

УДК: 551.515.4 + 551.501.81

DOI: 10.26907/rwp29.2025.388-391

## О СВЯЗЯХ ПРОЦЕССОВ ГРОЗО- И ГРАДООБРАЗОВАНИЯ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

М.Т. Абшаев<sup>1</sup>, А.М. Абшаев<sup>1</sup>, Ж.М. Геккиева<sup>2</sup>, Ю.П. Михайловский<sup>3</sup>,  
А.А. Синькевич<sup>3</sup>, М.Л. Торопова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научно-Производственный Центр «Антиград», г. Нальчик, E-mail: abshaev.ali@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик, julduz\_gekkieva@mail.ru

<sup>3</sup>ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория», г. Санкт-Петербург, sinkevich51@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены 15 кучево-дождевых облаков на которые проводилось воздействие кристаллизующим реагентом с целью сокращения ущерба от градобития. Изучаются функциональные соотношения между частотой грозовых разрядов и различными радиолокационными параметрами облаков, характеризующими их градовую активность. Получены положительные ковариации между парами грозовых и радиолокационных характеристик. Грозовая активность тесно связана со стадией развития облака, прямо пропорционально изменяясь с объемом, высотой повышенного радиозэха, водосодержанием и другими параметрами облаков. Вместе с тем, линейные и полиномиальные корреляционные соотношения более достоверны, когда в качестве зависимого аргумента выступают грозовые характеристики, а независимого – радиолокационные. Так наилучшие зависимости частот разрядов получены от максимальной высоты радиозэха, вертикально приведенной смешанной и градовой водности, превышением высоты 45 dBZ над нулевой изотермой, водосодержанию по уровню 45 dBZ и т.д.

**Ключевые слова:** грозоградовые процессы; кучево-дождевые облака; статистические закономерности; корреляционные связи; грозорегистратор; метеолокатор; противоградовая защита

## ON THE RELATIONSHIPS BETWEEN LIGHTNING AND HAIL FORMATION PROCESSES IN CONVECTIVE CLOUDS OF THE NORTH CAUCASUS

M.T. Abshaev, A.M. Abshaev, J.M. Gekkieva, Yu.P. Mikhailovsky, A.A. Sinkevich,  
M.I. Toropova

**Abstract.** Fifteen cumulonimbus clouds were examined that were exposed to a glaciogenic seeding to reduce hail damage. The functional relationships between the frequency of lightning discharges and various radar parameters of clouds characterizing their hail activity were studied. Positive covariances were obtained between all pairs of thunderstorm and radar characteristics. Thunderstorm activity is closely related to the stage of cloud development, changing in direct proportion to the volume, height of the increased radar echo, and water content of the cloud. At the same time, linear and polynomial correlation relationships are more reliable when thunderstorm characteristics act as a dependent argument, and radar characteristics act as an independent argument. Thus, the best dependences of discharge frequencies were obtained from the maximum height of the radar echo, the vertically integrated mixed and hail water content, the excess of the height of 45 dBZ over the zero isotherm, the water content at the level of 45 dBZ, etc.

**Keywords:** thunderstorm processes; cumulonimbus clouds; statistical regularities; correlation links; lightning recorder; weather radar; hail suppression

### Введение

В связи с ростом частоты опасных и неблагоприятных явлений погоды во многих регионах мира [1], в частности грозоградовой активности, все более актуальной задачей становится обеспечение безопасности населения. Это обусловлено необходимостью разработки и внедрения эффективных методов прогнозирования, мониторинга и предотвращения мощных градовых процессов, часто сопровождающихся сильными грозами, паводками и селевыми потоками, которые могут нанести существенный материальный ущерб и привести к человеческим жертвам. Актуальность прогнозирования грозы связана с учащением лесных пожаров, вызываемых молниями, на фоне глобального потепления, а также уязвимостью коммуникационной, транспортной и другой инфраструктуры.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование, направленное на выявление взаимосвязей между грозовой активностью градовых облаков (рассматривались разряды типа облако-облако (VHF), облако-земля положительной (LF+) и отрицательной

полярности (LF-)) и такими параметрами как максимальная радиолокационная отражаемость  $Z_m$  (dBZ), высота повышенного радиоэха ( $H_{Z_m}$ , км), вертикально интегрированное водосодержание ( $VIL$ , кг/м<sup>2</sup>) и т.д. Кроме того, проанализирована зависимость грозовой активности от стадий развития облаков.

Исследования проводились на основе анализа совмещенных в пространстве и времени данных двухволнового метеорологического радиолокатора МРЛ-5 (г. Ставрополь), оснащенного программно-техническим комплексом управления и обработки информации АСУ-МРЛ [2] и сети грозопеленгаторов LS8000 [3].

### Данные и методика исследования

В данном анализе рассматривается эволюция пятнадцати грозоградовых облаков, развивавшихся над территорией Ставропольского края, и на которые проводилось активное воздействие с целью предотвращения образования и выпадения града в соответствии с требованиями российской ракетной технологии противоградовой защиты [4].

Засев облака производится, когда его радиолокационные характеристики удовлетворяют критериальным значениям [4], позволяющим разделять облака на 4 градовые категории объектов воздействия (ОВ) (см табл. 1). Таким образом, все рассмотренные облака имели значения параметров не ниже 1-й категории ОВ. Большая часть из них имело 2-ю и 3-ю категорию ОВ.

В более ранней работе [5] было получено, что кристаллизующий засев градовых облаков приводит к статистически значимому увеличению частоты внутриоблачных грозowych разрядов и разрядов типа облако-земля отрицательной полярности, и резкому сокращению разрядов облако-земля положительной полярности. Это указывает на тесную связь между термодинамическими и микрофизическими процессами облаков с электрическими. Логично было бы оценить количественно эту взаимосвязь, например с помощью корреляционного и регрессионного анализов, что и сделано в следующем разделе.

Таблица 1. Критерии распознавания ОВ различных категорий

Категория ОВ	Тип ОВ	Критерии градоопасности			
I	Потенциально градоопасное	$0 < \Delta H_{Z_m} < 5$	$Z_m > 15$	$\Delta VIL > 0,5$	$\Delta VIL/\Delta t \geq 0$
II	Градоопасное	$\Delta H_{35} \geq 3$	$Z_m \geq 45$	$\Delta VIL > 2,0$	$\Delta VIL/\Delta t \geq 0$
III	Градовое	$\Delta H_{45} \geq 3$	$Z_m \geq 55$	$\Delta VIL > 8,0$	-
IV	Сверхмощное градовое	$\Delta H_{45} \geq 4$	$Z_m \geq 65$	$\Delta VIL > 16$	-

где:

$\Delta H_{Z_m}$  (км) – высота максимума радиоэха над уровнем нулевой изотермы  $H_0$ ;  $Z_m$  (dBZ) – максимальная радиолокационная отражаемость ОВ на длине волны  $\lambda = 10$  см;  $\Delta H_{35}$  и  $\Delta H_{45}$  (км) – превышение над уровнем  $H_0$  высот верхней границы объемов радиоэха с  $Z_m$ , равным 35 и 45 dBZ, соответственно;  $\Delta VIL$  – максимальное значение вертикально приведенной водности выше уровня  $H_0$  (кг/м<sup>2</sup>);  $\Delta VIL/\Delta t$  – прирост приведенной водности КЯ выше уровня  $H_0$  (кг/м<sup>2</sup>) за межобзорный интервал  $\Delta t$ , позволяющий оценивать тенденцию развития усиливающихся молодых градовых ячеек.

### Результаты

Ковариационный анализ показал положительную связь между большинством радиолокационных и грозowych характеристик облаков. С увеличением значений  $Z_m$ ,  $VIL$  и  $\Delta H_{45}$  растет частота разрядов VHF и LF, т.е. грозовая активность возрастает по мере усиления процесса осадкообразования и развития облака. Наиболее интенсивная грозовая активность наблюдается в градовых облаках в стадии зрелости, когда  $Z_m$  превышает 65 dBZ. Первые разряды всех типов в стадии развития облака фиксируются в зонах повышенной отражаемости и водности. Разряды LF+ и LF- в зрелых градовых облаках также продолжают наблюдаться в областях повышенной отражаемости, преимущественно на наветренном фланге облака, в то время как большая часть VHF разрядов смещается на подветренный фланг (рис. 1).

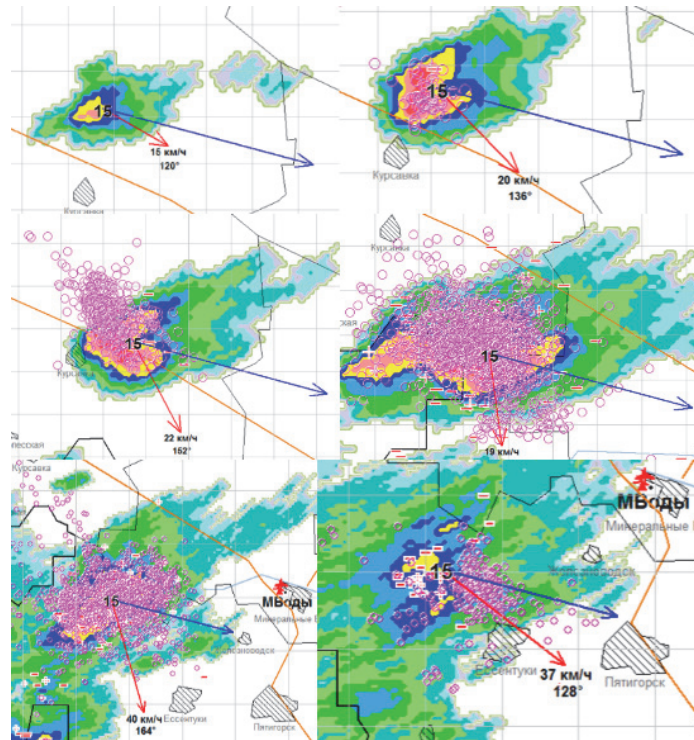


Рис. 1. Положение внутриоблачных (розовые кружочки) разрядов и разрядов облако-земля положительной (+) и отрицательной (-) полярности на разных стадиях развития облака, слева-направо и сверху-вниз – стадии зарождения, роста, квази-стационарности и диссипации

Множественный регрессионный анализ на основе методов описательной статистики показал, что наибольшая корреляция параметра градовой категории облака ОВ (зависимая переменная) наблюдается с независимыми переменными  $\Delta H_{45}$  (0,82),  $\Delta VII$  (0,7) и  $\Delta V_{45}$  (0,68), а с частотой разрядов LF и VHF типов – всего 0,38 и 0,31 соответственно.

Размер града имеет максимальную корреляцию с максимальной отражаемостью  $Z_m$  (0,72), с верхней границей облака  $H_T$  (0,497) и  $\Delta H_{45}$  (0,491170); корреляция с частотой разрядов LF и VHF типов составила только 0,36 и 0,22 соответственно, что очень слабо.

Интенсивность градовых осадков имеет наибольшую зависимость от максимальной отражаемости  $Z_m$  (0,45), а с частотой разрядов всех типов – менее 0,18.

С другой стороны, зависимость частоты VHF разрядов максимальна от  $\Delta M_{35}$  (0,45),  $\Delta V_{45}$  (0,443) и  $\Delta M_{15}$  (0,44). Разряды LF- отрицательной полярности зависят от  $\Delta H_{15}$  (0,5),  $\Delta H_{45}$  (0,48),  $VII$  (0,45) и площади градовых осадков (0,41). Разряды LF+ положительной полярности зависят от  $H_T$  (0,53),  $\Delta H_{15}$  (0,53),  $VII$  (0,46),  $VIII$  (0,47).

Полученные корреляции показывают, что радиолокационные критерии больше подходят на роль независимой переменной, в то время как грозовые характеристики выступают в качестве зависимой переменной, указывая, вероятно на вторичность электрических процессов и первичность термодинамических и микрофизических процессов. Исходя из этого, представляется более перспективным поиск зависимостей частот грозовых разрядов от радиолокационных параметров, а не наоборот, что и представлено в таблице 2.

### Выводы и заключение

Проведенные исследования взаимосвязей между радиолокационными и грозовыми характеристиками градовых облаков показали, что большинство параметров облака, такие как радиолокационная отражаемость, объем повышенного радиоэха, водность, максимальный размер града и интенсивность осадков имеют положительную ковариацию с частотой грозовых разрядов, то есть при увеличении значений одних, увеличиваются и другие, и наоборот.

В то же время регрессионный анализ показал, что линейные и полиномиальные зависимости между радиолокационными и грозовыми характеристиками имеют лучшую корреляцию, когда в качестве независимой переменной выступают такие параметры, как

максимальная отражаемость, превышение уровня 45 dBZ над нулевой изотермой, объем и водосодержание облака выше нулевой изотермы, вертикально приведенная водность облака и т.д., а зависимой выступают частоты разных типов. По всей видимости, это подчеркивает вторичность электрических процессов в облаках.

Влияние кристаллизующего засева градовых облаков, исходя из результатов, полученных в работе [5], может приводить к изменениям в микрофизических процессах в облаке, что в итоге способствует перераспределению энергетики и спектра частот грозových разрядов от более мощных типа облако-земля к более слабым типа облако-облако. В этой связи, полученные связи будут отличаться от облаков, развивавшихся в естественном режиме. В дальнейших исследованиях планируется провести сравнение корреляционных связей облаков без засева и с засевом, что может позволить обнаружить различия между ними, и оценить, насколько значимо искусственное воздействие на ход физических процессов в мощных градовых облаках.

Таблица 2. Корреляции между грозowymi и радиолокационными характеристиками

Переменная	Частота VHF разрядов, мин <sup>-1</sup>	Частоты LF- разрядов, мин <sup>-1</sup>	Частоты LF+ разрядов, мин <sup>-1</sup>
Zmax (dBZ)	0,288684	0,378425	0,360134
Htop (км)	0,364047	<b>0,474023</b>	<b>0,532520</b>
Категория ОБ	0,313932	0,372587	0,307420
H[Zmax] (км)	0,171618	0,109217	0,221803
dH[Zmax] (км)	0,138220	0,054270	0,105612
H45 (км)	0,341470	<b>0,469002</b>	0,441068
dH45 (км)	0,360125	<b>0,484610</b>	0,421135
V45 (км <sup>3</sup> )	<b>0,443194</b>	0,371172	0,400677
dV45 (км <sup>3</sup> )	<b>0,443097</b>	0,307362	0,316022
M15 (тон)	<b>0,432746</b>	0,386147	<b>0,454818</b>
M45 (тон)	<b>0,434885</b>	0,391630	<b>0,473296</b>
dM45 (тон)	<b>0,435144</b>	0,342721	0,412772
VIL (кг/м <sup>2</sup> )	0,427194	<b>0,451119</b>	<b>0,496346</b>
dVIL[0] (кг/м <sup>2</sup> )	0,427212	0,411649	<b>0,456583</b>
dVIL[-6] (кг/м <sup>2</sup> )	0,429359	0,408023	<b>0,450345</b>
VIH (кг/м <sup>2</sup> )	0,390426	0,397683	<b>0,468953</b>

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-27-00219).

#### Список литературы

1. Smith, Adam. (2021). The Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019).
2. Абшаев, М.Т. Автоматизированная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормоповещения / М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев, А.М. Малкарова, М.В. Жарашуев // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естест. науки. – Ростов-на-Дону. – 2010. – № 1. – С. 109–113.
3. Аджиев А.А., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 1. – С. 5–11.
4. Руководство по организации и проведению противоградовых работ / Абшаев А.М. Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Бареева М.В. – Нальчик: Печатный двор, 2014. – 500 с.
5. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Геккиева Ж.М., Аджиев А.Х. Исследование влияния кристаллизующего засева на грозовую активность конвективных облаков // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 8. – С. 46–58. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-8-46-58>