

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЯЧЕЙКОВЫХ ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА

В.С. Инюхин, Е.А. Чередник

Высокогорный геофизический институт, 360001, г. Нальчик, пр. Ленина, 2

E-mail: inuhin51@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной проблематике – исследованию градовых облаков. Предметом рассмотрения авторами являются радиоэха наиболее часто встречающихся в природе многоячейковых градовых облаков. На Северном Кавказе повторяемость многоячейковых градовых процессов составляет от 70 до 80%. В работе использовались архивные радиолокационные данные центральной части Северного Кавказа, полученные за период с 2003 по 2023 годы и собранные в радиолокационной базе данных (БД). С целью выявления статистических закономерностей рассматривались распределении следующих параметров: максимальная отражаемость  $Z_{10}$ , высота уровня повышенной отражаемости радиоэха H45, времени жизни, скорость и направление перемещения для многоячейковых градовых облаков. Проведённый анализ позволил выявить взаимосвязи между различными параметрами, что может быть полезно для дальнейшего прогнозирования интенсивности градообразования в данной географической зоне. Анализ скорости и направления перемещения многоячейковых градовых облаков позволил выявить характерные маршруты их распространения, что может быть использовано для улучшения моделей прогноза погоды. Полученные статистические данные о распределении максимальной отражаемости  $Z_{10}$  продемонстрировали, что значения, превышающие пороговые, часто связаны с наиболее интенсивными градовыми явлениями. Высота уровня повышенной отражаемости H45 также является важным фактором, влияющим на интенсивность градообразования. Более низкое расположение этого уровня часто свидетельствует о близости градоопасной зоны к поверхности земли, что повышает риск нанесения ущерба. Сопоставление данных о H45 с информацией о температуре на различных высотах позволит получить дополнительные сведения о термодинамической структуре облаков и ее влиянии на процесс градообразования. Анализ времени жизни многоячейковых градовых облаков показывает, что более продолжительное существование облака часто связано с его большей интенсивностью и способностью к генерации града. Облака с длительным временем жизни имеют больше возможностей для аккумуляции влаги и роста градин, что увеличивает потенциальный ущерб от градовых осадков. Изучение скорости и направления перемещения градовых облаков выявило преобладающие направления их движения в регионе Северного Кавказа. Это позволяет установить связь между географическими особенностями местности и закономерностями распространения градовых явлений. Полученные данные могут быть использованы для разработки более точных моделей прогнозирования траекторий движения градовых облаков и заблаговременного предупреждения о возможных угрозах. Они так же могут служить основой для дальнейших исследований в области атмосферной физики и метеорологии, а также для разработки более эффективных методов защиты сельского хозяйства и инфраструктуры от градовых повреждений.

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

## RADAR RESEARCH OF MULTICELL HAIL CLOUDS IN THE CENTRAL CAUCASUS

V.S. Inyukhin, E.A. Cherednik

**Abstract.** The article is devoted to the current issues – the study of hail clouds. The subject of consideration by the authors is the radio echo of the most frequently occurring multi-cell hail clouds in nature. In the North Caucasus, the recurrence of multi-cell hail processes is from 70 to 80%. The work used archival radar data of the central part of the North Caucasus, obtained for the period from 2003 to 2023 and collected in the radar database (DB). In order to identify statistical patterns, the distribution of the following parameters was considered: maximum reflectivity  $Z_{10}$ , the height of the level of increased reflectivity of the radio echo H45, lifetime, speed and direction of movement for multi-cell hail clouds. The analysis allowed us to identify the relationships between various parameters, which can be useful for further forecasting the intensity of hail formation in this geographic zone. The analysis of the speed and direction of movement of multi-cell hail clouds made it possible to identify characteristic routes of their propagation, which can be used to improve weather forecast models. The obtained statistical data on the distribution of maximum reflectivity  $Z_{10}$  demonstrated that values exceeding the threshold are often associated with the most intense hail events. The height of the level of increased reflectivity H45 is also an important factor affecting the intensity of hail formation. A lower location of this level often indicates the proximity of the hail hazard zone to the earth's surface, which increases the risk of damage. Comparison of H45 data with information on temperature at different heights will provide additional information on the thermodynamic structure of clouds and its influence on the hail formation process. Analysis of the lifetime of multi-cell hail clouds shows that a longer existence of a cloud is often associated with its greater intensity and ability to generate hail. Clouds with a

long lifetime have more opportunities for moisture accumulation and hailstone growth, which increases the potential damage from hail precipitation. A study of the speed and direction of movement of hail clouds revealed the prevailing directions of their movement in the North Caucasus region. This allows us to establish a connection between the geographical features of the area and the patterns of distribution of hail phenomena. The data obtained can be used to develop more accurate models for predicting the trajectories of hail clouds and early warning of possible threats. They can also serve as a basis for further research in the field of atmospheric physics and meteorology, as well as for developing more effective methods for protecting agriculture and infrastructure from hail damage.

**Keywords:** hail cell; multi-cell clouds; supercell; empirical cloud model; hail; MRL-5 radar.

## Введение

Статья посвящена актуальной проблематике – исследованию градовых облаков. Предметом рассмотрения авторов 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 довольно подробно описаны в работах [1-4]. 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 [5–7].

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 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.

## Обсуждение результатов

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 Базе радиолокационных данных градовых облаков (БД) за летние сезоны 2003-2023 годов [9]. Для оперативного выбора необходимых данных были разработаны специальные запросы к БД. Статистический анализ радиолокационных данных позволил получить распределения некоторых параметров мощных градовых ячеек. Рассматривались распределения следующих параметров: максимальная отражаемость  $Z_{10}$ , высота уровня

повышенной отражаемости радиоэха  $H_{45}$ , времени жизни, скорость и направление перемещения для многоячейковых градовых облаков.

Одним из параметров энергетического состояния облака является его радиолокационная отражаемость. При исследовании градовых облаков измеряется отражаемость облака на двух частотных каналах радиолокатора МРЛ-5  $\lambda=3,2$  см ( $Z_{3,2}$ ) и  $\lambda=10$  см ( $Z_{10}$ ). В данной статье рассмотрены распределения отражаемости для канала  $Z_{10}$ .

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).

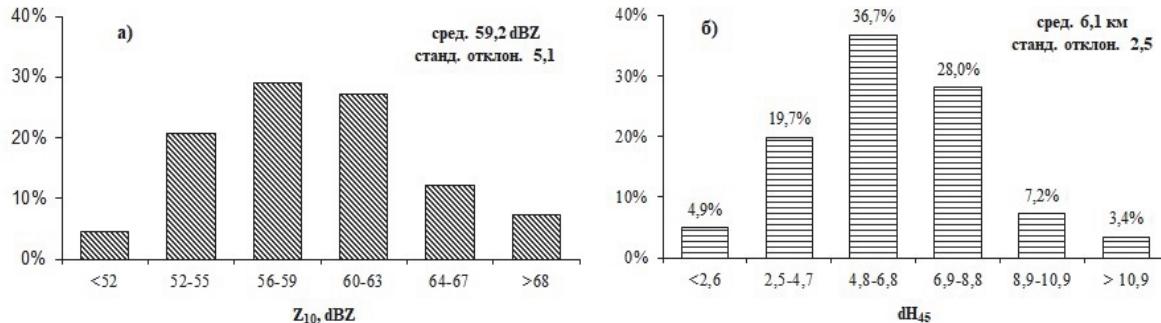


Рис. 1. Повторяемость значений отражаемости  $Z_{10}$  для ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков (а), и повторяемость  $dH_{45}$ , км (б)

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  $dH_{45}$  характеризует его градоопасность и является одним из ключевых параметров, используемых для оценки потенциальной интенсивности града. Чем больше  $dH_{45}$ , 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 температуре и 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 °C.

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.

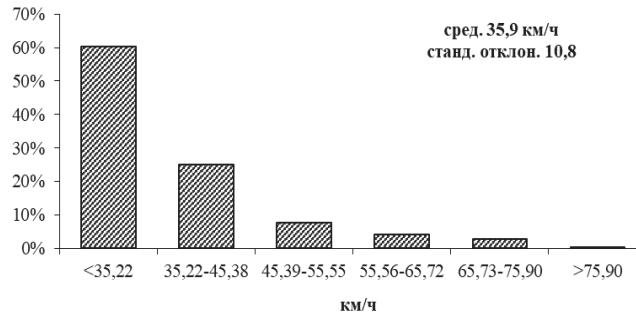


Рис. 2. Повторяемость скорости перемещения ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков

На рис. 3 представлены гистограммы повторяемости направления перемещения ячеек (а) и расстояний перемещения ячеек (б), входящих в состав многоячейковых градовых облаков. Из рис. 3 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.

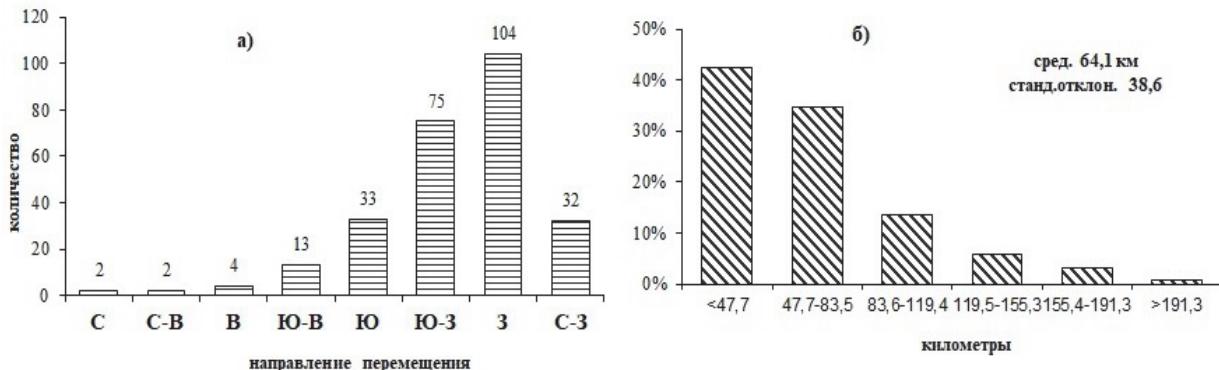


Рис. 3. Повторяемость направления перемещения (а) и расстояний перемещения (б) ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков

Важным параметром, определяющим ее динамические характеристики, является время жизни градовой ячейки, которое тесно связано с интенсивностью восходящих потоков, влажностью в средней тропосфере и вертикальным сдвигом ветра. Чем сильнее восходящие потоки, тем больше влаги может быть поднято в верхние слои атмосферы, и 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, определяющим 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, инфраструктуре и даже представлять опасность для жизни людей. Из рис. 4б видно, что среднее время достижения максимального развития для ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков, составляет 0,80 часа.

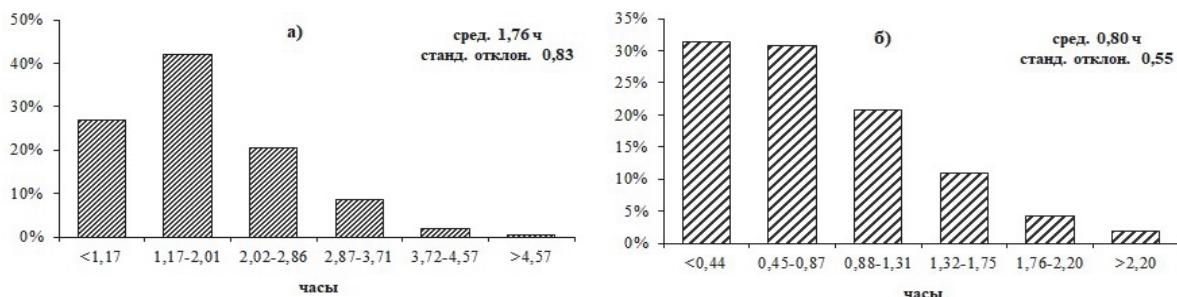


Рис. 4. Повторяемость времени жизни (а) и времени достижения максимального развития (б) ячеек, входящих в состав многоячейковых градовых облаков

### Заключение

В данной работе использовались радиолокационные данные, полученные за период с 2003 по 2023 годы в центральной части Северного Кавказа. С целью выявления статистических закономерностей рассматривались распределения следующих параметров: максимальная отражаемость  $Z_{10}$ , высота уровня повышенной отражаемости радиоэха  $H_{45}$ , времени жизни, скорость и

направление перемещения для многоячейковых градовых облаков. Ценность работы заключается в том, что впервые на основе обширного материала получены закономерности распределения основных динамических и энергетических характеристик многоячейковых градовых облаков, построены гистограммы их распределений. Полученные результаты позволяют уточнить существующие модели развития градовых процессов в регионе и повысить эффективность методов активного воздействия на них. В частности, анализ распределения максимальной отражаемости Z10 выявил преобладание значений в диапазоне от 50 до 65 dBZ, что свидетельствует о высокой интенсивности градообразования. Толщина переохлажденной части облака dH45 характеризует его градоопасность и является одним из ключевых параметров, используемых для оценки потенциальной интенсивности града. Анализ полученных результатов показывает, что для многоячейковых градовых облаков превышение уровня H<sub>45</sub> над нулевой изотермой в среднем равно 6,1 км, что соответствует в летнее время температуре - 36 °C. Анализ времени жизни градовых ячеек показал, что большинство из них существуют в течение 60–120 минут, однако встречаются и долгоживущие ячейки, время жизни которых превышает 4 часа. Наконец, исследование скорости и направления перемещения градовых облаков выявило преобладающее движение с запада на восток, что соответствует господствующим воздушным потокам в регионе. Полученные данные могут быть использованы для разработки более точных прогнозов градоопасности и оптимизации стратегий противоградовой защиты.

#### Список литературы

1. Marwitz J.D. The structure and motion of severe hailstorms. Parts I-III. // J. Appl. Met. – 1972. – V. 11. – P. 166–201.
2. Marwitz J.D., and Berry E.X. The airflow within the weak echo region of an Alberts hailstorm // J. Appl. Met. – 1971. – Vol. 10, N. 3. – P. 487–492.
3. Абшаев М.Т. Структура и динамика развития грозоградовых процессов Северного Кавказа // Труды ВГИ. – 1984. – Вып. 53. – С. 6–22.
4. Диневич Л.А., Старостин А.Н. и др. Эволюция полей радиоэха кучево-дождевых облаков и прикладные вопросы технологии активных воздействий // Материалы Всесоюзного семинара по физике образования градовых процессов и активным воздействиям на них. Нальчик. 1985. – М.: Гидрометеоиздат, 1988. – С. 123–129.
5. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеоиздат, 1991. – 425 с.
6. Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Ваксенбург С.Я., Шевела Г.Ф. Руководство по применению радиолокатора МРЛ-4, МРЛ-5, МРЛ-6 в системе градозащиты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 231 с.
7. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Барекова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. – Нальчик: Печатный двор, 2014. – 508 с.
8. Vasiloff S.V., Brandes E.A., Davies-Jones R.P. An investigation of the transition from Multicell to supercell storm // J. of Climate and Appl. Meteorology. – 1986. – Vol. 25. – P 1022–1036.
9. Березинский И.Н., Инююхин В.С., Кущев С.А. и др. Радиолокационные характеристики градовых облаков. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017620749. Заявка № 2017620085 от 30.01.2017.