

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-152-164>

УДК 551.515.4

## **Пространственно-временная изменчивость грозовой активности на территории Северного Кавказа**

*А.Х. Аджиев, З.М. Керефова, Р.А. Гятов*

*Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия  
zknyaz-kbsu@mail.ru*

Выполнен анализ данных многолетних наблюдений (с 2008 по 2019 год) за грозовой активностью на территории Северного Кавказа грозопеленгационной сети ФГБУ «ВГИ» с пространственно-разнесенными датчиками LS8000 и LS7002. Установлены климатические и орографические региональные факторы, формирующие пространственную неоднородность грозоразрядной деятельности на рассматриваемой территории. Показано, что количество грозовых явлений, их продолжительность и интенсивность молниевых разрядов определяют микрофизические процессы в атмосфере, а именно интенсивность облако- и осадкообразования.

*Ключевые слова:* грозовая активность, климат, молнии, грозопеленгационная сеть, осадки, радиолокация

## **Spatiotemporal variability of thunderstorm activity in the North Caucasus**

*A.H. Adzhiev, Z.M. Kerefova, R.A. Gyatov*

*High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia  
zknyaz-kbsu@mail.ru*

The analysis of the long-term observations (2008–2019) of thunderstorm activity in the North Caucasus using the High-mountain Geophysical Institute lightning detection network with LS8000 and LS7002 sensors is performed. Climatic and orographic regional factors forming the spatial heterogeneity of thunderstorm activity in the analyzed region are identified. It is shown that the number of thunderstorm events, their direction and lightning discharge intensity determine microphysical processes in the atmosphere, namely, the intensity of cloud and precipitation formation.

*Keywords:* thunderstorm activity, climate, lightning, lightning detection network, precipitation, radar

### **Введение**

Факторы грозовой активности относятся к числу наиболее опасных явлений погоды. Грозы реализуются в виде молний различных типов – наземных и облачных. Воздействия молний особо опасны для жизни человека и негативно сказываются на безопасность авиации, линии электропередач и другие погодозависимые объекты.

Поскольку вероятностные распределения параметров молний могут существенно отличаться по территориям, имеющим различные физико-географические характеристики, необходимо получить данные о грозоразрядной деятельности для конкретной местности. Не учет этого обстоятельства при решении задач молниезащиты различных объектов приводит обычно к занижению или неоправданному завышению уровней надежности грозозащиты, а следовательно, и к экономическим потерям.

Главными параметрами для расчетов молниезащиты объектов и сооружений являются среднегодовая плотность ударов молнии в поверхность земли и продолжительность гроз.

В этой связи целью настоящей работы является оценка региональных факторов грозовой активности на территории Северного Кавказа. Для этого использована грозопеленгационная сеть (ГПС) ФГБУ «ВГИ» с пространственно-разнесенными датчиками LS8000 и LS7002. Датчики грозопеленгационной сети разнесены на расстояния 70–100 км и имеют по две антенны для приема электромагнитного излучения молниевых разрядов: в низкочастотном (LF) и высокочастотном (VHF) диапазонах длин волн.

Принимаемое датчиками ГПС электромагнитное излучение молнии передается по спутниковому каналу связи в центральный сервер, где после обработки программным обеспечением формируется следующая информация о каждом молниевом разряде:

- Дата и время. Разницу времени прихода электромагнитного излучения молнии датчиками (грозопеленгаторами) ГПС определяет с точностью до 100 наносекунд.

- Координаты места разряда (широту, долготу) в системе геодезических координат (WGS-84).

- Максимальное значение тока в канале разряда молнии «облако-земля», в кА.

- Классификация молний на виды: разряды «облако-земля» или разряды «внутриоблачные» и «облачные».

- Классификация (разделение) разрядов молний «облако-земля» на положительные и отрицательные. ГПС LS8000 определяет полярность молнии «облако-земля» по знаку нейтрализуемого заряда. Если нейтрализуется отрицательный заряд, то молния отрицательная, если нейтрализуется положительный заряд – молния положительная. Для облачных и межоблачных молний ГПС не определяет знак (полярность) нейтрализуемого заряда.

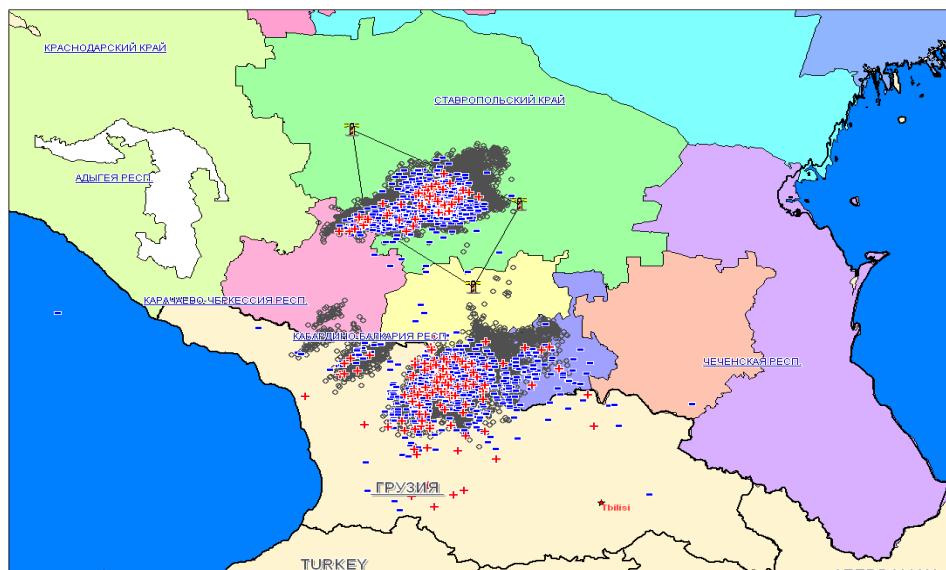
- Время роста тока молнии «облако-земля» до пикового значения, в мкс.

- Время спада сигнала от пикового значения до нуля, в мкс.

- Максимальное значение скорости увеличения сигнала (крутизна тока молнии), в кА/мкс.

Система грозопеленгации вышеуказанную информацию о молниях принимает со всей территории Северного Кавказа, архивирует ее и

передает потребителям. Для разрядов «облако-земля» радиус области обзора равен около 625 км от центра сети ГПС, а разрядов «облако-облако» – 325 км. Область охвата системы покрывает территории юга европейской части России и республик Закавказья. Пример отображения на карте местности получаемых грозопеленгационных данных о молниевых разрядах на территории Северного Кавказа за грозовой день представлен на рис. 1. По такому рисунку можно судить о местоположении и границах грозовой деятельности за конкретный день. При этом контроль ведется в режиме реального времени. В ГПС предусмотрены комплексирования грозоразрядной информации с радиолокационной и спутниковой информацией наложением координат разрядов молний на радиоэхо облаков и космоснимки.



"+" – молнии на землю положительной полярности;

"-" – молнии на землю отрицательной полярности;

"o" – облачные разряды;

 – пункты размещения грозопеленгаторов LS8000 на Северном Кавказе.

**Рис. 1.** Наложения разрядов молний на картосхему Северного Кавказа.

**Fig. 1.** Superposition of lightning discharges with a map of the North Caucasus.

Для определения среднестатистических характеристик грозовой деятельности в работе использованы многолетние данные с 2008 по 2019 г. указанной грозопеленгационной сети.

Проданный анализ данных с грозопеленгационной системы LS8000 подтверждает, что по территории Северного Кавказа наземные молнии распределены неравномерно.

Во всем мире создаются гронопеленгационные системы для предупреждения о появлении опасных грозовых облаков. Широко используется современная гронопеленгационная система LS8000, которая фиксирует радиоизлучение от электрических разрядов в двух диапазонах длин волн VHF = Very High Frequency range (110–118 МГц) и LF = Low Frequency range (30–350 КГц). При интерпретации результатов измерений считается, что в диапазоне LF регистрируется около 30 % разрядов «облако-облако» и «облако-земля», а в диапазоне VHF регистрируются все разряды, включая внутриоблачные.

Для расчета грозозащитных мероприятий необходимо знать конкретную величину, характеризующую грозовую деятельность в данной местности. Такой величиной является интенсивность грозовой деятельности, которую принято определять числом грозовых часов или грозовых дней в году, вычисляемых как среднеарифметическое значение за ряд лет наблюдений.

Плотность ударов молнии в землю, или удельная поражаемость, выраженная через число поражений 1 км<sup>2</sup> земной поверхности за год, определяется по данным метеорологических наблюдений в месте размещения объекта. Если же плотность ударов молнии в землю  $n$  (1/км<sup>2</sup> год) неизвестна, ее можно рассчитать по следующей формуле:

$$n = 6,7 \cdot \frac{T}{100}, \quad (1)$$

где  $T$  – среднегодовая продолжительность гроз в часах.

На рис. 2 приводятся осредненные значения поражаемости молниями на территориях Западного Кавказа, Центрального Кавказа и Восточного Кавказа, полученные по данным ГПС.



**Рис. 2.** Поражаемость Северного Кавказа наземными молниями.

**Fig. 2.** The susceptibility of the North Caucasus to ground-based lightning.

Как видно из рисунка, наибольшая удельная поражаемость молниями наблюдается на юге Западного Кавказа, в районе побережья Черного моря – до 12 молний/км<sup>2</sup>·год. Наименьшая удельная поражаемость молниями наблюдается на территории северо-восточной части Восточного Кавказа – от 0,5 молний/км<sup>2</sup>·год.

В горных районах большая часть разрядов молний происходит между разноименными областями в облаках или между разными облаками, поэтому удельная поражаемость существенно меньше, чем на равнине. Территории земной поверхности, где имеются слои почвы с высокой электропроводностью, как показывают наблюдения, также поражаются молниями. Избирательно могут поражаться участки, где проложены протяженные металлические коммуникации (кабели, трубопроводы, подземные хранилища). Избирательно поражаются возвышающиеся над поверхностью земли металлические объекты (трубы, вышки и др.).

Проанализированы основные факторы, формирующие пространственно-временную неоднородность грозовой активности на Северном Кавказе. Выявлена значительная неоднородность удельной поражаемости рассматриваемой территории молниями, которая формируется за счет действия следующих факторов:

- различие погодно-климатических условий территорий региона, отличающихся как по высоте, так и по местоположению;

- разное количество грозовых дней по регионам: на территории Восточного Кавказа – до 60 дней с грозой в году, Центрального Кавказа – до 40 дней с грозой в году; Западного Кавказа – 10–15 дней с грозой в году;

- разные значения среднегодовой продолжительности гроз по регионам: на территории Восточного Кавказа – до 100 часов в году, Центрального Кавказа – до 60 часов в году; Западного Кавказа – до 20–30 часов в году;

- орографические особенности территорий.

Климатические условия в регионе различаются как по высоте, так и по местоположению. Температура воздуха снижается по мере увеличения высоты в горах и увеличивается по мере приближения к морю [1]. Средняя годовая температура в районе Сухуми составляет +12 °С, на склонах гор при высоте 4000 метров температура может опуститься до -10 °С. В северной части Большого Кавказского хребта температура всегда на 5 °С ниже, чем на южных склонах. На Северном Кавказе преобладает континентальный климат, характеризующийся жарким летом и морозной зимой.

Климатическая картина в регионе достаточно разнообразна и в зависимости от времени года изменчива. В летнее время года большое количество тепла влияет на радиационный баланс, поэтому описывают его как тропический [5]. Зимой картина примерно похожая, с приходом холодов наблюдаются положительные значения радиационного баланса тоже из тропиков.

Такое расположение климатических особенностей обусловлено следующей циркуляцией атмосферы: в летний период времени года с южной

части Северного Кавказа наступают субтропические области с повышенным давлением и приносят тропический воздух из Азии. Отметим, что благодаря субтропическому климату в летнее время – это период сухого и жаркого воздуха. Исключением является западная часть Закавказья, тут процесс циркуляции атмосферы сбивается за счет дождей местного происхождения. В зимнее время года в районах Черноморского побережья, в западной части Большого Кавказа проходят средиземноморские воздушные массы с определенными характеристиками, а в южной стороне региона – иранские.

Разница температур между западной и восточной частью вполне ощутима: в западной части средняя температура в середине лета составляет 21–25 °С, в восточной части – 26–30 °С. Высокие температуры отмечаются на Кура-Араксинской низменности, где температура воздуха в летний период достигает 35 °С.

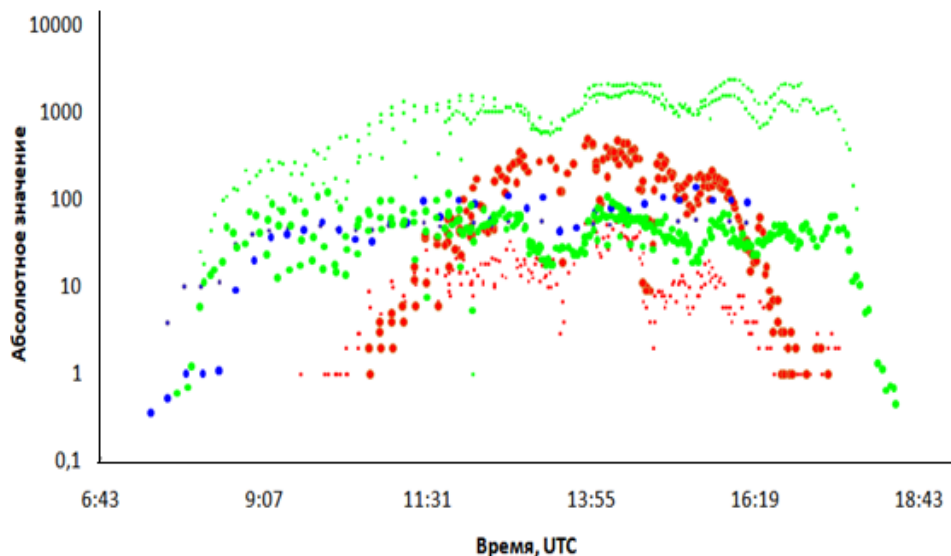
В горах температура воздуха зависит от высоты. На Черноморском побережье температура 13–15 °С, в предгорьях – 7–9 °С, на высоте выше 4500 метров температура воздуха в летнее время от 0 до минус 5 °С [2].

Среднегодовое количество осадков растет преимущественно с востока на запад. При этом в горной части осадков гораздо больше, чем в низменной части. Северо-восточная часть и Малый Кавказ являются сухими областями, дождей и снега тут выпадает не так много. Среднее годовое количество осадков в западной части – 800–3500 мм, в восточной и северной части – 500–2000 мм, в районах Сочи и Адлера – 4200 мм, Прикаспийской низменности – 300 мм.

Нами была выбрана общепринятая классификация климата Кеппена – Гейгера [8, 9]. Она делит климат на пять основных климатических групп, каждая из которых делится на основе сезонных осадков и температурных режимов. Рассматриваемый нами регион можно отнести по этой классификации к субтропическому климату. В западной части климат теплый, умеренный, с теплым и сухим летом (Csb – средиземноморский климат). В средней и южной части климат влажный, континентальный, с жарким летом, осадки выпадают в течение всего года (Dfb – умеренный (влажный) континентальный климат). В восточной части климат полузасушливый (BWh – жаркий степной (семиаридный) климат). За год количество осадков значительно меняется по территории. В августе в западной части выпадает около 80 мм, в центральной – 45 мм, восточной – 36 мм осадков. Август является самым теплым месяцем для всех трех областей. Учитывая, что процесс электризации и молниевая активность обуславливаются интенсивностями облако- и осадкообразования [6, 7], отмеченные особенности климата Северного Кавказа и приводят к различию грозовой активности по территории.

Проведенные исследования показали, что продолжительность грозы и количество разрядов молний определяются интенсивностью облако- и осадкообразования. Изменение во времени частоты молниевых разрядов

по данным грозопеленгации, интенсивности осадков по спутниковым данным, объема облака с отражаемостью не ниже 45 dBZ и вертикально интегрированной водности облака по данным радиолокаторов показано на рис. 3.

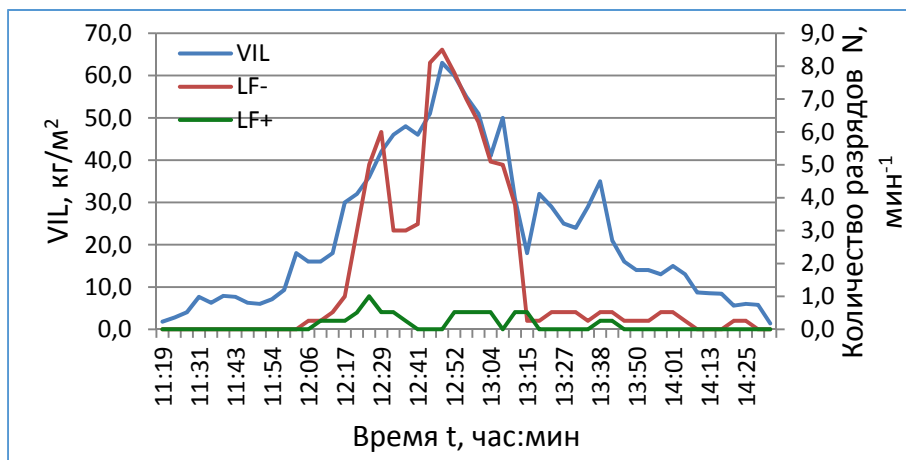


- интенсивность молниевых разрядов LF-типа (наземные молнии) по данным LS8000;
- объем облака с отражаемостью 45 dBZ, км<sup>3</sup>;
- интенсивность молниевых разрядов VHF-типа (облачные молнии) по данным LS8000;
- интенсивность осадков по данным Метеосат-10, мм/ч;
- объем облака с VIL, кг/м<sup>2</sup>.

**Рис. 3.** Ход спутниковых, радиолокационных и грозовых характеристик суперячейкового конвективного облака.

**Fig. 3.** The course of satellite, radar and lightning characteristics of a supercell convective cloud:

За рассмотренный промежуток времени видим, что все параметры почти синхронно проходят стадии роста и уменьшения. Наилучшая синхронность отмечается между изменениями радиолокационных и спутниковых параметров облака. При этом радиолокационные характеристики достигают своих максимумов раньше, чем максимум молниевой активности. Вероятно, это связано с тем, что электрические процессы являются следствием микрофизических преобразований в облаке. Частота молний для данного случая не может служить репрезентативной характеристикой опасных явлений погоды на всей территории развития суперячейки. Этот факт хорошо демонстрирует рис. 4, где представлены временной ход вертикального интегрированного водосодержания (VIL, кг/м<sup>2</sup>) и количество наземных молний положительной и отрицательной полярности в грозовом облаке (15.05.2016).



**Рис. 4.** Временной ход вертикального интегрированного водосодержания (VIL, кг/м<sup>2</sup>) и количества наземных молний положительной и отрицательной полярности в грозо-градовом облаке (15.05.2016).

**Fig. 4.** Time course of the vertical integrated water content (VIL, kg/m<sup>2</sup>) and the number of ground-based lightning of positive and negative polarity in a hail-storm cloud (05.15.2016).

В то же время, как было показано ранее, в зоне уверенной регистрации интенсивность грозовых разрядов может использоваться для решения задач наукастинга или краткосрочного прогноза развития и перемещения грозо-градовых облаков, особенно в период развития и зрелости облака, и обладает некоторыми преимуществами в сравнении с радиолокационными и спутниковыми характеристиками [10].

Приведенные рисунки показывают, что микрофизические процессы в атмосфере – образование конвективных облаков, осадкообразование и их интенсивность в регионе – определяют количество и продолжительность грозовых явлений и интенсивность молниевых разрядов. Эти процессы в различных частях Северного Кавказа, на Восточном Кавказе, Центральном Кавказе и Западном Кавказе протекают с разной продолжительностью и интенсивностью. Важным фактором формирования осадков и, как следствие, грозы являются также горы Большого Кавказа, высота над уровнем моря которых с востока на запад убывает.

Анализ связей радиолокационных данных, определяющих осадкообразование с электрическими характеристиками [11], показал, что они достаточно тесно связаны друг с другом для облаков Северного Кавказа. В частности, частоты молний в НЧ и СВЧ диапазонах коррелируют с объемом переохлажденной части с отражаемостью более 35 дБZ и коэффициентом корреляции  $r$ , равным 0.8 и 0.95 соответственно. Таким образом, частоты молний могут использоваться для прогноза и диагноза ливневых осадков и града.

По результатам анализа многолетних данных с 2008 по 2019 г. с ГПС LS8000 наблюдается снижение грозовой активности на территории Восточного Кавказа и в равнинной части Центрального Предкавказья. В центральных районах существенных изменений режима гроз не зафиксировано, в то время как в предгорной зоне имеет место возрастание грозовой активности, выражающееся в увеличении как числа дней с грозой, так и суммарной продолжительности гроз.

В таблице приведены среднемесячные и среднегодовые значения числа грозовых дней и продолжительности гроз на Северном Кавказе по месяцам за период с 2008 по 2019 г. по данным ГПС ФГБУ «ВГИ».

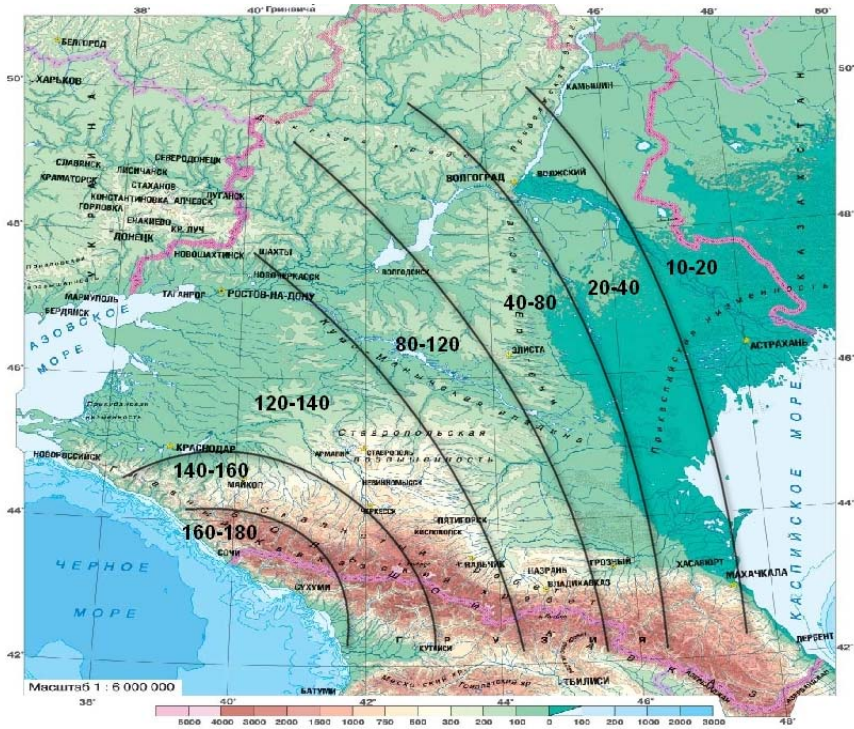
**Таблица.** Число дней с грозой и суммарная продолжительность гроз в месяц на территории Северного Кавказа

**Table.** The number of days with thunderstorms and the total duration of thunderstorms in the North Caucasus

Месяцы	Число дней с грозой, дни	Продолжительность гроз, часы
1	1	6.0
2	2	10.8
3	4	19.8
4	8	51.6
5	21	209.54
6	26	281.78
7	25	287.62
8	19	234.87
9	13	164.05
10	10	77.76
11	4	25.20
12	3	10.05
Всего	136	1379.07

На Северном Кавказе грозовые явления имеют место во все периоды года. Из таблицы видно, что наибольшее число дней с грозой и наибольшая продолжительность гроз на Северном Кавказе наблюдаются в июне и июле. Наименьшее число дней с грозой – в зимний период. В течение года наблюдается синхронный ход грозовой активности и продолжительности гроз.

На рис. 5 представлена полученная с помощью инструментальных данных LS8000 карта среднегодовой продолжительности гроз на Северном Кавказе [3].



**Рис. 5.** Карта среднегодовой продолжительности гроз на Северном Кавказе, построенная по инструментальным наблюдениям LS8000.

**Fig. 5.** A map of the average annual duration of thunderstorms in the North Caucasus, based on instrumental observations of LS8000.

К основным причинам изменения режима грозовой активности можно отнести потепление климата, а также изменения атмосферной циркуляции. В целом по территории Северного Кавказа наблюдается незначительный региональный положительный тренд увеличения количества дней с грозой (5 дней/10 лет), а также увеличение количества молниевых вспышек за один грозовой процесс.

Трансформация динамической структуры фронтальных поверхностей в условиях Центрального Предкавказья происходит при их движении к югу и по мере перехода рельефа от равнинного к горному. Это обуславливает определенную трансформацию полей метеоэлементов в нижней тропосфере, которая инициирует развитие конвекции или тормозит ее. При этом теоретически показано [4], что рельефу принадлежит исключительно важная роль в процессе формирования и развития конвективных процессов в атмосфере, вплоть до возникновения конвективных движений в условиях отрицательной плавучести. Произшедшие изменения атмосферной циркуляции в связи с потеплением климата усилили действие динамических процессов, что привело к повышению грозовой активности в южных

и юго-западных районах Центрального Предкавказья в условиях относительно больших высот и значительной расчлененности рельефа.

Сильные электрические поля в атмосфере, возникающие в кучево-дождевых облаках проявляются в виде электрических разрядов различной протяженности и формы. Появление электрических зарядов в облаках и последующих электрических разрядов тесно связано с микрофизическими и динамическими процессами. Этим вопросам посвящено довольно много публикаций. Здесь можно отметить работы специалистов ГГО, которые показали, что появление кристаллической фракции в конвективных облаках сопровождается увеличением напряженности электрического поля [6, 7]. Прайс и Райнд [10] определили, что частота молний пропорциональна скорости восходящего потока в степени 4,55.

На протяжении последних лет значительные усилия прилагались для получения корреляционных связей между частотой разрядов и высотой верхней границы облака, полученной из радиолокационных данных [11], частотой разрядов и максимальным значением радиолокационной отражаемости на разных высотах [3], а также частотой разрядов и количеством ледяных кристаллов, полученных по результатам радиолокационных измерений [4].

Учитывая значимость контактного механизма электризации для заряжения облачных частиц, можно ожидать тесной связи между микрофизическими характеристиками облака, частотой электрических разрядов и динамикой напряженности электрического поля атмосферы. В большинстве исследованных случаев разряды предшествовали появлению осадков. Все исследователи указывают на региональные и сезонные особенности полученных связей.

На сегодняшний день пока не получены достаточно строгие зависимости между микрофизическими и динамическими процессами в облаках и характеристиками электрических разрядов и электрическими полями в облаке и под облаком.

### **Заключение**

Выполнен анализ данных многолетних наблюдений за грозами на территории Северного Кавказа с использованием грозопеленгационной сети с пространственно-разнесенными датчиками LS8000 и LS7002. Получено, что наибольшее число дней с грозой (до 26 дней) и наибольшая продолжительность гроз (до 287 часов) на Северном Кавказе наблюдаются в июне и июле. Наименьшее число дней с грозой (1–2 дня) и наименьшую продолжительность гроз (6–10 часов) наблюдаем в зимний период. Наблюдается синхронный ход в течение года грозовой активности и продолжительности гроз. На Северном Кавказе грозовые явления имеют место во все периоды года.

Показано, что продолжительность грозы и количество разрядов молний определяются интенсивностью облако- и осадкообразования. Микрофизические процессы в атмосфере – образование конвективных облаков,

осадкообразование и их интенсивность в регионе – определяют количество и продолжительность грозовых явлений и интенсивность молниевых разрядов. Проанализированы климатические и орографические факторы, формирующие пространственную неоднородность грозоразрядной деятельности по территории Северного Кавказа.

### Список литературы

1. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Попов В.Б., Аджиев А.Х. Исследование дистанционными радиофизическими средствами особенностей развития процессов электризации и градообразования в суперячейковом облаке // Труды ГГО. 2020. Вып 596. С. 96-130.

2. Аджиева А.А., Кондратьева Н.В. Изменение климата и гидрометеорологические явления в горных районах Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. 2009. Т. 1, № 1. С. 68-72.

3. Аджиева А.А., Кереева З.М., Гятов Р.А., Тумгоева Х.А. Исследование числа дней с грозой и продолжительности гроз в году на территории Северного Кавказа // Успехи современного естествознания. 2020. № 8. С. 32-36.

4. Бадахова Г.Х., Лапшинов Ю.К., Шмигельский В.А. Динамика и современный режим грозовой активности над Центральным Предкавказьем // Наука. Инновации. Технологии. 2018. № 4. С. 117-130.

5. Барашкова Е.П., Гаевский В.Л., Дьяченко Л.Н., Лугина К.М., Пивоварова З.И. Радиационный режим территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 528 с.

6. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Каплева Л.В. О контроле электрического генератора конвективных облаков для прогноза и диагноза опасных явлений погоды // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. Нальчик: АЭТЕРНА, 2017. С. 320-327.

7. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д., Гопалакришнан В., Довгалою Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Куров А.Б., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 31-45.

8. Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Wood E.F. Present and future 374 Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution // Sci. Data. 2018. № 5. P. 180-214.

9. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate 376 classification // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2007. № 11 (5). P. 1633-1644.

10. Price C., Rind D. A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97, no. D9. P. 9919-9933.

11. Ushio T., Heckman S.J., Boccippio D.J., Christian H.J., Kawasaki Z.-I. A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106, no. D20. P. 24089-24095.

12. Zipser E.J., Lutz K.R. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? // Mon. Weather Rev. 1994. Vol. 122.

### References

1. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Mikhaylovsky Yu.P., Sinkevich A.A., Popov V.B., Adzhiev A.H. Investigation of the peculiarities of the development of electrification and hail formation processes in a SuperCell cloud by radiophysical means. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2020, vol. 596, pp. 96-130 [in Russ.].

2. Adzhieva A.A., Kondrat'eva N.V. *Izmenenie klimata i gidrometeorologicheskie yavleniya v gornyh rajonah Kavkaza. Ustoichivoe razvitie gornyh territorij*, 2009, vol. 1, no 1, pp. 68-72 [in Russ.].

3. Adzhieva A.A., Kerefova Z.M., Gyatov R.A., Tumgoeva H.A. Issledovanie chisla dney s grozoy i prodolzhitel'nosti groz v godu na territorii Severnogo Kavkaza. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2020, no. 8, pp. 32-36 [in Russ.].
4. Badakhova G.Kh., Lashmanov Yu.K., Shmigelsky V.A. Dynamics and modern regime of thunderstorm activity over Central Precaucasus territory. *Nauka. Innovacii. Tekhnologii* [Science. Innovations. Technologies], 2018, no. 4, pp. 117-130 [in Russ.].
5. Barashkova E.P., Gaevskiy V.L., D'yachenko L.N., Lugina K.M., Pivovarova Z.I. Radiacionnyy rezhim territorii SSSR. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1961, 528 p. [in Russ.].
6. Mihaylovskiy Yu.P., Sin'kevich A.A. Abshaev A.M., Adzhiev A.H., Kashleva L.V. O kontrole elektricheskogo generatora konvektivnykh oblakov dlya prognoza i diagnoza opasnykh yavleniy pogody // Doklady Vserossiyskoy konferencii po fizike oblakov i aktivnym vozdeystviyam na gidrometeorologicheskie processy. Chast' 1. Na'chik: AETERNA publ., 2017, pp. 320-327 [in Russ.].
7. Mikhailovskii Y.P., Sin'kevich A.A., Pawar S.D., Gopalakrishnan V., Dovgalyuk Yu.A., Veremei N.E., Bogdanov E.V., Kurov A.B., Adzhiev A.Kh., Malkarova A.M., Abshaev A.M. Investigations of the development of thunderstorm with hail. Part 2. Analysis of methods for the forecast and diagnosis of the electrical properties of clouds. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 6, pp. 377-387. DOI: 10.3103/S1068373917060036.
8. Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Wood E.F. Present and future 374 Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data*, 2018, no. 5, pp. 180-214.
9. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate 376 classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007, no. 11, vol. 5, pp. 1633-1644.
10. Price C., Rind D. A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions. *J. Geophys. Res.*, 1992, vol. 97, no. D9, pp. 9919-9933.
11. Ushio T., Heckman S.J., Boccippio D.J., Christian H.J., Kawasaki Z.-I. A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data. *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, no. D20, pp. 24089-24095.
12. Zipser E.J., Lutz K.R. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? *Mon. Weather Rev.*, 1994, vol. 122.

Поступила 23.03.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;  
принята в печать 06.10.2023.

Submitted 23.03.2023; approved after reviewing 20.09.2023;  
accepted for publication 06.10.2023.