



Научная статья

УДК 551.515.9

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.1.6>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ДЛИНАХ ВОЛН

Кайсын Борисович Лиев¹,
Ахмат Хисаевич Гергоков^{2*}

^{1,2} Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360030, Российская Федерация).

¹ buffy_li@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6940-9977>

² ahmat-0007@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1964-2199>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Настоящая статья представляет собой подробное исследование особенностей радиолокационного зондирования конвективных облачных систем образующихся и развивающихся на территории Юга России и сопровождаемых выпадением града. При выполнении данной работы было использовано современное радиолокационное оборудования двух модификаций: автоматизированный метеорологический радиолокатор типа МРЛ-5 с длиной волны 10 см и доплеровский метеорологический радиолокатор модификации ДМРЛ-С с длиной волны 5 см. Основной целью работы является идентификация дифференциальных эффектов, возникающих при регистрации ключевых радиолокационных характеристик указанных объектов на отличающихся длинах электромагнитных волн вследствие различия условий распространения и дифракционно-рассеивающих свойств радиоволн в атмосфере земли. Длина волны является ключевым параметром, определяющим характеристики радиолокатора и его применение при мониторинге состояния атмосферы.

Исследовательская деятельность включала сравнительный анализ эмпирических данных, полученных двумя указанными типами радиолокационных комплексов, с последующей оценкой факторов, оказывающих влияние на качество измерений соответствующих радиофизических параметров. В частности, особое внимание уделялось исследованию инструментальных погрешностей каждого прибора, обусловленных конструктивными особенностями, а также отсутствием взаимной градуировки аппаратуры.

Основное внимание уделяется комплексной количественной оценке уровня неопределенности радиолокационной диагностики потенциально опасных метеорологических процессов и разработке научно обоснованных рекомендаций, направленных на повышение объективности и достоверности радиолокационной информации. Приведённые предложения ориентированы на оптимизацию методик дистанционного контроля за состоянием атмосферы и повышение эффективности прогнозирования экстремальных гидрометеорологических ситуаций, имеющих критическое значение для защиты агропромышленного комплекса, авиационной деятельности и обеспечения общественной безопасности.

Ключевые слова: град, радиолокатор, МРЛ-5, ДМРЛ-С, радиолокационная отражаемость, радиолокационные наблюдения, градовые облака

Для цитирования: Лиев К. Б., Гергоков А. Х. Результаты исследований градовых облаков на различных длинах волн // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 1. С. 147–164. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.1.6>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.11.2025;
одобрена после рецензирования 13.01.2026;
принята к публикации 15.02.2026.

**1.6.18. Atmospheric and climate sciences
(physical and mathematical sciences)**
Research article

**Results of studies of hail clouds at various
wavelengths**

**Kaisyn B. Liev¹,
Akhmat H. Gergokov^{2*}**

^{1,2} Highland Geophysical Institute (2, Lenin Avenue, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360030, Russian Federation)

¹ buffy_li@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6940-9977>

² ahmat-0007@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1964-2199>

* Corresponding author

Abstract.

This article presents a detailed study of the features of radar sensing of convective cloud structures accompanied by hail fall, performed using modern radar equipment of two modifications: an automated meteorological radar of the MRL-5 type and a Doppler meteorological radar of the DMRL-S modification. The main goal of the work is to identify the differential effects that occur when key radar characteristics of these objects are recorded at different wavelengths of electromagnetic waves due to the differences in propagation conditions and the diffraction and scattering properties of radio waves in the atmosphere.

The research activity included a comparative analysis of the empirical data obtained by the two specified types of radar systems, followed by an assessment of the factors affecting the quality of measurements of the corresponding radiophysical parameters. In particular, special attention was paid to the study of the instrumental errors of each device, which were caused by the design features and the lack of mutual calibration of the equipment.

The main body of the text is devoted to a comprehensive quantitative assessment of the level of uncertainty in radar diagnostics of potentially dangerous meteorological processes and the development of scientifically based recommendations aimed at increasing the objectivity and reliability of radar information. The proposed recommendations are focused on optimizing remote monitoring techniques for the state of the atmosphere and improving the efficiency of forecasting extreme hydro meteorological situations that are critical for protecting the agro-industrial complex, aviation activities, and ensuring public safety.

Keywords:

hail, radar, MRL-5, DMRL-S, radar reflectivity, radar observations, hail clouds

For citation:

Liev KB, Gergokov AH. Results of studies of hail clouds at various wavelengths. *Science. Innovations. Technologies.* 2026;(1):147-164. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.1.6>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 06.11.2025;
approved after reviewing 13.01.2026;
accepted for publication 15.02.2026.

Введение

Исследование особенностей радиолокационного наблюдения градовых облаков является важной задачей метеорологии и климатологии [1, 2]. Градовые облака представляют собой одну из форм конвективных явлений, способных приводить к значительным разрушениям и ущербу. Для эффективного мониторинга и прогнозирования таких явлений необходимы точные методы наблюдения и анализа [3, 4].

Радиолокационные системы являются одними из ключевых инструментов для изучения атмосферных процессов. Они позволяют получать детальную информацию о структуре и динамике облаков, включая высоту, влажность и распределение осадков [5, 6, 7]. Однако точность измерений зависит от множества факторов, включая длину волны, мощность сигнала и чувствительность приемников [8, 9].

Цель настоящей работы заключается в анализе различий в результатах измерений радиолокационных параметров градовых облаков [10,11], полученных с использованием разных типов радиолокаторов. Особое внимание уделяется сравнению данных, собранных с помощью автоматизированного радиолокатора МРЛ-5 [12, 13, 14] и доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С [15, 16].

Материалы и методы исследований

Особенности интерпретации данных двух радиолокаторов сводятся к следующему:

- разница результатов измерения радиолокационных параметров на двух различных длинах волн связана с особенностями их рассеивающих свойств в градовом облаке [17];
- за эталон принимались значения, полученные на автоматизированном радиолокаторе МРЛ-5;
- данные, полученные на радиолокаторе ДМРЛ-С с интервалом 10 минут, сопоставляются с данными МРЛ-5 (интервал 3,5 мин) по ближайшему времени;
- инструментальные погрешности в измерениях могут быть связаны с ослаблением радиоволн на более

короткой длине волны $\lambda = 5,3$ см и отсутствием взаимной калибровки радиолокаторов на дождь [18, 19, 20].

Анализ отличий радиолокационных характеристик градового облака 08.05.25 г.

Исследуемое облако в 14:00 располагалось юго-западе г. Ставрополя. От радиолокатора МРЛ-5 Ставропольской ВС облако в это время находилось на расстоянии 63 км в азимуте 210° . От радиолокатора ДМРЛ-С облако находилось на том же расстоянии, так как дистанция между этими двумя радиолокаторами составляет 170 метров, можно считать, что это одна и та же позиция. Для радиолокатора МРЛ-5 Краснодарской ВС облако находилось на расстоянии 66 км в азимуте 77° . Расстояние для анализа для всех радиолокаторов одинаково, а значит репрезентативно.

На рисунке 1.1 приведена карта поля отражаемости для трёх радиолокаторов ДМРЛ-С с двумя МРЛ-5 в 15:29 с указанием расстояний. Для отображения использована карта «Максимальная отражаемость», получаемая для обоих радиолокаторов с помощью программы АСУ «МРЛ».

Для визуального представления о показаниях каждого из радиолокаторов на рисунке 2 представлены максимальные отражаемости для исследуемой градовой ячейки.

Анализируя карты отражаемости на рисунке 2, можно видеть некоторые отличия в структуре радиоэха облака, полученного на трёх радиолокаторах. Заметно, что радиолокатор ДМРЛ-С даёт более подробную информацию по слабой отражаемости, и это естественно учитывая, что длина волны вдвое меньше. Радиолокатор МРЛ-5 Краснодарской ВС, также даёт отличающуюся картинку из-за сильной интерполяции.

Вертикальный разрез ячейки отображен на рисунке 3 для ДМРЛ-С и двух МРЛ-5.

Здесь можно сделать выводы относительно структуры и мощности трёх отображений ячейки. Ввиду того, что радиолокатор МРЛ-5 наблюдал за облаком с противоположной стороны от двух других радиолокаторов, то и структура отличается. На разрезе также вид-

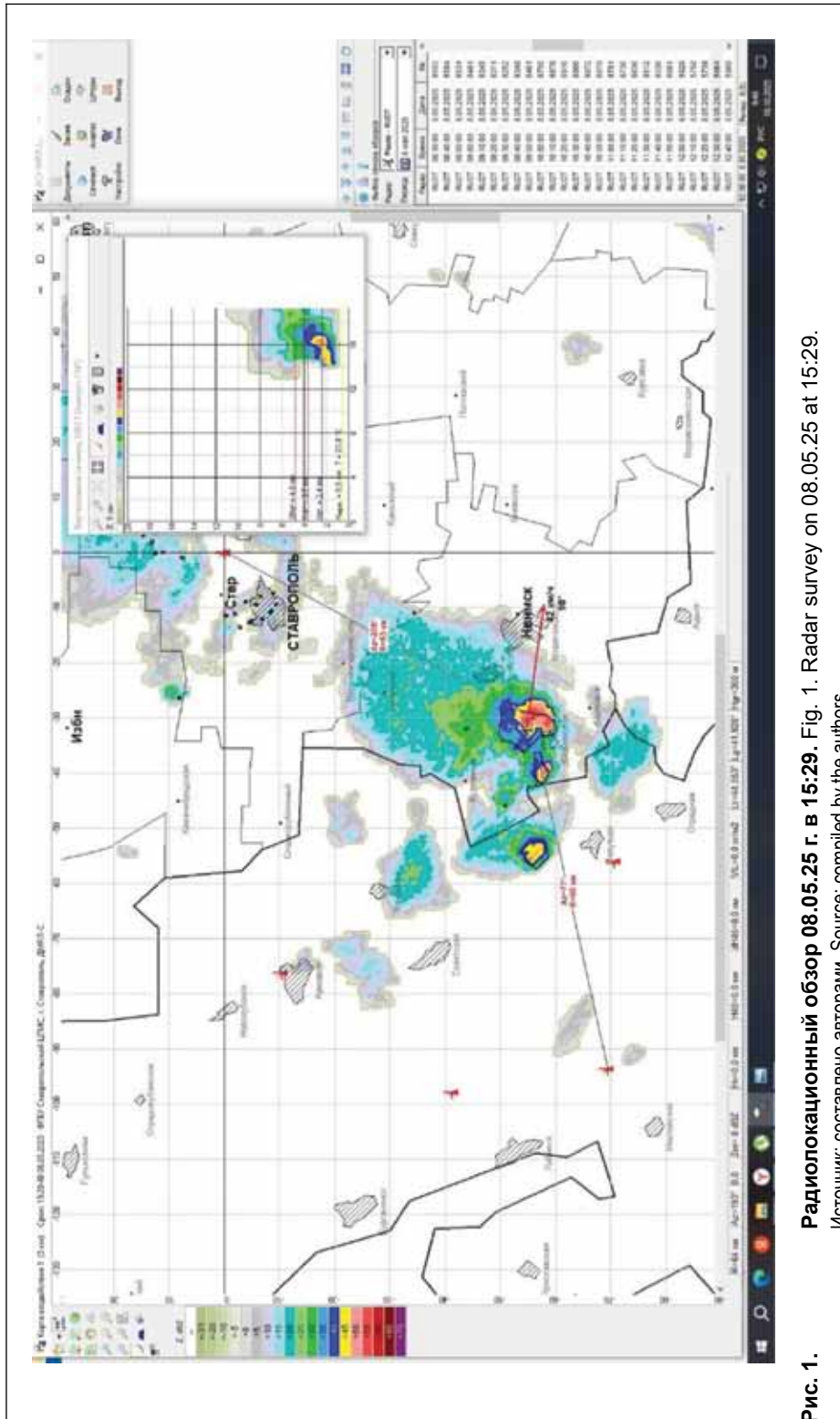


Рис. 1. Радиолокационный обзор 08.05.25 г. в 15:29. Fig. 1. Radar survey on 08.05.25 at 15:29.
Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

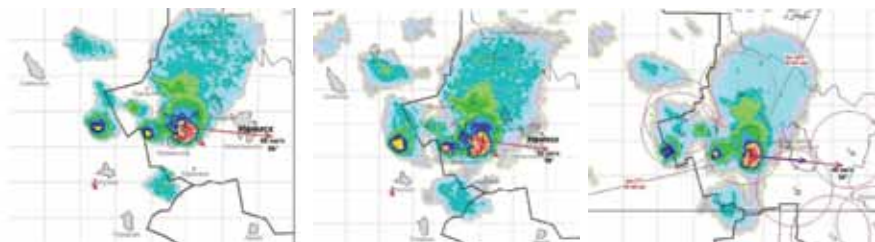


Рис. 2. Карта максимальной отражаемости 08.05.25 г. в 15:29 по трём радиолокаторам. МРЛ-5 Ставропольской ВС (слева), ДМРЛ-С (в центре), МРЛ-5 Краснодарской ВС (справа).
Fig. 2. Map of maximum reflectivity on 08.05.25 at 15:29 using three radars. MRL-5 of the Stavropol Military District (left), DMRL-S (center), and MRL-5 of the Krasnodar Military District (right).
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

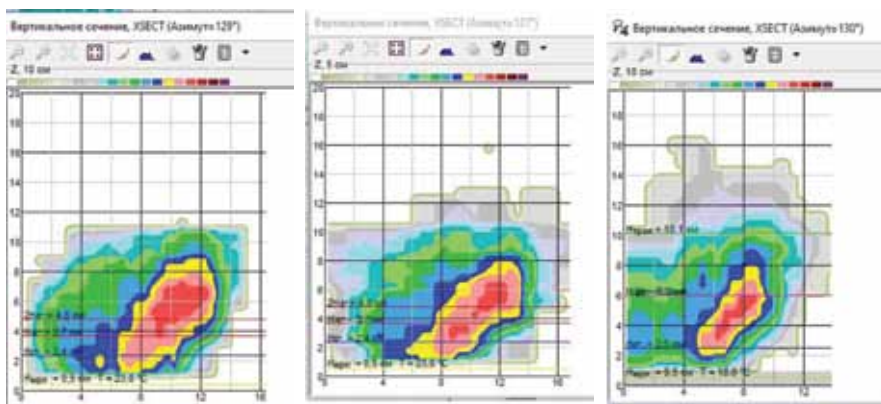


Рис. 3. Вертикальный разрез облака 08.05.25 г. в 15:29 по трём радиолокаторам. МРЛ-5 Ставропольской ВС (слева), ДМРЛ-С (в центре), МРЛ-5 Краснодарской ВС (справа).
Fig. 3. Vertical section of the cloud on 08.05.25 at 15:29 using three radars. MRL-5 of the Stavropol Air Force (left), DMRL-S (center), MRL-5 of the Krasnodar Air Force (right).
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

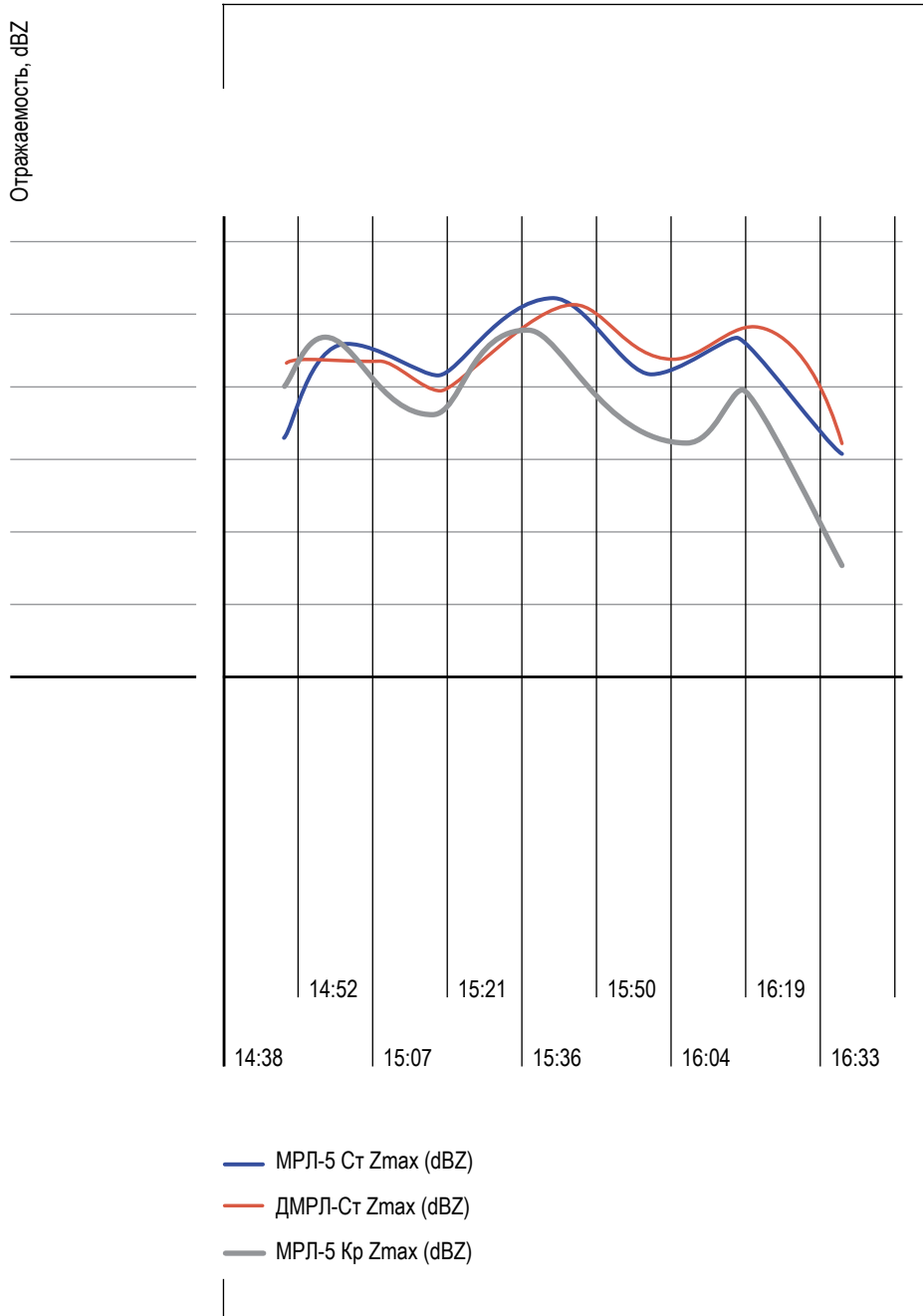


Рис. 4.

Графики изменения параметров Zmax, полученные двумя радиолокаторами МРЛ-5 и ДМРЛ-С 08.05.25.

Fig. 4. Graphs of parameter changes Zmax obtained by two radar stations, MRL-5 and DMRL-S, on 08.05.25.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

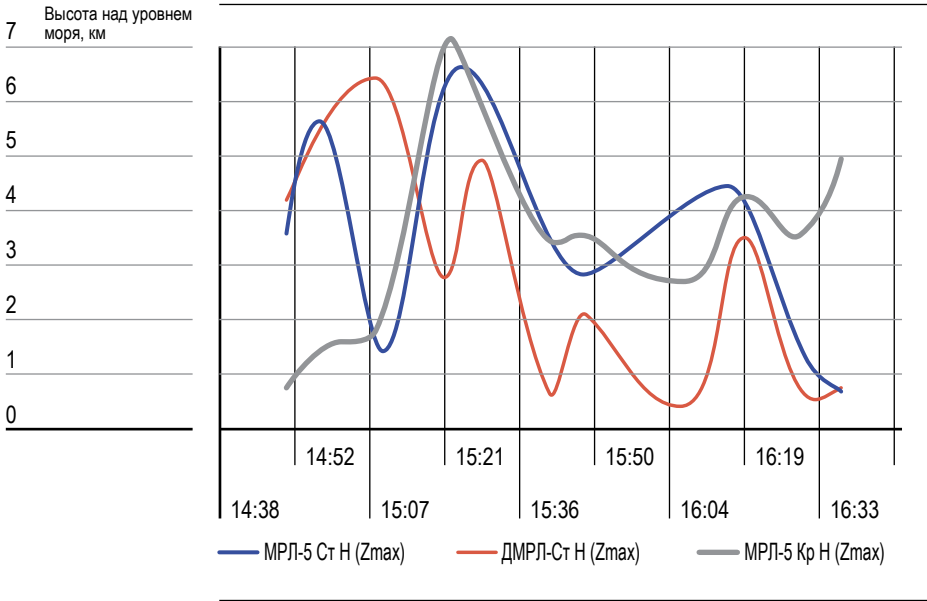


Рис. 5. Графики изменения параметров Hzmax, полученные двумя радиолокаторами МРЛ-5 и ДМРЛ-С 08.05.25.

Fig. 5. Graphs of parameter changes Hzmax obtained by two radar stations MRL-5 and DMRL-S on 08.05.25.

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

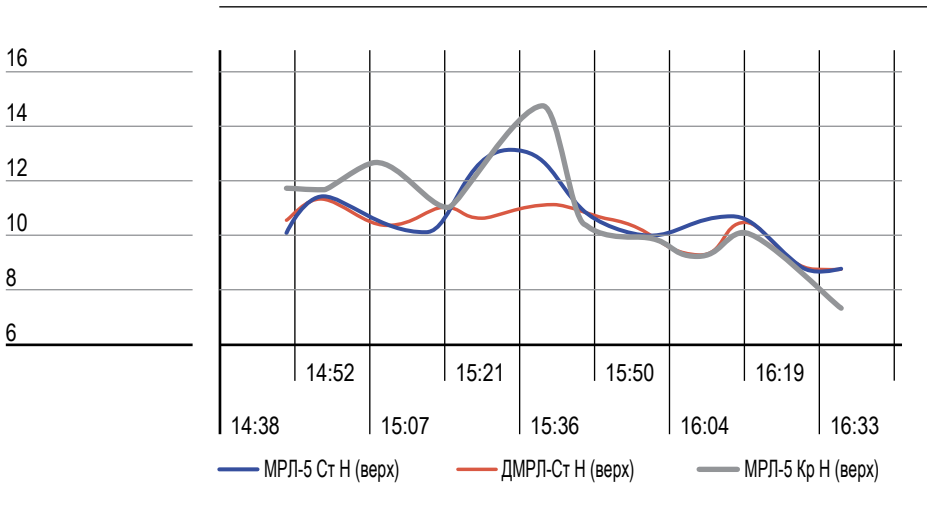


Рис. 6. Графики изменения параметров Hв, полученные двумя радиолокаторами МРЛ-5 и ДМРЛ-С 08.05.25.

Fig. 6. Graphs of parameter changes: Htop – obtained by two radar stations, MRL-5 and DMRL-S, on 08.05.25.

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

но, что ДМРЛ-С видит значительно лучше слабые облака с меньшей отражаемостью, а вот максимальная отражаемость отличается. В таблице 1 приведены значения некоторых радиолокационных параметров градового облака 8 мая 2025 года. В статье использовались следующие сокращения: Z_{\max} – максимальная отражаемость на длине волны $\lambda = 10$ см; $H_{z_{\max}}$ – высота (км) точки максимальной отражаемости Z_{\max} ; H_{45} – высота (км) отражаемости 45 dBZ; H_v – высота (км) верхней границы облака.

На рисунке 4 представлен график изменения максимальной отражаемости Z_{\max} .

Как видно из рисунка два радиолокатора из одной позиции не плохо коррелируют между собой, а вот радиолокатор Краснодарской ВС показывает значение максимальной отражаемости значительно ниже. Такое расхождение объясняется тем, что этот прибор находился в иной пространственной ориентации относительно исследуемого облака, вследствие чего сканируемый объем оказался отличным от объемов, изучаемых двумя первыми устройствами. На

Таблица 1. ЗНАЧЕНИЯ ИЗМЕРЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРАДОВОГО ОБЛАКА 8 МАЯ 2025 ГОДА ПО ДАННЫМ ТРЁХ РАДИОЛОКАТОРОВ

Время	Zmax			ε, %	Hv (км)	
	МРЛ-5 Ставр.	ДМРЛ-С	МРЛ-5 Красн.		МРЛ-5 Ставр.	ДМРЛ-С
14:51	49	57	55	16,3	10,0	10,5
14:58	58	57	60	1,7	11,4	11,3
15:10	58	57	54	1,7	10,4	10,3
15:21	56	54	52	3,6	10,3	11,0
15:29	60	58	59	3,3	12,9	10,6
15:41	64	62	60	3,1	12,7	11,1
15:48	62	63	55	1,6	10,9	10,9
16:00	56	58	50	3,6	10,0	10,1
16:11	58	58	49	0,0	10,4	9,2
16:19	59	61	54	3,4	10,6	10,4
16:30	52	58	44	11,5	8,7	8,9
16:38	47	48	35	2,1	8,6	8,7
Сред	56,6	57,6	52,2	4,1	10,6	10,3
г				0,77		

рисунке 5 представлен график изменения высоты максимальной отражаемости $H_{z_{\max}}$.

На рисунке 5 картина резко меняется, если максимальная отражаемость у ДМРЛ-С хорошо коррелировала с МРЛ-5 Ставропольской ВС, то теперь картина совсем иная. Высота максимальной отражаемости сильно отличается от двух радиолокаторов МРЛ-5, у которых, кстати, высоты очень хорошо совпадают. Также интересно будет посмотреть, как совпадают верхние границы облака на различных длинах волн.

Из рисунка 6 можно сделать вывод, что максимальная высота облака не плохо коррелирует по трём радиолокатором при небольшой максимальной отражаемости, а вот в период максимального развития облака в с 15:00 до 15:50 когда максимальная отражаемость достигла своего пика, как видно из рисунка 5, происходит резкое проседание верхней границы у ДМРЛ-С по нашему мнению в виду затухания меньшей длины волны в градовом очаге.

В таблице 1 приводятся значения измеренных параметров градового облака 8 мая 2025 года по данным трёх радиолокаторов.

Table 1. Values of measured parameters of the hail cloud on May 8, 2025, according to data from three radars

	МРЛ-5 Красн.	ε, %	H _{Zmax} (км)			ε, %
			МРЛ-5 Ставр.	ДМРЛ-С	МРЛ-5 Красн	
	11,8	5,0	3,5	4,0	1,5	14,3
	11,7	0,9	5,0	5,0	2,0	0,0
	12,7	1,0	2,0	5,5	2,5	175,0
	11,1	6,8	5,5	3,0	6,0	45,5
	12,4	17,8	5,5	4,5	5,0	18,2
	14,8	12,6	3,5	1,5	3,5	57,1
	10,5	0,0	3,0	2,5	3,5	16,7
	9,9	1,0	3,5	1,5	3,0	57,1
	9,3	11,5	4,0	1,5	3,0	62,5
	10,1	1,9	4,0	3,5	4,0	12,5
	8,6	2,3	2,0	1,5	3,5	25,0
	7,2	1,2	1,5	1,5	4,5	0,0
	10,8	5,2	3,6	2,9	3,5	40,3
		0,73				0,33

В таблице применены те же сокращения.

Для оценки отличий в измерениях на двух длинах волн в таблице 1 для каждого параметра приводятся значения отклонений (не совпадений) величин, измеренных на ДМРЛ-С и на МРЛ-5 Ставропольской ВС, так как они установлены на одной позиции. Так для радиолокационной отражаемости относительное отклонение имеет вид – формула 1.

$$\varepsilon = \frac{|R_1 - R_0|}{R_0}, \quad (1)$$

где R_1 – отражаемость, измеренная на ДМРЛ-С;
 R_0 – отражаемость, измеренная на радиолокаторе МРЛ-5.

Для каждого параметра в таблице вычисляется коэффициент корреляции Пирсона r , который характеризует близость двух наборов данных, по известной формуле 2:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2)$$

Из таблицы 1 видно, что наиболее сильно отличаются высоты, измеренные различными радиолокаторами. Особенно высота максимальной отражаемости $H_{z_{\max}}$. Среднее за процесс относительное отклонение $H_{z_{\max}}$ составило 40,3 %, коэффициент корреляции $r = 0,33$. Для H_v среднее за процесс относительное отклонение составило 5,2 %, а коэффициент корреляции 0,73. Особенно тесная связь наблюдается между параметрами Z_{\max} . Относительное отклонение 4,1 %, а коэффициент корреляции $r = 0,77$.

Результаты исследований и их обсуждение

Настоящее исследование позволило выявить важные особенности радиолокационного зондирования градовых облаков на различных длинах волн. Исследование особенностей радиолокационного зондирования градовых облаков на различных длинах волн показало существенные различия в показаниях между автоматизированным радиолокатором МРЛ-5 и доплеровским радиолокатором ДМРЛ-С. Основные выводы исследования включают следующее:

Ключевые результаты:

- Различия в высоте максимальной отражаемости: наибольшее расхождение наблюдалось в значениях высоты максимальной отражаемости (H_{zmax}), среднее относительное отклонение которого достигло 40,3 %. Коэффициент корреляции Пирсона составил всего 0,33, что свидетельствует о низкой согласованности данных.
- Корректировка измерений: несмотря на значительные отклонения, наибольшая корреляция была зафиксирована для радиолокационной отражаемости (Z_{max}), где относительное отклонение составляло лишь 4,1% и коэффициент корреляции равен 0,77.
- Погрешности измерений: погрешности обусловлены конструкционными особенностями приборов, такими как отсутствие взаимной градуировки и ослабление сигналов на коротких волнах.

Практические рекомендации:

Оптимизация методики мониторинга: рекомендуется внедрение процедуры регулярной взаимной калибровки радиолокаторов для повышения точности и надежности измерений.

Развитие алгоритмов обработки данных: необходимо создание новых методов коррекции ошибок, вызванных дифракцией и ослаблением сигналов, особенно на коротковолновой аппаратуре.

Повышение эффективности прогнозирования: улучшенные подходы к обработке данных позволят повысить эффективность

прогнозирования экстремальных гидрометеорологических ситуаций, что крайне важно для защиты населения и экономики региона.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование позволяет глубже понять особенности градовых облаков и открывает перспективы для совершенствования методов радиолокационного мониторинга опасных погодных явлений на различных длинах волн. Полученные результаты будут полезны для дальнейших научных разработок и практических приложений в области метеорологии и климатологии.

Наше исследование показало что, ДМРЛ-С видит значительно лучше слабые облака с меньшей отражаемостью, а вот максимальная отражаемость отличается. Если максимальная отражаемость достигает своего пика, происходит резкое проседание верхней границы у ДМРЛ-С по нашему мнению в виду затухания меньшей длины волны в градовом очаге.

Для исследования мощных градовых процессов лучше применять радиолокаторы МРЛ-5, радиолокаторы ДМРЛ-С больше подходят для изучения жидких осадков.

Список источников

1. Лиев К. Б., Гергоков А. Х. Анализ влияния длины волны на радиолокационную диагностику градовых облаков // Труды Высокогорного геофизического института. 2023. №3. С. 45–56.
2. Сергеев Е. А., Иванов А. В. Методы радиолокационного зондирования атмосферного пространства. Москва: Издательство МГУ, 2022. 320 с.
3. Алексеев Ю. Н., Кузнецов О. И. Современные тенденции в развитии технологий активного воздействия на погодные условия // Проблемы прикладной физики. 2024. №1. С. 12–24.
4. Doviak R. J., Zrnic D. S. Doppler Radar and Weather Observations. New York: Academic Press, 2021. 512 p.
5. Батманов Р. К., Бережной С. М. Особенности формирования осадочной активности в условиях Кавказского региона // Географический вестник. 2023. №2. С. 78–90.
6. Петров В. С., Смирнов А. Г. Обработка радиолокационных

- данных и оценка состояния атмосферы // Сборник докладов конференции «Современные проблемы экологии и природопользования». Сочи, 2024. С. 112–123.
7. Бондаренко Н. Л., Гордеев В. Е. Моделирование климатических изменений и их влияние на сельскохозяйственное производство // Вестник аграрной науки. 2023. №4. С. 34–45.
 8. Воронов А. Ю., Колотов П. Ф. Применение радиолокационных методов для мониторинга климата и гидродинамических процессов // Журнал общей географии. 2023. Т. 74. №6. С. 89–102.
 9. Лиев К. Б., Кущев С. А., Гергоков А. Х. Дистанционные методы определения ущерба от града на территории Юга России // Наука. Инновации. Технологии. 2025. №3. С. 149–164.
 10. Малашенков Д. А., Максимова А. Н. Развитие современных подходов к мониторингу грозовой активности // Гидрометцентр России. Бюллетень оперативной информации. 2024. №2. С. 3–12.
 11. Маслов И. В., Осипов В. А. Прогностические модели градовых явлений и их роль в обеспечении безопасности полетов // Авиация и космонавтика. 2023. №3. С. 45–58.
 12. Орлов В. Н., Ильинский Я. О. Использование радиолокационных станций нового поколения для оперативного предупреждения чрезвычайных ситуаций природного характера // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. №1. С. 11–20.
 13. Шилов А. С., Виноградов И. Т. Оценка пространственно-временной динамики метеоявлений с применением комплексных метеорологических сетей // Вестник Московского университета. Серия физическая география. 2024. №1. С. 18–30.
 14. Fulton R. A., Breidenbach J. P. Quantitative Precipitation Estimation from Dual-Wavelength Polarimetric Radars // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2022. Vol. 61. No. 4. P. 631–648.
 15. Mishra V. K., Pathak H. C. Comparative Study of Hailstorm Detection Using X-band and S-band Radars // Advances in Space Research. 2023. Vol. 61. Issue 10. P. 3012–3023.
 16. Кондратьев А. П., Казанцев В. А. Радиолокационные методы в изучении атмосферной турбулентности // Успехи физических наук. 2022. Т. 192. №1. С. 35–50.

17. Иванова О. Р., Новикова Е. С. Влияние высотных потоков воздуха на формирование конвективных облачных структур // Изучение земной атмосферы методами дистанционного зондирования. СПб.: Институт аэрокосмического приборостроения РАН, 2023. С. 110–125.
18. Пронин А. Н., Соколов В. А. Оптимизация режимов радиолокационного мониторинга погодных аномалий // Научные труды Центрального НИИ гидрометеорологической службы. 2024. №2. С. 48–60.
19. Мельничук С. Г., Салимов Ф. А. Применение искусственных нейронных сетей для улучшения точности радиолокационного распознавания опасных гидрометеорологических явлений // Международная конференция «Информационные технологии в науке и образовании». Казань, 2023. С. 156–168.
20. Жигулин А. С., Сухарев П. И. Новые возможности наземных радарных комплексов для обнаружения экстремальных атмосферных явлений // Современная наука и инновации. 2025. №1. С. 105–118.

References

1. Liev KB, Gergokov AKh. Analysis of the Influence of Wavelength on Radar Diagnostics of Hail Clouds. Proceedings of the High-Altitude Geophysical Institute. 2023;(3):45-56. (In Russ.).
2. Sergeev EA, Ivanov AV. Methods of Radar Sensing of Atmospheric Space. Moscow: Moscow State University Press; 2022. 320 p. (In Russ.).
3. Alekseev YuN, Kuznetsov OI. Modern trends in the development of technologies for active influence on weather conditions. Problems of Applied Physics. 2024;(1):12-24. (In Russ.).
4. Doviak RJ, Zrnich DS. Doppler Radar and Weather Observations. New York: Academic Press; 2021. 512 p. (In Russ.).
5. Batmanov RK, Berezhnoy SM. Features of the formation of sedimentary activity in the conditions of the Caucasus region. Geographical Bulletin. 2023;(2):78-90. (In Russ.).
6. Petrov VS, Smirnov AG. Processing of radar data and assessment of the state of the atmosphere. Collection of reports of the conference “Modern problems of ecology and nature management”. Sochi, 2024. P. 112–123. (In Russ.).
7. Bondarenko NL, Gordeev VE. Modeling of climate change

- and its impact on agricultural production. *Bulletin of Agrarian Science*. 2023;(4):34-45. (In Russ.).
8. Voronov AYu, Kolotov PF. Application of radar methods for monitoring climate and hydrodynamic processes. *Journal of General Geography*. 2023;74(6):89-102. (In Russ.).
 9. Liev KB, Kushchev SA, Gergokov AKh. Remote Methods for Determining Hail Damage in the South of Russia. *Science. Innovations. Technologies*. 2025;(3):149-164. (In Russ.).
 10. Malashenkov DA, Maksimova AN. Development of modern approaches to monitoring of thunderstorm activity. *Hydrometeorological Center of Russia. Bulletin of operational information*. 2024;(2):3-12. (In Russ.).
 11. Maslov IV, Osipov VA. Forecasting models of hail phenomena and their role in ensuring flight safety. *Aviation and cosmonautics*. 2023;(3):45-58. (In Russ.).
 12. Orlov VN, Ilyinsky YaO. Use of New Generation Radar Stations for Prompt Prevention of Natural Emergencies. *Issues of Engineering Seismology*. 2022;(1):11-20. (In Russ.).
 13. Shilov AS, Vinogradov IT. Assessment of Spatio-Temporal Dynamics of Meteorological Phenomena Using Complex Meteorological Networks. *Bulletin of Moscow University. Series Physical Geography*. 2024;(1):18-30. (In Russ.).
 14. Fulton RA, Breidenbach JP. Quantitative Precipitation Estimation from Dual-Wavelength Polarimetric Radars. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2022;61(4):631-648.
 15. Mishra VK, Pathak HC. Comparative Study of Hailstorm Detection Using X-band and S-band Radars. *Advances in Space Research*. 2023;61(10):3012-3023.
 16. Kondratiev AP, Kazantsev VA. Radar Methods in the Study of Atmospheric Turbulence. *Advances in Physical Sciences*. 2022;192(1):35-50. (In Russ.).
 17. Ivanova OR, Novikova ES. Influence of High-Altitude Air Flows on the Formation of Convective Cloud Structures. *Study of the Earth's Atmosphere by Remote Sensing Methods*. St. Petersburg: Institute of Aerospace Instrumentation of the Russian Academy of Sciences; 2023. Pp. 110-125. (In Russ.).
 18. Pronin AN, Sokolov VA. Optimization of Radar Monitoring Modes for Weather Anomalies. *Scientific Papers of the Central Research Institute of Hydrometeorology*. 2024;(2):48-60. (In Russ.).
 19. Melnichuk SG, Salimov FA. Application of artificial neural networks to improve the accuracy of radar recognition of danger-

ous hydrometeorological phenomena. International Conference "Information Technologies in Science and Education". Kazan, 2023. P. 156-168. (In Russ.).

20. Zhigulin AS, Sukharev PI. New capabilities of ground-based radar systems for detecting extreme atmospheric phenomena. *Sovremennaya Nauka i Tekhnologii*. 2023;(1):10-15. (In Russ.).

Информация об авторах

Кайсын Борисович Лиев – заведующий отделом активных воздействий Высокогорного геофизического института.

Ахмат Хисаевич Гергоков – заведующий лабораторией технологии воздействия Высокогорного геофизического института.

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Kaisyn B. Liev – acting Head of the Department of Active Influences, Highland Geophysical Institute.

Akhmat H. Gergokov – head of the Impact Technology Laboratory, Highland Geophysical Institute.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.