

Особенности одновременного наблюдения метеоцелей на двух каналах радиолокатора МРЛ-5.

Д.А. Денисенков¹, В.Ю. Жуков², Г.Г. Щукин³

¹ Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

E-mail: dimasden@yandex.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

E-mail: vuzhukov2002@list.ru

³ Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт,
199106, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 41.

E-mail: ggshchukin@mail.ru

Приводятся результаты эксперимента по исследованию закона распределения отражений от обложных осадков и грозового облака, полученных одновременно на длине волны 3 см и 10 см. Исследуется особенность формирования нерэлеевских отражений для разных длин волн в зависимости от высоты наблюдаемых гидрометеоров относительно зоны таяния. Выдвигается гипотеза, объясняющая механизм формирования нерэлеевских отражений через соотношения интервалов корреляции наблюдаемых гидрометеоров разных размеров и временем их наблюдения на разных длинах волн. Делается вывод о том, что анализ закона распределения амплитуд может позволить оценить распределение размеров наблюдаемых целей.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, статистическая обработка, закон распределения амплитуды сигнала, дистанционное зондирование атмосферы.

Characteristics of Simultaneous Dual-Channel Observation of Weather Scatterers Using the MRL-5 Radar.

Denisenkov¹ D.A., Zhukov² V.Y., Shchukin³ G.G.

¹ Mozhaisky Military Space Academy.

² Russian State Hydrometeorological University

³ State Research Institute Of Navigation And Hydrography

The paper presents results of an experiment on the statistical distribution of radar returns from stratiform precipitation and a convective storm cell, recorded simultaneously at wavelengths of 3 cm and 10 cm. The formation of non-Rayleigh backscatter at each wavelength is examined as a function of hydrometeor altitude relative to the melting layer. A hypothesis is advanced to explain the mechanism of non-Rayleigh scattering in terms of the relationship between the correlation time of hydrometeors of varying sizes and their dwell time within the radar resolution volume at each wavelength. It is concluded that amplitude distribution analysis may provide a basis for retrieving the size distribution of the observed scatterers.

Keywords: meteorological radar, statistical processing, law of signal amplitude distribution, remote sensing.

Введение

Распределение гидрометеоров по размерам (drop size distribution, DSD) является одним из ключевых параметров в современной метеорологической радиолокации. Оно определяет радиолокационную отражаемость, ослабление сигнала, интенсивность осадков и характеристики рассеяния электромагнитного излучения в различных

диапазонах. Традиционно информация о DSD используется для задач количественной оценки осадков через уравнения вида $Z = aR^b$, для расчёта коррекции ослабления в сантиметровом диапазоне, а также для классификации типов осадков, включая разделение конвективных и стратиформных систем, выявление зон роста града и определения фазового состава гидрометеоров [1, 2, 3].

Наиболее полная информация о DSD в современной радиолокационной практике извлекается на основе поляриметрических измерений [2, 3]. Дифференциальная отражаемость Z_{DR} , дифференциальная фаза K_{DP} и модуль коэффициента корреляции ρ_{hv} позволяют оценивать форму, размер и ориентацию гидрометеоров, формируя совместную базу данных для нескольких взвешенных моментов DSD. Однако значительная часть метеорологических радиолокаторов, находящихся в оперативной эксплуатации – как в Российской Федерации, так и в ряде других стран – не оснащена поляриметрическими каналами [2]. Это в первую очередь относится к более ранним доплеровским и недоплеровским радиолокаторам, для которых доступна лишь информация об отражаемости и, в ряде случаев, о радиальной скорости частиц. В этих условиях оценка параметров DSD существенно затруднена.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности использования оценок закона распределения амплитуды отражённого радиолокационного сигнала как дополнительного источника информации о DSD. Выдвигается гипотеза о том, что характер закона распределения амплитуды – его близость к рэлеевскому или отклонение от него – несёт информацию о микрофизической структуре осадков и наличии крупных частиц. Приводятся предварительные экспериментальные данные, полученные на двухволновом радиолокаторе.

Обоснование гипотезы.

Предпосылками к выдвижению новой гипотезы о физических причинах формирования нерэлеевских отражений стали многократные эксперименты по исследованию закона распределения амплитуды отражений от гидрометеоров [4–7], в результате которых было обнаружено, что в достаточно большом числе исследуемых случаев данный закон отличался от рэлеевского. При этом наиболее часто выдвигаемое в литературе предположение о том, что нерэлеевские отражения появляются при появлении в разрешаемом объёме нескольких крупных частиц [1], отражение от которых доминируют над многими тысячами мелких, и, как следствие, нарушается условие «малости отдельных слагаемых» в центральной предельной теореме, что приводит к появлению в амплитудном распределении правого «тяжёлого хвоста», характерного для К-распределения и других родственных законов не в полной мере может объяснить все наблюдаемые отклонения от закона Рэлея.

Особенность распределения Релея состоит в том, что отношение его математического ожидания к среднеквадратическому отклонению есть величина постоянная. Анализ полученных в эксперименте данных показывает, что для подавляющего числа случаев отклонения распределения от предполагаемого это отношение оказывается больше теоретического. Это означает, что в принимаемом сигнале присутствует постоянная составляющая, приводящая к тому, что амплитуда отражений оказывается распределённой по обобщённому закону Релея. Остается понять, откуда берется постоянная составляющая. Очевидно, за нее можно принять ту составляющую сигнала, которая формируется наиболее крупными элементарными отражателями, попавшими в разрешаемый объем радиолокатора. Они обладают большей инерционностью, чем остальные частицы, и, соответственно меньшей вовлекаемостью в пульсации ветра. Сигнал, отраженный такими частицами будет иметь больший интервал корреляции, чем сигнал, отраженный от более мелких частиц.

При этом, если интервал наблюдения разрешаемого объема оказывается равным интервалу корреляции сигнала, сформированному крупными частицами, создаваемое ими отражение можно считать постоянной составляющей.

Проверить предлагаемую гипотезу можно путем одновременного облучения исследуемого пространства зондирующими сигналами с различной длиной волны. Если учесть, что флуктуации отраженного гидрометеорами сигнала определяются исключительно изменениями фазовых соотношений между отражениями от элементарных отражателей, вызванных взаимным перемещением их друг относительно друга, можно предположить, что чем больше будет длина волны, тем больший интервал корреляции будет демонстрировать сигнал. Следовательно, и случаев отклонения от закона Релея при большей длине волны будет наблюдаться больше. При этом если время наблюдения за совокупностью отражателей будет превышать интервал корреляции сигнала канала с большей длиной волны, данные отклонения не должны наблюдаться ни на одной из длин волн.

Таким образом, совместный анализ статистики амплитуд на двух длинах волн потенциально может обнаружить крупную фракцию отражателей и разделить её по размерам, а, следовательно, уточнить параметры DSD, что представляет самостоятельную диагностическую ценность.

Описание эксперимента

Для подтверждения гипотезы был проведён эксперимент с использованием двухволнового метеорологического радиолокатора МРЛ-5 (длины волн 3 и 10 см).

Рассматривались два типа синоптических ситуаций:

1. **Грозовые осадки** (6.08.2022 г.) – ливень из кучево-дождевого грозового облака внутримассового развития; нулевая изотерма на высоте 3650 м, температура воздуха у земли +28°C.

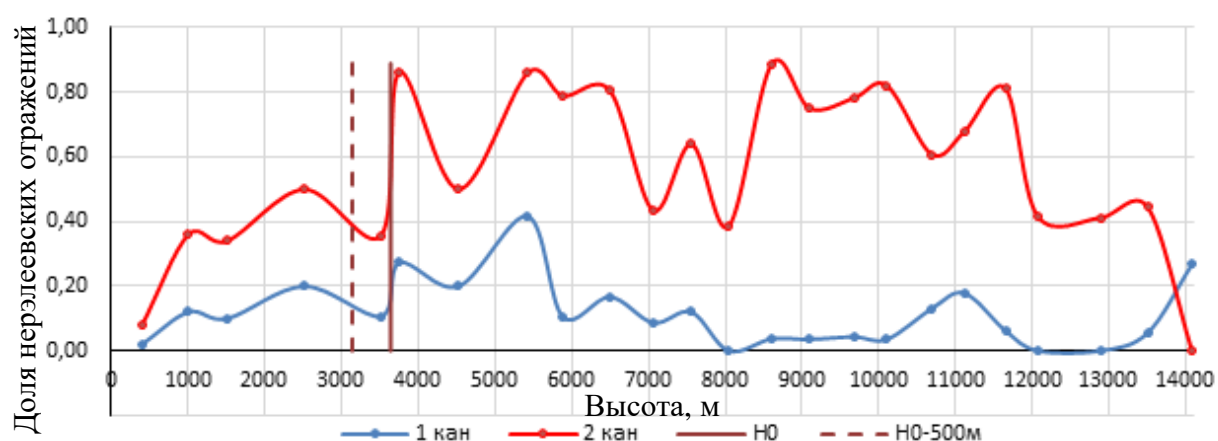
2. **Обложные осадки** (25.04.2022 г.) – система тёплого фронта; нулевая изотерма на высоте 1350 м, температура воздуха у земли +4°C.

На предварительном этапе сканирования выбиралась цель, находящаяся на дальности не менее 25 км и фиксировался азимут антенны, после чего производилось сканирование по вертикали (несколько углов места из диапазона $0 \div 13,5$ для грозовых осадков и $0 \div 3,5$ для обложных осадков): поимпульсно фиксировались принимаемые отражения одновременно в каждом из двух каналов, запись на каждом угле места велась в течение 1 секунды при частоте следования импульсов 500 Гц. В результате для каждого установленного угла на каждой дальности из выбранного интервала после первичной обработки формировались выборки амплитуд отражённого сигнала объёмом 500 независимых отсчётов на обоих каналах. Приёмный тракт функционировал в линейном режиме с высоким динамическим диапазоном, что обеспечивало корректное формирование амплитудных выборок без искажений, свойственных логарифмическим усилителям [4–7].

На следующем этапе обработки производилась проверка соответствия закона распределения амплитуд сигнала в каждой выборке закону Рэлея. В качестве бинарного критерия принятия/отклонения рэлеевской гипотезы использован критерий согласия χ^2 Пирсона при уровне значимости $\alpha = 0,5$. По числу объёмов, в которых гипотеза о рэлеевском распределении амплитуды была отвергнута, на каждом высотном уровне вычислялась доля нерэлеевских отражений, отдельно для каналов 3 и 10 см.

Результаты и их интерпретация

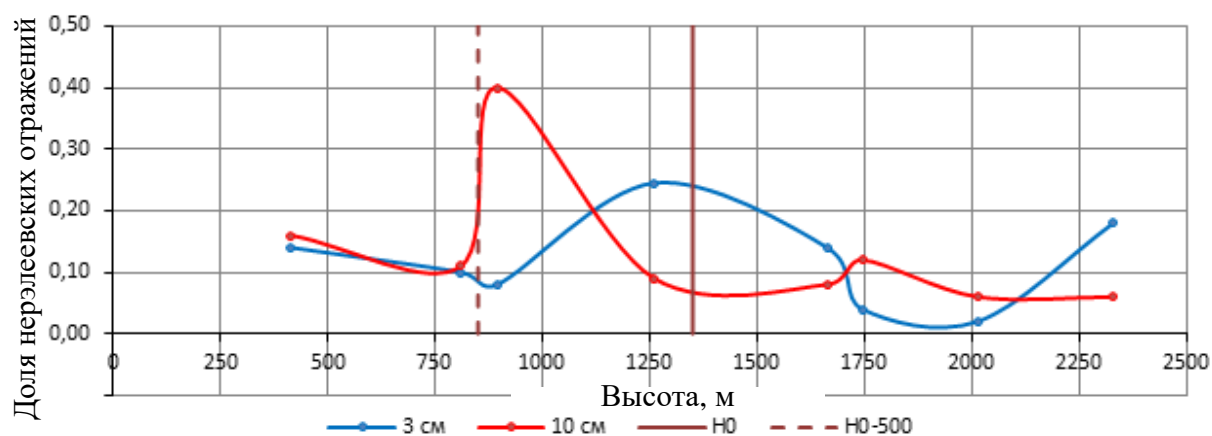
При зондировании грозовой системы начиная с уровня около – 500 м относительно высоты нулевой изотермы (в ряде экспериментов с уровня нулевой изотермы) фиксировалось резкое возрастание доли нерэлеевских отражений на канале 10 см; этот повышенный уровень сохранялся до высот свыше 10000 м (рис. 1). На канале 3 см также наблюдалось возрастание доли нерэлеевских отражений приблизительно в 1,5–2 раза, однако на высотах около 5000–6000 м этот показатель возвращался к уровню, соответствующему нижним слоям (ниже –500 м от нулевой изотермы). При этом количество нерэлеевских отражений в канале 10 см превышало в среднем в 2–3 раза их число в канале 3 см.



Н0 – высота нулевой изотермы; Н0–500м – высота уровня 500 м ниже нулевой изотермы.

Рис. 1. Распределение нерэлеевских отражений по высоте в грозовых осадках.

При зондировании обложных осадков начиная с уровня –500 м относительно нулевой изотермы на обоих каналах фиксировалось существенное возрастание доли нерэлеевских отражений; однако непосредственно на высоте нулевой изотермы (или чуть выше) этот показатель возвращался к исходному уровню (рис. 2):



Н0 – высота нулевой изотермы; Н0–500м – высота уровня 500 м ниже нулевой изотермы.

Рис. 2. Распределение нерэлеевских отражений по высоте в обложных осадках.

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с рядом работ в области метеорадиолокации и микрофизики осадков:

– данные, полученные при зондировании обложных осадков соответствуют классической картине «яркой полосы» (melting layer, bright band) в стратиформных системах, роль которой в формировании специфических радиолокационных сигнатур детально рассмотрена в работах по вертикальному профилированию отражаемости стратиформных систем [8]. Для этого случая характерным является формирование в слое таяния крупных обводнённых агрегатов снежинок с повышенной отражаемостью и специфическими статистическими свойствами сигнала; ниже слоя таяния, по мере завершения плавления, статистика эхо-сигнала стабилизируется и сигнал становится более однородным.

– пространственная структура отражаемости кучево-дождевых и грозовых облаков характеризуется выраженной неоднородностью на существенно большем диапазоне высот, что обусловлено конвективными ячейками, восходящими потоками и зонами роста крупных частиц [9].

Поляриметрические исследования стратиформных и конвективных осадков также показывают, что DSD конвективных систем характеризуется значительно более широким спектром размеров и повышенной долей крупных частиц по сравнению со стратиформными [2, 3].

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что закон распределения амплитуды отражённого радиолокационного сигнала чувствителен к микрофизической структуре осадков. Применение двухволнового зондирования (3 и 10 см) позволяет выявить вертикальные профили случаев отклонения нерелеевских распределений, качественно различающиеся для грозовых и обложных осадков и согласующиеся с известными представлениями о структуре слоя таяния, зон роста крупных частиц и конвективных колонн. Таким образом, подтверждается принципиальная возможность использования информации о законе распределения амплитуды для качественной диагностики типа осадков и параметров DSD.

Литература

1. Брылева Г.Б., Гашиной С.Б., Низдойминова Г. Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков / Л.: Гидрометиздат, 1986. 232 с
2. Руководство по приборам и методам наблюдений. Том III — Системы наблюдений. Издание 2023 г. ВМО-№ 8.
3. Wen, L., Zhao, K., Yang, Z., Chen, H., Huang, H., Chen, G., & Yang, Z. (2020). Microphysics of stratiform and convective precipitation during Meiyu season in Eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD032677. DOI: 10.1029/2020JD032677.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Закон распределения отражений от метеоцели как критерий её идентификации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2025. №3. С. 5-10. DOI 10.66032/2221-2574-2025-1-3-5-10.
5. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Зависимость распределения амплитуды радиолокационного сигнала от фазового состояния гидрометеоров // Всероссийские открытые Арmandовские чтения "Муром 2025": Материалы Всероссийской открытой научной конференции и Молодёжной школы–конференции, Муром, 03–05 июня 2025 года. Муром: Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2025. С. 127-130. DOI 10.24412/2304-0297-2025-1-127-130. EDN ZDOZWA.

6. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. О распределении амплитуды радиолокационных отражений от дождевых облаков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 3(51). С. 5-11. DOI 10.24412/2221-2574-2023-3-5-11. EDN SLBWNM.
7. Жуков В.Ю., Денисенков Д.А., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Исследование распределения плотности вероятности отражений от осадков на базе радиолокатора МРЛ-5 // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн, Муром, 28–30 мая 2019 года. Муром: Муромский институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых". 2019. С. 285-290. EDN OMHTDZ.
8. A. Foth, J. Zimmer, F. Lauermann, H. Kalesse-Los Evaluation of Micro Rain Radar-based Precipitation Classification // Atmospheric Measurement Techniques. 2021. Volume 14, issue 6. P. 4565–4574. DOI: 10.5194/amt-14-4565-2021.
9. Поморцева А.А. Пространственная структура радиолокационной отражаемости кучево-дождевой облачности на Урале // Географический вестник. 2012. № 4(23). С. 41-45. EDN PMYTPТ.