

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ЖИДКОКАПЕЛЬНЫХ ОСАДКОВ

*С. Ф. Коломиец*

*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный.*

Простота зависимости Маршала и Пальмера для жидкокапельных осадков, а также её надежное экспериментальное подтверждение послужили мощным стимулом к началу изучения дождей радиофизическими методами. Потребовалось два десятка лет, чтобы отработать методики радиолокационных измерений и убедиться в том, что зависимость, предложенная Маршалом и Пальмером, является лишь одной из возможных. Более того, время усреднения измерений, на котором начинает выполняться выявленная ими экспоненциальная зависимость (186 измерений на фильтровальной бумаге с экспозицией ~30 с) во многих случаях сравнима с постоянной времени атмосферных процессов, сопровождающих осадки. Таким образом, последние вносят свой, порой существенный, вклад в усредненную зависимость между отражаемостью  $Z$  и интенсивностью  $R$  дождя.

Анализируя историю развития радиолокационных измерений в дождях, можно выделить три основных этапа. На первом этапе основное внимание уделялось экспериментальной проверке экспоненциальной зависимости Маршала и Пальмера, формированию первых радиофизических моделей для измерений в дождях.

Второй этап характеризовался поиском более гибких, но в то же время более точных зависимостей для описания микроструктуры дождя. Начало второго этапа можно связать с появлением в конце 60-х прошлого столетия классического дидрометра Джосса-Валдвогеля, позволявшего автоматизировать проведение контактных измерений распределения капель по размерам. На этом этапе для описания распределения капель по размерам была введена трехпараметрическая гамма-функция. Было показано также, что для анализа доплеровских измерений в дождях требуется более точная аппроксимация зависимости скорости падения капли от диаметра и предложен ряд подобных зависимостей, удобных в практическом использовании.

Выбор гамма-функции, как средства аппроксимации распределения капель по размерам, указывал на чрезвычайную временную и пространственную изменчивость осадков: при определенном сочетании параметров, гамма-функция «вырождается» в экспоненциальный закон Маршала-Пальмера, позволяя, в то же время, аппроксимировать достаточно «узкие» распределения. Однако существенных изменений в общих подходах к изучению осадков радиолокационными методами не произошло. В большинстве исследований изучались сильноусредненные данные, которые описывались не экспоненциальным распределением, а гамма-функцией, для проведения измерений использовался доплеровский локатор вместо классического.

Третий этап, начало которого следует отнести к середине 90-х (появление видеодидрометров) можно охарактеризовать как «расставание с простотой» в радиофизических моделях дождя. В исследованиях этого периода предпринимаются попытки учитывать пространственную и временную неоднородность параметров. Ведется поиск пространственных и временных масштабов измерений, на которых модели с использованием гамма-функции для распределения капель по размерам и уточненной аппроксимации скорости падения от размера капли давали бы минимальную погрешность дистанционных оценок. Однако в этом направлении до сих пор обнадеживающих результатов не получено.

Вышеприведенный анализ указывает на преобладание «статистико-механических» подходов к изучению дождей, которые заключаются в том, что для микроструктуры выбирается априорная модель и далее экспериментальным путем находятся пространственные и временные масштабы, применимости этой модели или наоборот, проводятся измерения в некоторых масштабах времени и пространства с целью подбора наиболее подходящей модели микроструктуры. Говорить об окончании третьего этапа

пока рано. Даже беглый анализ современных публикаций, говорит об очередном росте интереса к исследованию дождей радиолокационными методами на базе уточненных моделей микроструктуры. Однако имеющиеся результаты, позволяют поставить вопрос об адекватности подходов к обработке радиолокационных данных, которые получаются в таких измерениях.

Не отрицая важности продолжения работ в направлении усложнения параметрических моделей, отметим, что чрезвычайная изменчивость изучаемого процесса, регистрируемая современными средствами измерений, вряд ли сможет быть описана трехпараметрической моделью. В этом отношении хотелось бы отметить, что отдельные публикации, содержащие результаты «прямой» статистической обработки больших массивов измерений, уже указывают на необходимость использования бимодального гамма-распределения (или подобного ему, описываемого шестью параметрами), а теоретические работы указывают на возможность формирования трех мод в распределении капель по размерам. В этом отношении небезынтересен вопрос о «достаточном» количестве параметров, требуемых для описания исследуемых процессов с необходимой в настоящее время точностью и достоверностью. Тема выходит за рамки доклада и требует отдельного рассмотрения, но этим вопросом, хотелось подчеркнуть, что на уровень сложности «перспективных» моделей дождя позволяет говорить об альтернативных подходах к их формированию, причем без существенного увеличения сложности.

Один из таких подходов состоит в привлечении динамических и термодинамических параметров атмосферы для классификации осадков, а также учета в моделях временной динамики самой микроструктуры. Он открывает возможности эффективного использования мультипараметрических методов дистанционных измерений, но его использование требует, прежде всего, создания физически обоснованной модели, связывающей микроструктуру, интенсивность и отражаемость дождя. До сих пор такой модели не предлагалось.

Обычно при обработке синхронных измерений интенсивности и отражаемости строится регрессионная зависимость вида  $Z=A \cdot R^b$ . Аналитические и классификационные возможности этой зависимости оставляют желать лучшего, так как специфика изучаемого процесса проявляется как в значении мультипликативного коэффициента  $A$ , так и в значении показателя  $b$ . Наиболее полные исследования  $Z$ - $R$  зависимости в классическом виде являются до сих пор работы Фудживары [1, 2], которые содержит в общем виде лишь качественную диаграмму классификации

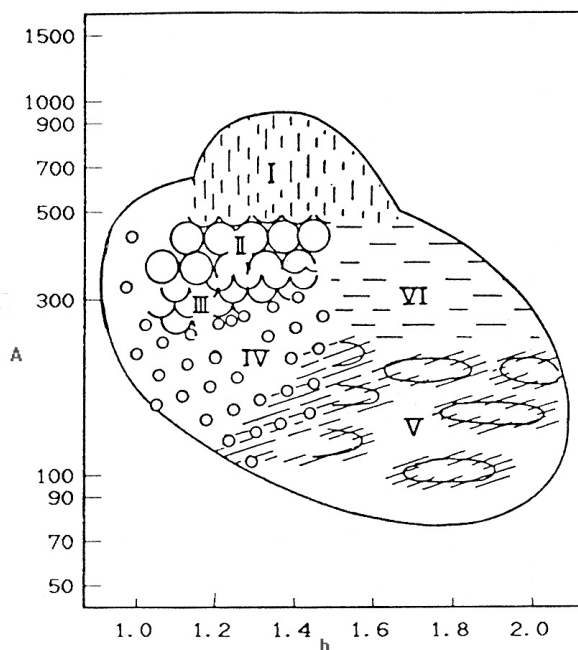
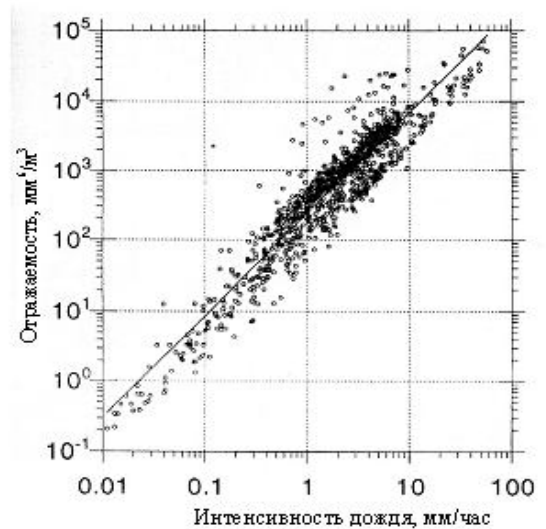
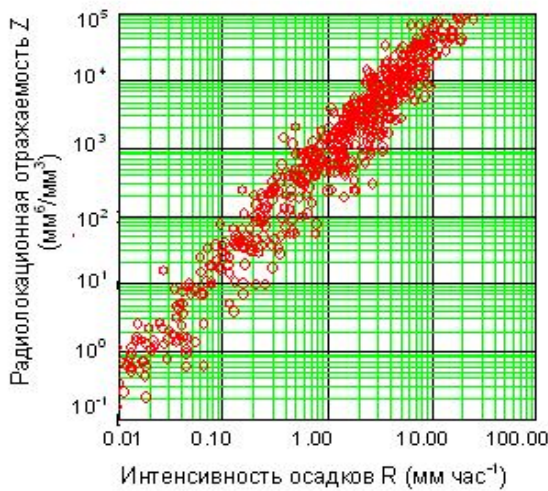


Рис.1. Взаимозависимость коэффициентов  $A$  и  $b$  в соотношении  $Z = AR^b$ , полученная различными авторами для разных типов дождей [1].

- I – интенсивные дожди,  $Z_{max} > 104$  ( $I = 15\text{мм/час}$ );
- II – слабые радиоэхо при однородных осадках  $Z \sim 5\text{ммб/мЗ}$ ;
- III – ячейки малых размеров со слабым радиоэхо;
- IV – малое радиоэхо от слабых осадков при сухой атмосфере;
- V – радиоэхо, полученные для верхней части облака.
- VI- Изолированные радиоэхо в грозах.

осадков с использованием параметров  $A$  и  $b$  (см. рис. 1). Попытки исследования взаимных корреляций этих параметров не дали обнадеживающих результатов. В теоретических исследованиях с использованием гамма-функции для распределения капель по размерам такой подход не позволяет получить аналитические зависимости для параметров  $A_0$  и  $b$  и, следовательно, установить связь макропараметров  $Z$  и  $R$  с параметрами микроструктуры. Фиксация значения показателя  $b$  позволила бы преодолеть указанные сложности, и такая модель действительно была предложена [10] в ходе международного эксперимента TOGA COARE, затем достаточно широко цитировалась и применена к поляриметрическим измерениям [11]. За «эталонную модель» дождя принималась зависимость  $Z=A \cdot R^b$  с показателем  $b = 1.5$  (математическое ожидание по результатам обработки массового экспериментального материала), а конкретное наблюдение оценивалось по степени



а)

б)

Рис. 2. Графики Z-R соотношения.

а) Результаты расчетов с использованием обобщенного мультипликативного коэффициента модельных временных рядов динамической модели дождя

б) Экспериментальные данные о Z-R соотношении с одноминутным усреднением.

отклонения от «эталона». Такой подход предлагает лишь формальный способ оценки и классификации изучаемого события, но практически не содержит механизмов его ясной физической интерпретации. Независимо от работ, проводимых в рамках эксперимента TOGA COARE, автором был предложен подход с использованием фиксированного показателя степени  $b = 2$ . Он имеет ясный физический смысл, т.к. интенсивность дождя  $R$  – пропорциональна кубу от размера капли, радиолокационная отражаемость  $Z$  – шестой степени. В этом случае мультипликативный коэффициент  $A$  – зависит от распределения капель по размерам, и их общего количества. Причем использование значения  $b = 2$  позволяет простейшим (в отличие от  $b = 1.5$ ) и путем выразить коэффициент  $A$  через параметры микроструктуры. Эта зависимость, являющаяся первой составной частью предлагаемого подхода, была названа «квадратичной регрессией с обобщенным мультипликативным коэффициентом», а для мультипликативного коэффициента введено обозначение  $A_0$ .

Если принять распределение капель по размерам в виде:

$$n(D)dD = \frac{N_0 \beta^{m+1}}{\Gamma(m+1)} D^m e^{-\beta D} dD. \quad (1)$$

где  $N_0$  – концентрация капель дождя в единице объема,  $m, \beta$  – параметры формы гамма-распределения,  $D$  – диаметр капли дождя.

и уточненную аппроксимацию скорости падения капли от её размера в виде [9]:

$$v(D) = B(1 - \exp(-CD)) - ED, \quad (2)$$

где  $D$  [мм] – диаметр капли в интервале от 0.25 до 5 мм  
 $B = 18.67$  [м/с],  $C = 0.318$  [мм<sup>-1</sup>],  $E = 1.145$  [10<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>] – коэффициенты,  $v$  [м/с] – скорость свободного, гравитационного падения.

то аналитическое соотношение для  $A_0$ , с использованием параметров гамма-распределения можно записать в виде:

$$A_0 = \frac{1}{N_0} U(m) Y(m, \beta), \quad (3)$$

где:

$$Y(m, \beta) = \left[ 1 - F \frac{m+4}{\beta} - \left( \frac{\beta}{\beta+C} \right)^{m+4} \right]^{-2}, U(m) = \frac{\Gamma(m+1) \Gamma(m+7)}{\Gamma(m+4)^2 G}, G = 3.5 \times 10^{-2}$$

$F = \frac{E}{B} = 61.3$  [м<sup>-1</sup>].  $B = 18.67$  [м/с],  $C = 0.318$  [мм<sup>-1</sup>],  $E = 1.145$  [10<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>] – коэффициенты из (2).

Учитывая соотношения для гамма-функции:

$$\beta(m, D_0) = \frac{m+1}{D_0}, \text{ и } m(D_0, \sigma) = \left( \frac{D_0}{\sigma} \right)^2 - 1 \quad (4)$$

выражение для  $Y$  выглядит следующим образом:

$$Y(\sigma, D_0) = \left[ 1 - F \frac{\left( \frac{D_0}{\sigma} \right)^2 + 3}{\frac{D_0}{\sigma^2} - 1} - \left( \frac{\frac{D_0}{\sigma^2}}{\left( \frac{D_0}{\sigma^2} + C \right)} \right)^{\left( \frac{D_0}{\sigma} \right)^2 + 3} \right]^{-2} \quad (5)$$

Для того чтобы добиться соответствия опыту, (который показывает  $b \sim 1.5$ ) следует принять во внимание временную динамику микроструктуры. Использование гамма-функции для аппроксимации распределения капель по размерам позволяет аналитически выразить коэффициент  $A_0$  через величины, измеряемые доплеровским локатором непосредственно (включая форму доплеровского спектра, модель использования которой предлагается впервые). Однако статистики доплеровских спектральных параметров для различных фаз дождя в литературе найти не удалось, несмотря на достаточный опыт доплеровских измерений в дождях. Поэтому временные ряды для основных параметров доплеровского спектра и распределения в них были установлены по косвенным измерениям. Расчеты, проведенные с использованием установленных распределений в

рядах, показали приемлемое совпадение с экспериментом (см. рис. 2). Установленные статистики доплеровских спектральных параметров для различных фаз дождя, являющиеся второй частью предлагаемого подхода, составляют «динамическую модель микроструктуры дождя».

Схема измерений с использованием «обобщенного мультипликативного коэффициента» и «динамической модели микроструктуры дождя» выглядит следующим образом: измерения средней частоты, ширины и параметров формы доплеровского спектра позволят на некотором времени измерения  $t$  оценить  $A_0$ . Далее,  $R$  (при известной радиолокационной отражаемости  $Z$ ). Серия таких измерений на времени  $T \gg t$ , для которого выполняются положения «динамической модели микроструктуры дождя» о распределениях во временных рядах доплеровских спектральных параметров, нанесенная на диаграмму  $Z - R$  позволит рассчитать  $A$  и  $b$  по классической схеме, при необходимости. Таким образом, контроль применимости «динамической модели микроструктуры дождя» на времени  $T$  позволит более обосновано переходить к расчету классических параметров  $A$  и  $b$ . Сам параметр  $T$ , от которого «динамическая модель» применима, является интересной характеристикой изучаемого процесса.

Предлагаемый подход к измерениям, позволяет более полно и точно изучать осадки в различных пространственно-временных масштабах, получать более точные оценки скорости вертикальных воздушных потоков и концентрации рассеивателей. В теоретическом плане, его использование позволило дать микрофизическую интерпретацию ряду экспериментальных данных и теоретических результатов [6, 7], которые долгое время считались спорными или её не содержали (например диаграмме Фудживары, изображенной на рис. 1). Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что область применения описываемого подхода не ограничивается релейевским рассеянием на каплях дождя, а распространяется на любые длины волн зондирования вплоть до оптического диапазона [7]. Полностью, предлагаемый подход и основные результаты, полученные с его использованием, описаны в [3-8]

## Литература

1. Fujiwara, M., 1965: Raindrop-size distribution from individual storms. *J. Atmos. Sci.*, 22, 585-591.
2. Fujiwara, M., and T. Yanase, 1968: Raindrop Z-R relationships in different altitudes. *Preprints 13th Rad. Meteor. Conf.*, Amer. Meteor. Soc, Boston, 380-383.
3. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., О взаимосвязи радиолокационной отражаемости и интенсивности дождя. *Успехи современной радиоэлектроники*, 11, 2006.
4. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Влияние микроструктуры дождя на достоверность и точность определения скорости вертикальных воздушных потоков. *Успехи современной радиоэлектроники*, 11, 2006.
5. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Определение параметров мелкомасштабной и крупномасштабной турбулентности в режиме вертикального радиолокационного зондирования. *Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника"*, вып. 132, 2006.
6. Коломиец С. Ф. Интерпретация результатов радиолокационных измерений в дождях с использованием обобщенного мультипликативного коэффициента Z-R соотношения. *Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника"*, вып. 137, 2006.
7. Коломиец С. Ф., Интерпретация Z-R соотношения в дождях на конечных периодах времени измерения с учетом условий рассеяния Ми. *Успехи современной радиоэлектроники*, 12, 2007.



8. С.Ф. Коломиец. Применение доплеровских методов при вертикальном радиолокационном зондировании осадков в широком диапазоне длин волн и пространственно-временных масштабов. МФТИ, 2009. Диссертация канд. наук.
9. Горелик А.Г., Логунов В.Ф., Определение скорости вертикальных потоков и микроструктуры дождя по доплеровскому спектру и интенсивности радиоэха. // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, Т.10, Вып. 7, 1974.
10. Testud, J., S. Oury, R. A. Black, P. Amayenc, and X. Dou, 2001: The concept of “normalized” distributions to describe raindrop spectra: A tool for cloud physics and cloud remote sensing. *J. Appl. Meteor.*, 40, 1118–1140
11. V. Chandrasecar, V. N. Bringi, Dual Polarization Radars Estimates of Rainfall: Recent Advances. Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar. 2004.