

УДК: 551.508.85+551.501.8

DOI: 10.26907/rwp29.2025.452-455

## МЕТОД ДВУХВОЛНОВОЙ КАЛИБРОВКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Ю.Б. Павлюков

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» Росгидромета,  
141701, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3, корп.19, E-mail: yipav@orm.mpt.ru

**Аннотация.** Представлены результаты практической апробации предложенного ранее метода двухволновой калибровки (МДК) радиолокационных измерений атмосферных осадков, позволяющего повысить их точность за счет учета крупномасштабных вариаций микроструктуры осадков. Подход, использованный в МДК, может быть использован при разработке и усовершенствовании методов обработки данных двухволновых метеорологических радиолокаторов, включая функционирующие на спутниках типа TRMM/GPM.

**Ключевые слова:** метеорологические радиолокаторы; измерение атмосферных осадков; вариации микроструктуры

## DUAL-WAVELENGTH CALIBRATION FOR ATMOSPHERIC PRECIPITATION MEASUREMENTS BY WEATHER RADAR

Yu.B. Pavlyukov

**Abstract.** The results of practical testing of the previously proposed dual-wavelength calibration (DWC) procedure for radar measurements of atmospheric precipitation are presented. DWC allows increasing their accuracy by taking into account large-scale variations in the precipitation microstructure. The approach used in DWC can be used in developing and improving methods for processing data from dual-wavelength weather radars including radars on TRMM/GPM satellites.

**Keywords:** weather radars; precipitation measurements; DSD variations

### Введение

В условиях усиливающихся климатических изменений возрастающую роль в глобальной системе наблюдений Всемирной Метеорологической Организации (IGSN WMO) играют доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ) [1]. Одними из основных информационных продуктов ДМРЛ являются интенсивность  $R$  (мм/час) и накопленная сумма  $Q$  (мм) выпадающих осадков, имеющие важное прикладное значение для широкого круга потребителей. Как правило, в оперативной метеорологии для расчета  $R$  и  $Q$  сегодня используется полуэмпирическое соотношение Маршала-Пальмера (М-П) [1, 6], связывающее  $R$  с измеренной радиолокационной (р/л) отражаемостью  $Z$  ( $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ):

$$Z = A * R^b, \quad (1)$$

в котором значения коэффициентов  $A$  и  $b$  принимаются постоянными. На малых пространственно-временных масштабах микроструктура атмосферных осадков, т.е. распределение частиц осадков по размерам (DSD), значительно изменяется: Brandes описал более 70 пар A-b, соответствующих различным физико-географическим условиям выпадения осадков [6]. При измерении суточного слоя осадков ( $Q_{24}$ , мм) в отдельные дни ошибки р/л измерений по М-П могут достигать 250% и более относительно данных наземных измерений [1]. Однако, с увеличением масштаба осреднения DSD приближается к экспоненциальному распределению с единственным параметром –  $R$  [4], а величина ошибок уменьшается.

Для учета мезомасштабных вариаций DSD были предложены различные р/л методы, позволяющие измерять более одного параметра: например, накопленное ослабление в осадках PIA на  $\lambda_1$ , или р/л отражаемость на другой (не ослабляемой) длине волнны  $Z_2$  [1–3, 5], однако, по различным причинам в рабочую методику повышения точности р/л измерения осадков эти предложения воплощены не были.

Ранее [7, 8, 9, 10] нами был предложен полуэмпирический метод двухволновой калибровки (МДК) р/л измерений атмосферных осадков на двухволновом радиолокаторе, функционирую-

щем на ослабляемой в осадках длине волны  $\lambda_1=3,1$  см и существенно менее ослабляемой второй длине волны  $\lambda_2=10$  см, что обеспечивает возможность одновременного измерения р/л отражаемости  $Z_2$  и ослабления р/л излучения в осадках на  $\lambda_1$ . МДК позволяет учесть в расчетах крупномасштабные вариации DSD-микроструктуры полей осадков, которые являются одним из основных источников ошибок р/л измерений осадков, и тем самым повысить их точность.

В докладе представлены результаты практической апробации МДК на данных реальных р/л наблюдений двухволнового р/л комплекса АКСОПРИ (Москва), созданном на базе отечественного двухволнового метеорологического радиолокатора МРЛ-5. Кратко описаны организация р/л наблюдений, методика оценки точности измерений характеристик атмосферных осадков, критерии отбора отдельных случаев для анализа, а также приведены оценки точности МДК в сравнении с результатами однопараметрического метода на основе МП.

Актуальность полученных результатов возрастает в последнее время в связи с успешной реализацией проектов двухволновых осадкомерных радиолокаторов космического базирования в миссиях GPM (*Global Precipitation Measurement*, NASA-JAXA, 2014-н.в.) FY-3G (Китай, 2023-н.в.), CloudSat (NASA, 2006-2023), EarthCARE (ESA, JAXA, NICT, 2024-н.в.) и необходимостью разработки отечественных методов и ПО тематической обработки аналогичных данных.

### **Организация радиолокационных наблюдений и обработки данных**

Р/л наблюдения проводились в автоматизированном круглосуточном режиме с 10-мин периодом обновления информации. В каждом цикле наблюдений проводилось круговое сканирование верхней полусфера под несколькими углами места, что обеспечивало получение детальных карт р/л параметров атмосферы. Наблюдения проводились на удалении до 200 км от МРЛ до высоты 15 км с азимутальным и радиальным разрешением  $1^\circ \times 1$  км.

В каждом цикле проводились синхронные наблюдения на двух длинах волн. В ходе вторичной обработки измеренные в каждом элементе разрешения значения мощности преобразовывались в значения эквивалентной р/л отражаемости  $Z_i$  на соответствующей длине волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Одновременные р/л наблюдения в двух диапазонах проводились с использованием основной антенны МРЛ-5 диаметром 4,5 м, что обуславливала различную ширину диаграммы направленности (ДНА) на  $\lambda_1$  и  $\lambda_2 - 0,45^\circ$  и  $1,5^\circ$ , соответственно. В ходе вторичной обработки данных на длине волны  $\lambda_1$  рассчитывались значения  $Z_1^{sin} = \Sigma(w_i Z_{1,i})$  с “синтетической” ДНА шириной  $= 1,5^\circ$  по нескольким значениям  $Z_{1,i}$  на самых низких углах места  $i=1,\dots,5$ . Веса  $w_i$  выбирались таким образом, чтобы обеспечить в угломестном направлении совпадение “синтетической” ДНА на  $\lambda_1$  с ДНА на  $\lambda_2$ . В азимутальном направлении для снижения статистических флуктуаций проводилось осреднение последовательных отсчетов в каждом азимутальном дисcrete.

Дополнительной проблемой, осложняющей измерение ослабления в осадках по разности  $Z_1$  и  $Z_2$ , являлось различие в используемых на  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  линейных поляризациях: вертикальной и горизонтальной, соответственно. Для компенсации этого эффекта в значения  $Z_1$  вносилась специально рассчитанная поправка  $\sim ZDR$ , зависящая от величины  $Z_2$ .

В процессе обработки трехмерные массивы  $Z_1$  и  $Z_2$  пересчитывались в CAPPI-сечения на выбранных высотных уровнях в узлах регулярной прямоугольной сетки с шагом 4 км. Интенсивность осадков  $R(\text{мм}/\text{ч})$  рассчитывалась по измерениям  $Z_i$  на высоте 600 м.

Расчет суточных сумм осадков  $Q24(\text{мм})$  проводился с использованием архива цифровых р/л карт  $R(\text{мм}/\text{ч})$  в последовательные 10-мин циклы наблюдений с учетом рассчитанного среднего вектора переноса зон осадков и облачных систем.

### **Оценка эффективности метода двухволновой калибровки**

Для проведения оценки был выбран теплый сезон 2000 г., характеризовавшийся повышенным средним количеством выпавших осадков в отличие от ряда соседних “засушливых” сезонов, в котором были отобраны 18 суток с значительными осадками ( $Q24 > 4$  мм) и заметными проявлениями ослабления р/л излучения на  $\lambda_1$  в осадках. Из сравнения исключались дни со слабыми осадками, без заметных проявлений ослабления. В течение этого сезона р/л обо-

рудование было модернизировано и оперативные р/л наблюдения в двухволновом режиме проводились регулярно, без перерывов.

Оценка точности р/л измерений осадков двумя методами (МДК и М-П) проводилась путем сравнения результатов р/л измерений 24-час сумм осадков с данными наземных измерений осадков на гидрометеостанциях (ГМС) Росгидромета, для чего рассчитывались мультиплексивный и аддитивный коэффициенты их согласования. Сравнения проводились на удалении до 100 км от МРЛ, где р/л измерения осадков более точны.

### Анализ результатов

Анализ метеоситуаций показал, что практически во всех в отобранных случаях осадки носили фронтальный характер, сопровождались грозами и выпадением града.

Среди отобранных случаев были выявлены случаи проявления сильного ослабления практически по всем азимутальным направлениям в водной пленке на поверхности радиопрозрачного укрытия (РПУ) МРЛ и проявления "сверхрефракции" – мощных отражений от местников за счет аномального распространения радиоизлучения в условиях температурной инверсии. Такие случаи приводили к неправильной интерпретации р/л измерений и исключались из дальнейшего рассмотрения.

В оставшихся рассмотренных случаях, которые можно характеризовать либо как завышение, либо – как занижение р/л осадков относительно наземных измерений на ГМС «в среднем по полю», применение МДК привело к снижению ошибки в 2-4 раза. При этом, если величина средней - по всем ГМС в зоне р/л обзора снижалась, то дисперсия результатов отдельных измерений на ГМС – не уменьшалась, что, по нашему мнению, объясняется разными причинами этих ошибок: крупномасштабные погрешности, которые проявляются как общее занижение/завышение р/л измерений - определяются мезомасштабными вариациями DSD, а дисперсия парных измерений "МРЛ-ГМС" относительно идеальной прямой может объясняться как влиянием мелкомасштабных вариаций DSD, так и различиями "точечных" измерений осадков на ГМС и "объемным" измерениями осадков на МРЛ.

### Выводы

Проведена практическая апробация МДК на данных оперативных метеорологических радиолокационных наблюдений в Москве на двухволновом радиолокаторе МРЛ-5.

Полученные результаты подтверждают установленные ранее методом математического моделирования условия успешного применения МДК для уточнения р/л измерений осадков:

- наличие накопленного ослабления в осадках на  $\lambda_1$  не менее 4-5 дБ;
- протяженность зоны накопления ослабления в осадках не менее 25-30 км;
- высокая коррелированность ( $r > 0,9 \div 0,95$ ) радиальных профилей  $Z_1(r)$ ,  $Z_2(r)$  в зоне калибровки;
- зона калибровки МДК должна включать 5-10 азимутальных направлений, удовлетворяющих вышеуказанным условиям;
- радиальное разрешение измерений  $Z_i(r)$  должно быть не хуже 1 км, а повышение разрешения (с 1 до 0,1 км) существенно повышает точность калибровки;

Необходимыми условиями успешности применения МДК в реальных условиях являются: 1) стабильность (в пределах  $\pm 0,5$  дБ) и точность абсолютной калибровки обоих каналов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  МРЛ на протяжении всего периода р/л измерений, 2) отсутствие проявлений т.н. "сверхрефракции" и проявления значительного эффекта ослабления в пленке осадков на РПУ МРЛ.

При соблюдении приведенных выше условий применение МДК позволяет снизить среднюю погрешность р/л измерений  $Q_{24}$  от 1,4 до 4 раз и сократить в 2÷4 раза общее смещение (мм) р/л измерений относительно наземных для отдельных ГМС в течение всего сезона за счет учета мезомасштабных (1-100 км) вариации DSD.

### Список литературы

1. WMO – No. 625, Technical Note No. 181, Use of radar in meteorology, 1985. – P. 107.
2. Rogers, C.w.C. and R. Wexler. Rainfall determination from 0.86 and 1.82 cm radar measurements, Proc. 10<sup>th</sup> AMS Conf. on Radar Meteorology, Boston, 1963. – P. 260–270.
3. Bridges, J.E., Feldman J.R. A radar attenuation-reflectivity technique for the remote measurement of drop-size distributions of rain // Journal of Applied Meteorology. – 1966. – Vol. 5. – No. 3. – P. 349–357.
4. Боровиков А.М., Костарев В.В., Мазин И.П., Смирнов В.И., Черников А.А. Радиолокационные измерения осадков. –Л.: Гидрометеоиздат, 1967.
5. Kostarev V.V., Chernikov A.A. The adjustment of radar estimates of rainfall with radar attenuation data // Proc. 13<sup>th</sup> AMS Conf. on Radar Meteorology, 1968. – Boston. – P. 396–399.
6. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
7. Melnichuk Yu., Pavlyukov Yu. Operational adjustment of Z-R relation coefficients for radar rainfall accuracy improvement by dual-wave attenuation measurements. Proc. 30<sup>th</sup> AMS Conference on Radar Meteorology, American Meteorol. Soc., Munich, Germany, 2001.
8. Pavlyukov Yu. Application experience of attenuation-tuned Z-R relation in radar rainfall measurements. Preprint 31-st AMS Conference on Radar Meteorology, American Meteorol. Soc., Seattle, USA, 2003.
9. Павлюков Ю.Б. Физико-математическая модель для интерпретации данных двухволнового радиолокационного зондирования облачности и осадков // Труды Международной конференции «Обратные и некорректные задачи математической физики», посвященной 75-летию академика М.М. Лаврентьева, Новосибирск, Россия, 20-25 августа 2007 г.
10. Pavlyukov Yu., Pavlyukova E. Physical and statistical model for dual-wave weather radar observations, Abstracts of URSI GASS 2020, Rome, Italy, 29 August – 5 September 2020.