749 [Radar characteristics of hail clouds. Certificate of state registration of the computer program No. 2017620749] / Berezinsky I.N., Inyukhin V.S., Kushchev S.A. [et al.]. — Application No. 2017620085 dated 30.01.2017. [in Russian]

11. Inyukhin V.S. Radiolokacionnye parametry moshchnyh gradovyh yacheek Central'nogo Kavkaza. Svidetel'stvo o registracii bazy dannyh RU 2024622141, 21.05.2024 [Radar parameters of powerful hail cells of the Central Caucasus. Certificate of registration of the database RU 2024622141, 05/21/2024] / Inyukhin V.S., Cherednik E.A. — Application No. 2024621850 dated 05/08/2024. [in Russian]