

## НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ/ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.8>

## ОЦЕНКА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОСАДКОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРА РАЗМЕРА КАПЕЛЬ

Научная статья

Созаева Л.Т.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (sozaeva.lezhinka[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Статья посвящена оценке поляризационных свойств атмосферных осадков для улучшения обнаружения опасных погодных явлений. В России сейчас активно внедряются новые метеорадиолокаторы ДМРЛ-С с двойной поляризацией, которые одновременно отправляют и принимают сигналы, ориентированные как горизонтально, так и вертикально. Статья посвящена исследованию влияния размер и форма дождевых капель на поляризационные свойства отраженного радиолокационного сигнала, в частности, на его отражаемость и дифференциальную отражаемость. Для моделирования спектра капель в осадках была использована трехмерная нестационарная модель облака. Соотношение между размером капель и их фактором формы было выбрано из данных лабораторных экспериментов. Расчет обратного рассеяния от несферических выполнялись с применением метода разделения переменных. По результатам были созданы карты распределения горизонтально и вертикально поляризованных отражаемостей и дифференциальной отражаемости в период максимального развития облака. На полученных картах область деформированных капель выделяется достаточно эффективно по значению дифференциальной отражаемости. Результаты исследований могут найти применение для оценки других поляризационных характеристик ДМРЛ-С и их валидация с данными наблюдений.

**Ключевые слова:** отражаемость, дифференциальная отражаемость, обратное рассеяние, несферические частицы, спектр капель, градовые облака, моделирование облаков.

## EVALUATION OF THE POLARISATION PROPERTIES OF SEDIMENTS BASED ON MODELLING OF THE DROPLET SIZE SPECTRUM

Research article

Sozaeva L.T.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Vysokogorny Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

\* Corresponding author (sozaeva.lezhinka[at]yandex.ru)

**Abstract**

This article is devoted to the evaluation of the polarisation properties of atmospheric precipitation to improve the detection of hazardous weather phenomena. In Russia, new DMRL-S dual-polarisation weather radars are currently being actively introduced, which simultaneously transmit and receive signals oriented both horizontally and vertically. The paper is dedicated to the study of the influence of the size and shape of raindrops on the polarisation properties of the reflected radar signal, in particular, on its reflectivity and differential reflectivity. A three-dimensional non-stationary cloud model was used to simulate the spectrum of droplets in precipitation. The relationship between the size of the droplets and their shape factor was selected from laboratory experiment data. The calculation of backscattering from non-spherical objects was performed using the variable separation method. Based on the results, maps of the distribution of horizontally and vertically polarised reflectivities and differential reflectivity during the period of maximum cloud development were created. On the obtained maps, the area of deformed droplets is distinguished quite effectively by the value of differential reflectivity. The research results can be used to evaluate other polarisation characteristics of the DMRL-S and validate them with observational data.

**Keywords:** reflectivity, differential reflectivity, backscattering, non-spherical particles, droplet spectrum, hail clouds, cloud modelling.

**Введение**

Эксплуатация современного метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С открывает новые возможности в обнаружении опасных явлений погоды. В отличие от радиолокаторов МРЛ-5, которые измеряют отражение радиоволн только в одной плоскости, в ДМРЛ-С используется технология двойной поляризации, позволяющая одновременно передавать и принимать сигналы как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Благодаря этому ДМРЛ-С получает детальную информацию о поляризационных характеристиках таких как отражаемость, дифференциальная отражаемость, коэффициент кросскорреляции и деполяризационное отношение. По разнице в характеристиках обратного рассеяния радиоволн в горизонтальной и вертикальной плоскостях возможно получить информацию о форме, размере и типе гидрометеоров в облаках и осадках. Эта информация является предпосылкой к раннему выявлению опасных явлений, в том числе гроз, интенсивных ливней и града.

Целью настоящего исследования является анализ поляризационных характеристик конвективных облаков. Для достижения этой цели были определены следующие задачи:

- расчет рассеяния излучения каплями на длине волны 5,6 см;
- моделирование спектров капель в облаках по трехмерной математической модели с детальной микрофизикой;

- вычисление радиолокационной отражаемости по вертикальному и горизонтальному поляризованным каналам, а также оценка величины дифференциальной отражаемости капель и другие аспекты.

Задача рассеяния в данной работе решается методом разделения переменных для несферических частиц SVM (Separation of Variables Method), разработанным на сфероидальном базисе [8], [9], [10] и обладающим высокой точностью, что позволяет использовать его для расчета характеристик рассеяния радиоволн от гидрометеоров. В частности, этот метод был использован для сплюснутых облачных капель [3], [4].

### Методы и принципы исследования

В работах [1], [2] представлено описание трехмерной нестационарной модели, предназначенной для исследования конвективных облаков. Модель позволяет проводить расчеты в прямоугольной области размером 60 км (горизонталь) на 16 км (вертикаль) с шагом сетки 500 м по горизонтали и 200 м по вертикали. Входными данными служат сведения о температурно-ветровом зондировании атмосферы (температура окружающей среды и точки росы, направление и скорость ветра). Основной особенностью данной модели является возможность исследования эволюции микрофизических, термодинамических и электрических параметров облаков. Микрофизический блок модели позволяет на каждом временном шаге в любой точке расчетной области получать функции распределения гидрометеоров  $f(r)$  по размерам, с помощью которых можно вычислить различные микроструктурные характеристики облаков — водность, ледность, отражаемость и т.д. Отметим, что радиолокационная отражаемость характеризует отражательные свойства исследуемой облачной среды, и ее значение зависит от размера, формы и концентрации гидрометеоров (дождевые капли, кристаллы, град и др.).

Радиолокационная отражаемость, как известно, рассчитывается по формуле:

$$Z = \int_0^\infty \sigma_{\text{обр}}(r, \lambda, m) \cdot f(r) \cdot dr, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{обр}}$  — поперечные сечения обратного рассеяния гидрометеоров;

$f(r)$  — функция распределения гидрометеоров;

$r$  — радиус гидрометеора;

$\lambda$  — длина электромагнитной волны;

$m$  — комплексный показатель преломления гидрометеоров.

Известно, что капли в осадках под действием восходящих потоков деформируются, сплюсываясь в горизонтальной плоскости. Чем крупнее капли, тем больше они расплющиваются. Связь фактора формы капли и его эквивалентного диаметра согласно результатам лабораторных исследований имеет вид [5], [7]:

$$\frac{a}{b} = 1,012 - 0,144 \cdot D - 1,03 \cdot d_v^2,$$

где  $a$  — максимальная ось,

$b$  — минимальная полуось сфероиде,

$d_v$  — эквивалентный диаметр капли (диаметр сферической капли равного объема).

Расчеты поперечных сечений обратного рассеяния для таких капель желательно проводить по точным методам. В данной работе рассеяние электромагнитной волны несферическими частицами исследуется с помощью метода разделения переменных SVM. Согласно методу, сфероидальная система координат  $(\xi, \eta, \phi)$  введена таким образом, что начало координат совпадает с центром капли формы сфероиде. Электромагнитная волна, падающая под углом  $\alpha$  к оси вращения частицы, может быть представлена как суперпозиция волн двух типов (ТЕ и ТМ моды). Выражения для расчета обратного рассеяния имеют вид [8]:

для ТМ моды:

$$\sigma^{TM} = \frac{4}{c^2 \left[ (\xi_0^2 - \tilde{f}) (\xi_0^2 - \tilde{f} \cos^2 \alpha) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (2)$$

$$\left| \sum_{l=1}^{\infty} i^{(l+1)} b_l^{(1)} S_{ll}(c, \cos \alpha) - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} i^{(l-1)} \left( k_1 a_{ml}^{(1)} S_{ml}(c, \cos \alpha) - i b_{ml}^{(1)} S'_{ml}(c, \cos \alpha) \right) \sin \alpha \right|^2,$$

для ТЕ моды:

$$\sigma^{TE} = \frac{4}{c^2 \left[ (\xi_0^2 - \tilde{f}) (\xi_0^2 - \tilde{f} \cos^2 \alpha) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (3)$$

$$\left| \sum_{l=1}^{\infty} i^{(l+1)} a_l^{(1)} S_{ll}(c, \cos \alpha) - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} i^{(l-1)} \left( k_1 a_{ml}^{(1)} S_{ml}(c, \cos \alpha) - i b_{ml}^{(1)} S'_{ml}(c, \cos \alpha) \right) \sin \alpha \right|^2,$$

где  $c_i = k_i \frac{d}{2}$ ,  $S_{ml}(c_i, \eta)$  — вытянутые угловые сфероидальные функции с нормировочным множителем  $N_{ml}(c_i)$ ,  $\bar{S}_{ml}(c_i, \eta) = N_{ml}^{-1}(c_i) S_{ml}(c_i, \eta)$  — вытянутые угловые сфероидальные функции,  $R_{ml}^{(1),(3)}(c_i, \xi)$  — вытянутые радиальные сфероидальные функции первого и третьего порядка,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число.

### Результаты расчетов

Были проведены численные эксперименты по алгоритму SVM для реальных капель радиусом от 2 мкм до 4 мкм по формулам (2) и (3) для рабочей длины волны ДМРЛ-С (5,6 см). Для эквивалентных сферических капель расчеты проводились по известным формулам Ми [6] (таблица 1).

Оказалось, что в случае параллельного падения электромагнитной волны сечения обратного рассеяния ТЕ и ТМ моды совпадают и равны сечению обратного рассеяния, как в предельном случае приближения к сферической капле,

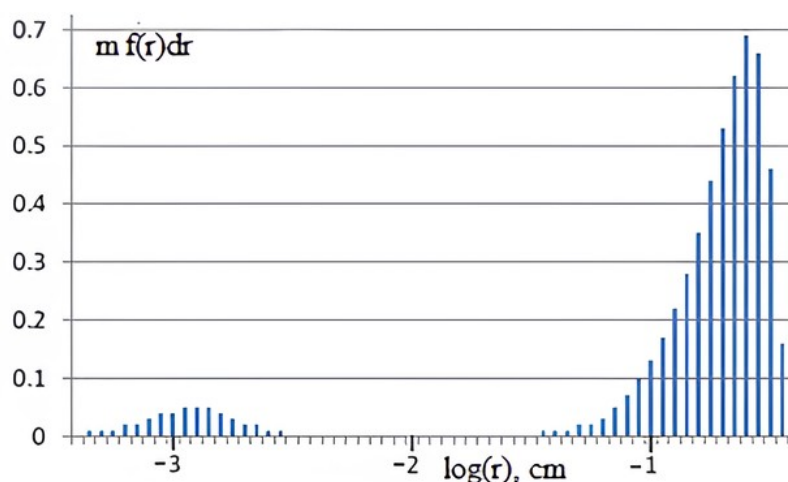
т.е.  $a/b \rightarrow 1$ . При перпендикулярном падении электромагнитной волны обратное рассеяние ТМ моды и ТЕ моды различаются друг от друга как видно из таблицы 1. С увеличением размера капли (фактора формы) разница значений поперечных сечений обратного рассеяния при вертикальной поляризации и горизонтальной поляризации становится более существенной. Например, для капель размером 4 мм поперечные сечения обратного рассеяния отличаются на порядок от аналогичных значений сферических капель, что может существенно сказаться на результатах дистанционных измерений (на значении радиолокационной отражаемости).

Таблица 1 - Сечения обратного рассеяния капель при перпендикулярном падении радиоволн

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.8.1>

$r_v$ , мм	$a/b$	$\sigma_{Mu}$	$\sigma^{TM}$	$\sigma^{TE}$
0,1	1,003	6,338265E-08	6,304193E-08	6,355535E-08
0,5	1,024	3,911653E-05	3,773460E-05	3,984858E-05
1	1,064	5,992600E-04	5,436232E-04	6,300234E-04
1,5	1,141	2,780314E-03	2,245041E-03	3,092989E-03
2	1,266	7,569736E-03	5,107772E-03	9,152905E-03
2,5	1,465	1,753602E-02	8,656354E-03	2,730647E-02
3	1,802	8,373269E-02	1,917644E-02	1,941498E-01
3,5	2,460	2,489758E-01	3,391091E-02	6,087130E-01
4	4,209	4,033102E-01	1,509894E-02	1,588960E+00

Для модельного конвективного облака было получено, что его структура неоднородна. Водность и ледность изменялись в облаке от долей грамма до нескольких грамм. Максимальные значения водности и ледности наблюдались вблизи восходящего потока, на периферии облака — на порядки меньше. Облако достигло стадии максимального развития на 40-й минуте, на рисунке 1 приведено распределение капель по размерам в области повышенной водности (на уровне 4,4 км). В этой области крупные капли деформированы.

Рисунок 1 - Спектры капель в момент времени  $t=40$  минDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.8.2>

*Примечание: по вертикальной оси отложена водность в граммах в каждом интервале размеров частиц; по горизонтальной – логарифм радиуса*

Блок «Визуализация» позволяет демонстрировать выходную продукцию модели облака. В данном исследовании на рисунке 2 представлены отражаемости капель на 40-й минуте развития облака: вертикально поляризованная  $Z_b=51$  dBZ на уровне 4,4 км, горизонтально поляризованная  $Z_a=69$  dBZ на уровне 4,0 км и дифференциальная отражаемость  $Z_d=18$  dBZ на уровне 4,0 км (отношение мощности обратного сигнала на горизонтальной и вертикальной поляризациях).

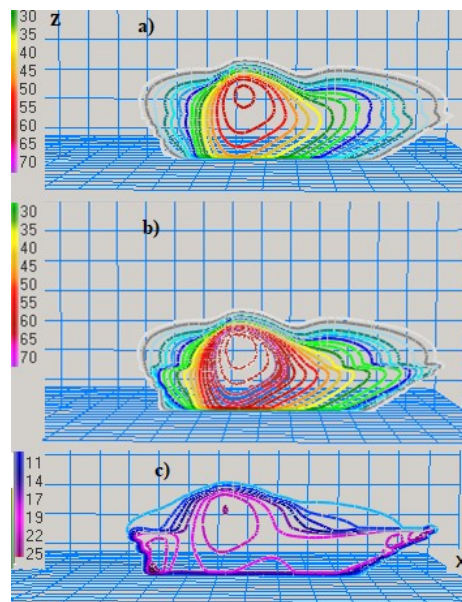


Рисунок 2 - Отражаемость капель на 40-й минуте развития облака:

*a* - вертикально поляризованная; *b* - горизонтально поляризованная; *c* - дифференциальная отражаемость  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.8.3>

По результатам расчетов область деформированных капель может выделяться достаточно эффективно (значение дифференциальной отражаемости составляет более 10 dBZ) по поляризационным характеристикам. В области повышенной водности и вследствие деформации капель появляются условия для возникновения разности мощности отраженного излучения по вертикальному и горизонтальному поляризационным каналам.

### Обсуждение

В настоящей работе модель рассеяния построена при допущении, что капли в осадках неподвижны относительно падающей волны. Такое допущение может исказить результаты расчетов поляризационных характеристик. Для увеличения точности расчетов предполагается учесть ориентацию капель, а также спектры твердых гидрометеоров (кристаллов, градин т.д.).

В будущем, для более полной оценки поляризационных свойств осадков, будет расширен набор рассматриваемых поляриметрических характеристик за счет включения дифференциальной фазы, коэффициента корреляции и линейного деполаризационного отношения.

### Заключение

Предложенная методика определения поляризационных характеристик облаков обладает значительным аналитическим потенциалом и открывает возможности для совершенствования алгоритмов обработки информации и повышения информативности критериев идентификации метеорологических явлений.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Ashabokov B.A. Numerical modeling of thermodynamical and microstructural parameters of convective clouds in the process of their evolution / B.A. Ashabokov, A.V. Shapovalov, V.A. Shapovalov [et al.] // Journal of Mathematical Sciences. — 2021. — Vol. 253. — № 4. — P. 478–487.
2. Bekkiev K.M. Mathematical model of a convective cloud in hail suppression activities / K.M. Bekkiev, V.N. Lesev, V.A. Shapovalov [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. — 2022. — Vol. 47. — № 7. — P. 499–506.
3. Созаева Л.Т. Обратное рассеяние радиолокационного излучения облачными и дождевыми каплями / Л.Т. Созаева, М.М. Жабоева // Труды ГГО. — 2020. — № 599. — С. 140–151.
4. Созаева Л.Т. Влияние деформации растущих в электромагнитном поле капель на их рассеивающие свойства / Л.Т. Созаева, В.С. Макитов // Наука. Инновации. Технологии. — 2019 — № 3. — С. 98–106.
5. Andsager K. Laboratory measurements of axis ratios for large raindrops / K. Andsager, K. Beard, N. Laird // J. Atmos. Sci. — 1999. — № 56. — P. 2673–2683.

6. Bohren C. Absorption and Scattering of Light by Small Particles / C. Bohren, D. Huffman. — New York: John Wiley & Sons, 1983. — 660 p.
7. Chandrasekar V. Axis ratios and oscillation of raindrops / V. Chandrasekar, W.A. Cooper, V.N. Bringi // J. Atmos. Sci. — 1988. — № 45. — P. 1323–1333.
8. Farafonov V.G. Application of non-orthogonal bases in the theory of light scattering by spheroidal particles. Light Scattering Reviews / V.G. Farafonov // Springer-Praxis. — 1993. — № 8. — P. 189–268.
9. Mishchenko M.I. Scattering, Absorption and Emission of Light by Small Particles / M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis // Cambridge: Cambridge Univ. Press. — 2002. — 445 p.
10. Voshchinnikov N.V. Optical properties of spheroidal particles / N.V. Voshchinnikov, V.G. Farafonov // Astrophysics and Space Science. — 1993. — № 204 (10). — P. 19–86.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Ashabokov B.A. Numerical modeling of thermodynamical and microstructural parameters of convective clouds in the process of their evolution / B.A. Ashabokov, A.V. Shapovalov, V.A. Shapovalov [et al.] // Journal of Mathematical Sciences. — 2021. — Vol. 253. — № 4. — P. 478–487.
2. Bekkiev K.M. Mathematical model of a convective cloud in hail suppression activities / K.M. Bekkiev, V.N. Lesev, V.A. Shapovalov [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. — 2022. — Vol. 47. — № 7. — P. 499–506.
3. Sozaeva L.T. Obratnoe rasseyaniye radiolokatsionnogo izlucheniya oblachnimi i dozhdevimi kaplyami [Backscatter of radar radiation by cloud and rain drops] / L.T. Sozaeva, M.M. Zhaboeva // Trudi GGO [The works of the GGO]. — 2020. — № 599. — P. 140–151. [in Russian]
4. Sozaeva L.T. Vliyaniye deformatsii rastushchikh v elektromagnitnom pole kapel na ikh rasseivayushchie svoystva [Influence the deformation of the drops growing in the electromagnetic field on their scattering properties] / L.T. Sozaeva, V.S. Makitov // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii [Science. Innovation. Technologies]. — 2019 — № 3. — P. 98–106. [in Russian]
5. Andsager K. Laboratory measurements of axis ratios for large raindrops / K. Andsager, K. Beard, N. Laird // J. Atmos. Sci. — 1999. — № 56. — P. 2673–2683.
6. Bohren C. Absorption and Scattering of Light by Small Particles / C. Bohren, D. Huffman. — New York: John Wiley & Sons, 1983. — 660 p.
7. Chandrasekar V. Axis ratios and oscillation of raindrops / V. Chandrasekar, W.A. Cooper, V.N. Bringi // J. Atmos. Sci. — 1988. — № 45. — P. 1323–1333.
8. Farafonov V.G. Application of non-orthogonal bases in the theory of light scattering by spheroidal particles. Light Scattering Reviews / V.G. Farafonov // Springer-Praxis. — 1993. — № 8. — P. 189–268.
9. Mishchenko M.I. Scattering, Absorption and Emission of Light by Small Particles / M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis // Cambridge: Cambridge Univ. Press. — 2002. — 445 p.
10. Voshchinnikov N.V. Optical properties of spheroidal particles / N.V. Voshchinnikov, V.G. Farafonov // Astrophysics and Space Science. — 1993. — № 204 (10). — P. 19–86.