

УДК 546.212:538.569.3

Ю.И. Малышенко, А.Н. Роечко

Институт радиопизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

## ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЖДЕВЫХ КАПЕЛЬ ПО РАЗМЕРАМ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНОВ РАДИОВОЛН

*В работе проанализированы наиболее часто используемые в микроволновом диапазоне радиоволн функции распределения дождевых капель по размерам и предложена новая функция распределения, пригодная для использования в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом (примыкающем к ИК диапазону и ныне именуемом терагерцевым) диапазонах волн и учитывающая наличие мелких дождевых капель.*

**Ключевые слова:** радиометеорология и дистанционное зондирование Земли, радиолокация и радиосвязь, функция распределения дождевых капель по размерам, терагерцевый диапазон электромагнитных волн.

### Введение

Функция распределения дождевых капель по размерам  $N(D)$  является важной характеристикой в метеорологии дождевых и облачных гидрометеорообразований, позволяющая глубже понять физику их образования и динамику развития. Через нее выражается интенсивность дождя

$$R = \pi/6 \cdot \sum D^3 N(D) \Delta D$$

и водность единицы объема дождя или облака

$$N = \pi/6 \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot \sum D^3 N(D) \Delta D.$$

Эта, казалось бы, чисто метеорологическая характеристика давно и прочно вошла в сферу интересов специалистов по сантиметровой (СМ) и миллиметровой (ММ) радиолокации и радиосвязи, которым приходится учитывать ослабляющее и рассеивающее воздействие дождевых капель на работу таких систем. Это воздействие характеризуется [1] коэффициентами погонного ослабления

$$\gamma_{\text{осл}}(\lambda) = 10^4 \lg e \sum N(D_i) C_{\text{осл}}(\lambda, D_i) \Delta D_i \text{ [дб/км]}$$

и удельной радиолокационной отражаемости

$$\eta(\lambda) = \sum N(D_i) \sigma_{\text{РЛС}}(\lambda, D_i) \Delta D_i \text{ [м}^{-1}\text{]},$$

в которые  $N(D_i) \Delta D_i$  входит как равноправный сомножитель наряду с сечениями ослабления  $C_{\text{осл}}(\lambda, D_i)$  и рассеяния  $\sigma_{\text{РЛС}}(\lambda, D_i)$  дождевых капель с диаметрами  $D_i$  на длине волны  $\lambda$ . Известно, что в достаточно интенсивных дождях может наступить момент, когда мешающее отражение от дождя (оно определяется произведением  $\eta(\lambda)$  на величину освещенного радиоимпульсом объема) превысит ЭПР цели и последняя может быть потеряна. Зная длительность времени года, в течение которого в данном географическом районе наблюдаются дожди с упомянутой маскирующей величиной интенсивности и  $N(D)$  (а такие данные накапливаются в метеорологии), можно вычислить вероятность бесперебойного сопровождения цели радиолокатором с конкретными радиотехническими характеристиками. Эта же  $N(D)$  входит и в выражение для вычисления угловых характеристик рассеяния радиоволн, которые описыва-

ются индикатрисами рассеяния или бистатистическими коэффициентами рассеяния. Ими приходится пользоваться при использовании двухпозиционных РЛС, а также при учете перекрестных помех от рассеянного дождевыми каплями излучения как на приземных трассах связи, так и на межспутниковых.

Упомянутое выше мешающее действие дождя на работу одних систем оказывается полезным для других. Так, в радиометеорологии это взаимодействие используется для изучения методами дистанционного зондирования характеристик облаков и дождей, в том числе и функций распределения входящих в них капель по размерам  $N(D)$  и по форме. Эти примеры показывают, что специалистам по радиолокации и радиосвязи для решения своих задач в условиях земной атмосферы приходится изучать и отбирать наиболее подходящие  $N(D)$  - в этом актуальность этого вопроса.

### Основной материал

**Анализ функций распределения наиболее часто используемых в микроволновом диапазоне.** Сама по себе функция распределения дождевых капель по размерам  $N(D)$  определяется эмпирически в каждом конкретном географическом районе при конкретных значениях интенсивности дождя  $R$  путем непосредственного подсчета числа капель размером  $D_i$  в интервале  $D_i \pm \Delta D_i/2$  в единице объема дождя. Ранее (в 40 – 50-х годах прошлого века) для этого использовалась трудоемкая и, как оказалось, неточная методика. В потоке дождевых капель кратковременно экспонировали кассеты ( $\approx 50 \times 50$  см) с фильтровальной бумагой, обработанной водорастворимым красителем, и затем подсчитывали число разноразмерных отпечатков капель на бумаге. При этом применяли ворсистую бумагу, пытаясь уменьшить разбрызгивание капель при ударе, но это лишь незначительно снижало маскирование отпечатков мелких капель брызгами от более крупных. Но потеря информации о мелких дождевых каплях в этой методике не очень беспокоила радиозондировщиков, т.к. радиолокация и радиосвязь в то время работали в длинноволновой части микроволнового диапазона, где столь мелкие капли с  $D_i < 0,5$  мм никак не сказывались на характеристиках взаимодействия с излучением. Позже появились автоматизированные приборы для регистрации  $N(D)$  (диздрометры) – сначала неточные микрофонного типа, а затем со строчно-кадровым растром светодиодных оптопар. Но и они предназначались для использования совместно с системами микроволнового диапазона, в связи с чем серьезно не ставилась задача регистрации особо мелких дождевых капель. Но именно такая задача возникает при использовании радиотехнических систем в коротковолновой части ММ диапазона и в ныне активно осваиваемом терагерцовом.

Измеренные одним из указанных выше способов  $N(D)$  принято представлять в виде диаграмм повторяемости числа капель в каждом конкретном интервале

их размеров. При этом ось абсцисс диаграммы разбивают на ряд интервалов, начиная от  $D_{\min}$  до  $D_{\max}$ , с определенным шагом  $\Delta D$ . В точке  $D_i \pm \Delta D_i/2$  на оси ординат принято откладывать не абсолютные значения числа частиц, попавших в этот интервал  $N_i/\Delta D$ , а значения отнесенные к полному числу капель в единице объема дождя  $F(D) = (N_i/\Delta D)/N_{\text{полное}}$ . Эта величина – вероятностная дифференциальная плотность распределения дождевых капель или  $N(D)$ . Поскольку спектр размеров капель непрерывный,  $N_{\text{полное}}$  принято вычислять путем интегрирования  $N_{\text{полное}} = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D)\Delta D$ . Попутно отметим, что  $f(r) = 2f(D)$ , где  $r$  – радиус капли.

Наряду с указанной дифференциальной  $N(D)$  применяют и интегральную. Так, через нее можно отдельно выразить парциальную водность только мелких капель, если в качестве  $D$  взять верхнее граничное значение диаметра капель

$$F(D) = \pi/6 \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot \int_{D_{\min}}^{D_{\text{мелк}}} D^3 N(D) dD.$$

Если в качестве верхнего предела взять максимальный диаметр в спектре дождевых капель, то получим полную водность в единице объема дождя

$$F(D) = \pi/6 \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) dD.$$

С ее помощью удобно вводится определение медианного диаметра  $D_0$ :

$$\int_{D_{\min}}^{D_0} D^3 N(D) dD = \int_{D_0}^{D_{\max}} D^3 N(D) dD,$$

т.е.  $F(D_0) = 1/2$ . Отметим, что  $F(D) = F(r)$  [2].

Этот пример демонстрирует значение интегральных распределений, поскольку они непосредственно связаны с метеорологическими характеристиками дождей. Учет этого обстоятельства помог физику-метеорологу Бесту [3] получить аналитическое выражение для одной из самых удачных в то время функций распределения  $N(D)$ , исходя из следующей гипотезы:

$$1 - F(D) = \exp(-D/a)^m, \quad (1)$$

где  $a$  – параметр, зависящий от  $R$ , который наряду с другими константами автор определил эмпирически, путем использования опубликованных на то время шести статей с результатами измерений количества дождевых капель в Германии, Англии и США (см. [2] стр.260). Свою гипотезу Бест обосновывал уже установленными к тому времени фундаментальными закономерностями в метеорологии. В частности, переносимая в каждой единице объема дождя водность набирается каплями не с произвольными диаметрами,

а подчиняющимся степенному спектру размеров, поскольку капли именно с такими диаметрами выживают в результате объективных физических процессов дробления и слияния при достаточно длительном совместном падении капель в атмосфере. Кратко воспроизведем некоторые выкладки Беста, ибо это полезно для понимания свойств  $N(D)$ . Дифференцируя выражение (1) по диаметру, получаем дифференциальную плотность распределения водности [3]

$$w(D) = ma^{-m} D^{m-1} e^{-(D/a)^m} \quad (2)$$

Оно отражает ту часть водности, которая приходится на интервал диаметров капель  $D \pm \Delta D/2$ . Соответственно:

$$W(D) = W_{\text{полн}} \cdot w(D) = W_{\text{полн}} \cdot ma^{-m} D^{m-1} e^{-(D/a)^m}$$

Водность, как уже отмечалось, непосредственно связана с  $N(D)$ :

$$W(D) = \pi/6 \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot D^3 \cdot N(D) \quad [г/м^3] \quad (3)$$

Откуда

$$N(D) = 6/\pi \cdot W_{\text{полн}} \cdot ma^{-m} D^{m-4} \cdot \exp(-(D/a)^m) \quad (4)$$

Далее Бест воспользовался имевшимися в метеорологии эмпирическими зависимостями  $a = \alpha R^\beta$  [см] и  $W_{\text{полн}} = CR^\gamma$ , где  $R$  выражено в мм/час. Подстановка их в ур.(4) дает

$$N(D) = 6C/\pi \cdot m D^{m-4} \cdot \alpha^{-m} R^{\gamma-m\beta} \times \exp(-\alpha^m R^{-m\beta} D^m) \quad [см^{-4}] \quad (4a)$$

Напомним, что все вошедшие в (4a) константы Бест определил эмпирически.

Если перейти от использованной им размерности  $N(D)$  в  $см^{-4}$  к ныне общепринятой размерности  $N(D)\Delta D$  в  $м^{-3}мм^{-1}$ , то получим следующие значения констант в формуле (4a):  $m = 2,25$ ,  $\beta = 0,232$ ,  $\gamma = 0,846$ ,  $c = 67$  и  $\alpha = 1,3$ . При этом диаметры капель в (4a) необходимо выражать в мм, а водность и плотность воды в  $г/м^3$  и  $г/см^3$ , соответственно. Естественно, при этом в записях констант учтены очевидные соотношения:

$$N(D) [м^{-3}] = 10^6 N(D) [см^{-3}], \quad D [мм] = 10^3 D [м],$$

$$\rho_{\text{воды}} [г/см^3] = 10^6 \rho_{\text{воды}} [г/м^3]$$

$$\text{и } W [г/см^3] = 10^{-6} W [г/м^3].$$

После подстановки указанных констант в (4a) функция распределения Беста приобретает вид:

$$N(D) = 159,5461 \cdot R^{0,324} D^{-1,75} \times \exp(-0,55415 \cdot R^{-0,522} D^{2,25}) \quad [м^{-3}мм^{-1}] \quad (5)$$

Аналитическое выражение Беста с точки зрения математики относится к наиболее общему виду функций распределения – распределению Вейбулла [4]:

$$N(D) = N_0 \cdot c/b \cdot (D/b)^{c-1} \cdot e^{-(D/b)^c}$$

Распределение Беста сыграло важную роль в то время и не утратило актуальности сейчас и, конечно, войдет в перечень анализируемых ниже распределений. В этот перечень обязательно необходимо

включить исторически сформировавшиеся первыми и ставшие классическими распределения дождевых капель по размерам Маршалла-Пальмера (далее М-Р) [5] и Лауса-Парсонса (далее L-P) [7]. В наиболее удобных на сегодняшний день редакциях Олсена [6] и де-Вольфа [8] они имеют вид:

$$N(D)_{M-P} = 7300 \cdot R^{0,056} \times \exp(-4,3DR^{-0,21}) \quad [м^{-3}мм^{-1}] \quad (6)$$

и

$$N(D)_{L-P} = 19800 \cdot R^{-0,384} \cdot D^{2,93} \times \exp(-5,38DR^{-0,186}) \quad [м^{-3}мм^{-1}] \quad (7)$$

Упомянутые три типа распределений, а также еще три из числа наиболее популярных в настоящее время в радиометеорологии, приведены на рис. 1.

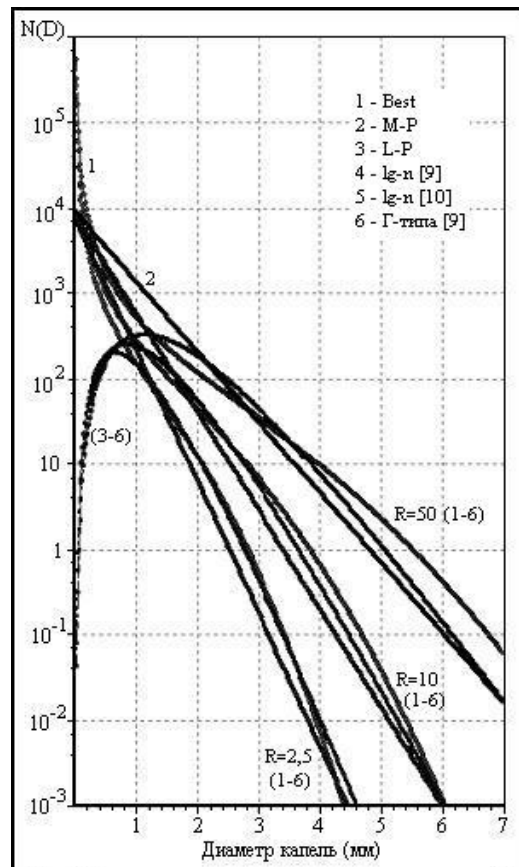


Рис. 1. Типовые распределения при разных значениях R

В состав последних трех включены: две разновидности логнормальных распределений [9]

$$N(D) = N_{\text{полное}} / (\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D) \times \exp(-1/2 \cdot (\ln(D/D_0)/\sigma)^2) \quad [м^{-3}мм^{-1}], \quad (8)$$

где  $N_{\text{полное}} = 194 \cdot R^{0,3}$ ,  $D_0 = 0,63 \cdot R^{0,23}$

и  $\sigma^2 = 0,191 - 0,011 \cdot \ln R$ ;

и [10]  $N(D) = N_{\text{полное}} / (\sqrt{2\pi} \cdot \ln \sigma \cdot D) \times \exp(-1/2 \cdot (\ln(D/D_0)/\ln \sigma)^2) \quad [м^{-3}мм^{-1}], \quad (8, a)$

где  $N_{\text{полное}} = 172 \cdot R^{0,22}$ ,  $D_0 = 0,72 \cdot R^{0,23}$ ,  $\ln \sigma = 0,357674$ ; и одно Г-типа [9]

$$N(D) = 8800 \cdot R^{-0,13} \cdot D^\alpha \cdot \exp(-\Lambda D) [\text{м}^{-3} \text{мм}^{-1}], \quad (9)$$

где  $\alpha = 1,72 \cdot R^{0,19}$  и  $\Lambda = 4,05 \cdot R^{-0,11}$ .

Из рисунка видно, что, несмотря на то, что распределения получены разными авторами в различных географических зонах, в них много общего, т.е. они (распределения) отражают общие метеорологические закономерности. В частности видно, что линии для одной и той же интенсивности группируются в четко выделенные компактные полосы, что особенно заметно на обоих краях спектров. Тем не менее, в них имеется сравнительно небольшой участок (область очень мелких капель), где наблюдаются глубокие расхождения между группой распределений (3) – (6) (рис 1.) с максимумами в области средних капель и распределениями Беста и М-Р (1), (2). В последних число мелких капель увеличивается с уменьшением их диаметров.

**Об учете мелких дождевых капель в функции распределения для терагерцового диапазона.** Большинство вышеприведенных аналитических выражений для  $N(D)$  (5) – (9) отвечают намерениям их авторов правильно отразить эмпирические данные о количестве основных дождевых капель с диаметрами более 0,5 мм, т.е. дающих основной вклад в водность дождя. Этого достаточно, если иметь в виду обслуживание радиотехнических средств микроволнового диапазона, не чувствительных к воздействию столь мелких дождевых капель. Но этого явно недостаточно для прогнозирования характеристик работы в дождях систем терагерцового диапазона. В настоящее время это актуально в связи с более интенсивным их развитием благодаря достигнутому прогрессу в технике этих частот (см., например, [11]). Важно отметить, что длина волны излучения в этом диапазоне становится соизмеримой с диаметрами мелких дождевых капель, т.е. именно в них имеют место известные резонансы Ми, в связи с чем эти капли уже вносят существенный вклад в коэффициенты ослабления и рассеяния. Поэтому правильный учет мелкокапельной фракции здесь приобретает принципиально важное значение.

О том, что эти капли реально присутствуют в дождях, отмечали многие исследователи. Один из признанных авторитетов в области изучения взаимодействия ЭМ излучения оптического и радиодиапазонов с облачными и дождевыми каплями Дейрменджан в работе [12] приводит качественный график, предназначенный для иллюстрации непрерывности перехода от спектра размера размеров облачных капель к дождевому. На нем автор условной чертой в области диаметров капель в 50 микрон (0,05 мм) относит более крупные капли к дождевым, ибо в условиях земной атмосферы они приобретают устойчивую и уже достаточно заметную скорость осаждения  $\approx 0,1$  м/с. И количество этих капель, по его мнению, очень велико. Более того, из этого графика следует, что максимум количества дождевых капель расположен именно в мелкокапельной области (вблизи диаметров капель 0,1 – 0,2 мм в зависимости от интенсивности). Все это лиш-

ний раз подчеркивает острую необходимость в достаточно точных методиках измерения количества капель в этом интервале их диаметров.

Единственным на сегодня приемлемым методом регистрации очень мелких дождевых капель признан метод улавливания в стеклянные кюветы с касторовым маслом, фотографирования и последующим подсчетом количества капель под микроскопом. С помощью этого метода можно надежно фиксировать все размеры мелких дождевых капель. Насколько нам известно, этот метод впервые был использован Е.А.Поляковой [13 – 15] еще в 1953 году. Впоследствии он получил развитие в Японии в работах Угаи и Като [16] и др. в 1977 году, в Китае [17]. При этом японцы уделили специальное внимание совершенствованию метода: подобрали краситель для масла, повышающий контрастность изображений капель на слайдах, а также такую степень вязкости масла, при которой исключалось разбрызгивание капель с диаметрами 0,05 – 3,5 мм при их падении с высоты 14 м, что достаточно для достижения установившейся скорости падения.

В работе Угаи-Като [16] представлены результаты измерений около ста спектров размеров при интенсивностях дождей от слабых до ливневых  $\leq 50$  мм/час, в которых особую ценность представляют данные для мелкокапельной области 0,05 – 0,5 мм. Была подтверждена оценка Дейрменджана о большом числе таких капель (десятки и сотни тысяч в кубическом метре дождя в пересчете к стандартному интервалу диаметров капель  $\Delta D = 1$  мм). Е.А. Полякова обследовала порядка 40 спектров диаметров дождевых капель в основном в Ленинградской области и частично вблизи Батуми. Мы воспользовались ее первичными данными измерений, которые были пересчитаны от данных на плоскости расположения кювет  $n_1(D)$  в объемное содержание  $N(D)$  в  $1 \text{ м}^3$ . Для этого были учтены скорости падения капель для каждого диаметра, площадь поверхности кювет (сразу экспонировалось по несколько штук) и время экспонирования (обычно 60-180 сек):

$$N(D) = n_1 / (V(D) \cdot S \cdot t), \quad (10)$$

где  $S$  – суммарная площадь кювет,  $S = 17,4 \cdot q$ , (площадь одной кюветы  $17,4 \text{ см}^2$ ,  $q$  – число кювет). Е.А. Полякова в своих пересчетах применяла формулу Беста для установившейся скорости падения очень мелких капель вида  $V(D) = 4000 \cdot D$  [см/сек]. Мы же отдали предпочтение более современной формуле Аплинджера [18]

$$V(D) = 4,874 \cdot \exp(-0,195D) \text{ [м/сек]}.$$

Японские авторы пользовались формулой Ганна-Кинзера [19] от 1949 года.

В числитель формулы (10) вводится коэффициент пересчета от применяемого в измерениях минимального интервала усреднения количества капель  $\Delta D = 5 \cdot 10^{-2}$  мм к стандартному интервалу  $\Delta D = 1$  мм, т.е. коэффициент  $1/0,05 = 20$ . В итоге формула пересчета приобретает вид:

$$N = 2358,3 \cdot e^{0,195D} \cdot (n_1/q \cdot t) .$$

Из всех исследованных Поляковой дождей выбрана три группы вблизи интенсивностей R равных 2,5; 10 и 50 мм/час. Данные ее измерений имеют большой разброс, поэтому проведено их графическое сглаживание, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные Е.А. Поляковой

D (мм)	R (мм/ч)		
	2,5	10	50
0,025	155	1600	5000
0,075	225	2500	29000
0,125	360	4000	27000
0,175	540	5400	18500
0,225	660	4000	12500
0,275	590	3100	8600
0,325	530	2300	5800
0,375	475	1800	4100
0,425	400	1400	2800
0,475	330	900	1800

В верхней строке приведены значения интенсивности дождя R в мм/час; в первом столбце – средние диаметры  $\bar{D}$  в мм с интервалом измерений  $\Delta D = \bar{D} \pm 0,025$ . Результаты измерений Угаи-Като приведены на рис. 2 [16].

Видно, что мелкокапельная область распределений представлена на рисунке четко и без существенного разброса, чего не скажешь о среднекапельном участке спектров для диаметров  $D = 1 \div 3$  мм. Здесь разброс данных настолько большой, что получение представленных на рис. 2 сглаженных зависимостей N(D) для трех значений интенсивности дождя вызывало определенные трудности. При этом к градации R = 2,5 отнесены результаты двух нижних строк таблицы-врезки на рис. 2 (R = 0,3 ÷ 1,1 и R = 3,6 ÷ 5,6); сглаживающая линия для градации R = 10 проведена вблизи верхней части скопления экспериментальных точек для R = 5,6 ÷ 7,1; сглаживающая линия для градации R = 50 проведена через скопления точек измерений для R = 46,4 мм/час. Сглаженные таким образом данные измерений Угаи-Като приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные Угаи-Като

D (мм)	R (мм/ч)		
	2,5	10	50
0,05	16000	130000	600000
0,1	13000	63000	250000
0,2	350	20000	60000
0,3	1300	8500	15000
0,4	560	4000	7200
0,5	380	1800	3200
0,6	260	850	1600
0,7	170	550	1000
0,8	110	460	700
0,9	84	330	600
1,0	70	280	520
1,5	27	100	200
2,0	13	45	85
2,5	7,5	76	55
3,0	5	17	32

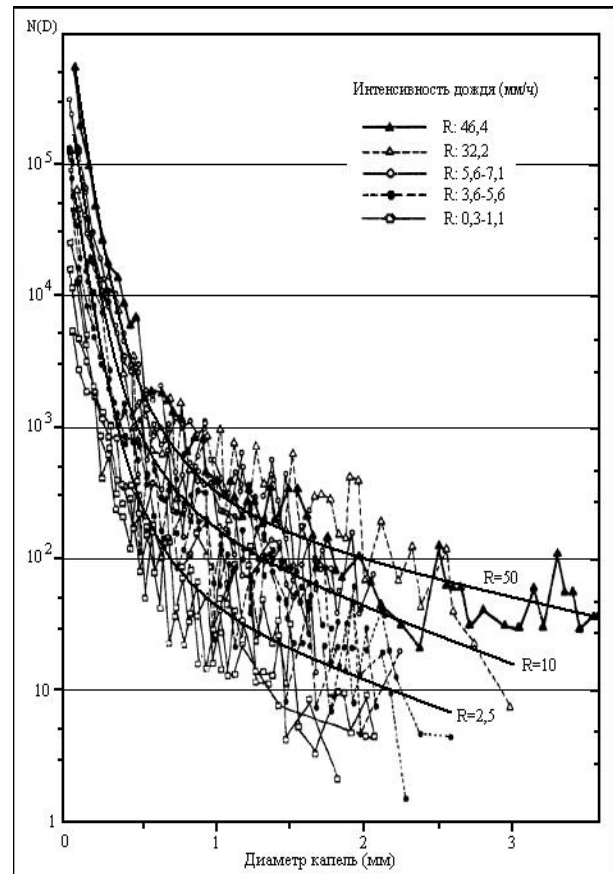


Рис. 2. Результаты измерений Угаи-Като [16]

Для дальнейшего использования табличные данные Поляковой и Угаи-Като подвергнуты арифметическому усреднению и графическому сглаживанию – см. табл. 3.

Таблица 3

Усредненные экспериментальные данные

D (мм)	R (мм/ч)		
	2,5	10	50
0,05	81000	66000	310000
0,1	6600	33000	150000
0,2	2000	12500	37500
0,3	930	5600	16000
0,4	530	2800	5800
0,5	340	1350	3200
0,6	250	850	2100
0,7	180	550	1350
0,8	125	407	1000
0,9	93	330	800
1,0	70	260	650
1,5	27,5	100	250
2,0	18	45	100
2,5	7,5	26	52
3,0	5	17	30

Если требуются функция распределения для больших интенсивностей (R = 100 и R = 150 мм/ч.), не охваченных в измерениях Поляковой и Угаи-Като, то их можно определить путем экстраполяции данных табл. 3.

**Получение функции распределения для температурного диапазона с учетом мелких дождевых капель.** Если взглянуть на рис. 1, на котором нанесены ранее популярные и ныне принятые в

микроволновом диапазоне функции распределения, то видно, что ни одно из них правильно не отражает истинный (эмпирический) ход в области мелких дождевых капель. Так, распределение М-Р ограничено более низкими значениями  $N(D)$  – около 8000; все распределения Г-типа и логнормальные даже в области своих максимумов ограничены значениями  $N(D)$  около 200, в то время как из табл. 2 следует, что максимальное значение  $N(D)$  должно быть на несколько порядков больше (до  $10^5$ ). Да и положения максимумов в этой группе распределений смещено в область средних капель вместо интервалов значений диаметров 0,1 – 0,2 мм. Т.е. ни одно из распределений этой группы прямо и непосредственно не может быть применено в терагерцовом диапазоне волн. Не говоря уже о том, что некоторые из представленных на рис. 1 распределений неточны и в области крупных капель. Особенно это заметно для наиболее популярного ранее распределения М-Р, в связи с чем в настоящее время его можно отнести к категории устаревших.

Из представленных на рис. 1 функций распределения к истинным значениям количества мелких капель приближается лишь распределение Беста: оно дает значение  $1,5 \cdot 10^5$  что близко к максимальным цифрам из табл. 2 –  $6 \cdot 10^5$ . Отрадно, что это распределение и в области крупных капель практически не уступает современным распределениям – логнормальному и Г-типа. Т.е. это уникальное, не стареющее распределение, хотя и оно не лишено недостатков. Во-первых, оно дает неопределенность при  $D \rightarrow 0$ , но в применении к спектру дождевых капель этот недостаток не создает проблем, т.к. их размеры, как уже отмечалось, ограничены снизу значением в 50 микрон. Во-вторых, лежащее в основе распределения математическое выражение не может воспроизвести максимум в области диаметров капель 100 – 200 микрон, что было бы весьма желательно с точки зрения приближения к реальной ситуации. В-третьих, в области средних капель в графическом ходе кривых этого распределения для всех интенсивностей наблюдается не подкрепленный экспериментальными данными характерный прогиб, который заметно (в 1,5 – 2 раза) занижает их вклад по сравнению с другими распределениями. В то же время, при приближении к мелкокапельной области этот прогиб сменяется необоснованно резким подъемом кривых. Конечно, эти недостатки распределения Беста являются следствием отсутствия надежных эмпирических данных в то время. Однако, несмотря на это, удовлетворительная работа этого распределения в области мелких капель делает его вполне приемлемым первым приближением при оценке степени влияния дождей на работу радиотехнических систем терагерцового диапазона.

Перейдем к получению более точного распределения. В качестве такового предлагается составное распределение, состоящее из двух фрагментов:

для мелкокапельной области используется аналитическая аппроксимация данных табл. 3, а для средне- и крупнокапельной области обеспечивается плавный переход к одному из ныне широко используемых аналитических выражений логнормального типа – (8). Полученные кривые для трех значений интенсивности дождя представлены на рис. 3.

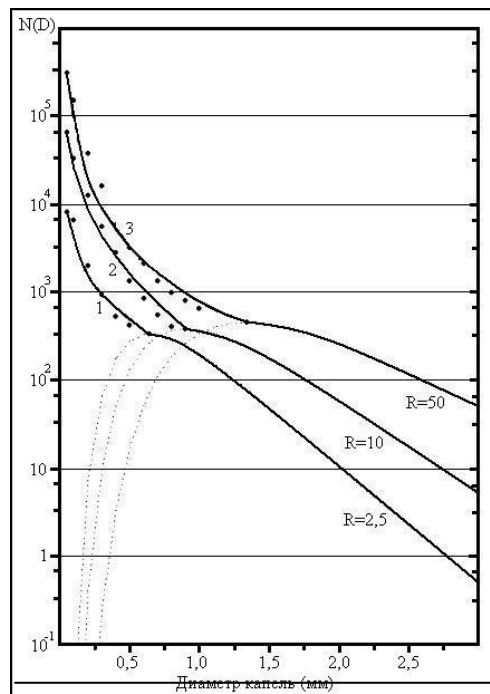


Рис. 3. Графики предложенных распределений

Как видно, каждая кривая состоит из двух частей, сопряженных в точках максимума распределений (8). Эти точки максимумов соответствуют значениям диаметров капель в 0,64, 0,9 и 1,34 мм для значений интенсивности  $R$  в 2,5, 10 и 50 мм/ч соответственно. Участки кривых, относящихся к области мелких капель (1, 2 и 3 на рис. 3), получены с помощью аналитического выражения  $ax^b \exp(-cx)$ . Значения коэффициентов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$

	R (мм/ч)		
	2,5	10	50
a	310	1553	805,6
b	-1,1	-1,28	-1,99
c	0,645	1,7	0,005

Таким образом, при использовании предлагаемого распределения следует:

- для мелкокапельной области использовать приведенное аналитическое выражение с учетом коэффициентов табл. 4 (до указанных значений диаметров капель);

- далее для больших диаметров капель продолжить расчет согласно выражению (8) для логнормального распределения [9].

## Заклучение

При прогнозуванні ступені впливу дощів на роботу радіотехнічних систем в земній атмосфері, крім всього іншого, необхідно розполагати характерною для даного району функцією розподілення дощових крапель по розмірам. Для систем мікрохвильового діапазону таких має достатньо багато, перевірених і добре працюючих. Однак, починаючи з 100 ГГц і вище, до оптичного діапазону, більшість відомих розподілень не в повній мірі відображають внесок малих дощових крапель, що принципово важливо в цій частині електромагнітного спектра. В даній роботі для терагерцового діапазону пропонується нове розподілення дощових крапель по розмірам, яке більш адекватно відображає внесок малих крапель, а для більш великих – зберігає точність розподілень  $N(D)$ , використовуваних в мікрохвильовому діапазоні.

## Список літератури

1. Степаненко В.Д. Радіолокація в метеорології / В.Д. Степаненко. – Л.: Гидрометиздат, 1973. – 343 с.
2. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитных волн атмосферными частицами / В.И. Розенберг. – Л.: Гидрометиздат, 1972. – 348 с.
3. Best A.C. The size distribution of raindrops / A.C. Best // *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*. – 1950. – Vol. 76, No 327. – P. 16-21.
4. Sekine M. Rain attenuation from Log-Normal and Weibull raindrop-size distribution / M. Sekine, Chen Chi-Dong // *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*. – 1987. – Vol. 35, No 3. – P. 358-359.
5. Marshall J.S. The distribution of raindrop with size / J.S. Marshall, W. McK. Palmer // *J. of Meteorology*. – 1948. – Vol. 5, No 1. – P.165-166.
6. Olsen R.L. The  $AR^b$  relation in the calculation of rain attenuation / R.L. Olsen, D.V. Rodgers // *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*. – 1978. – Vol. 26, No 2. – P.318-329.
7. Laws J.O. The relation of raindrop-size to intensity / J.O. Laws, D.A. Parsons // *Trans. American Geophysical Union*. – 1943. – Vol. 24, part II. – P. 452-460.

ion. – 1943. – Vol. 24, part II. – P. 452-460.

8. De Wolf D.A. On the Laws-Parsons distribution of raindrop sizes / D.A. de Wolf // *RadioSci*. – 2006. – Vol. 36, No 4. – P. 639-642.

9. Cerro C., Codina B. Modeling raindrop size distribution and Z(R) relation in the Western Mediterian Area / C. Cerro, B. Codina // *J. of Applied Meteorology*. – 1997. – Vol. 36. – P. 1470-1479.

10. Feingold G. The lognormal fit to raindrops spectra from frontal convective clouds in Israel / G. Feingold, Z. Levin // *J. of Climate and Applied Meteorology*. – 1986. – Vol. 25. – P. 1346-1368.

11. Proc. 2004 Joint 29<sup>th</sup> Int. Conf. on IR and Millimeter waves and 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Terahertz Electronics, Karlsruhe, Germany.

12. Deirmenjian D. Complete scattering parameters of polydispersed hydrometeors in the  $\lambda=0,1-10$  cm range / D. Deirmenjian // *J. of Research of NBS (RadioSci)*. – 1965. – Vol. 69D. – P. 172-176.

13. Полякова Е.А. Микроструктура и прозрачность дождей / Е.А. Полякова, К.С. Шифрин // *Труды ГГО*. – 1953. – Вып. 42 (104). – С. 84-96.

14. Полякова Е.А. Исследование микроструктуры дождей в связи с исследованием их прозрачности / Е.А. Полякова // *Труды ГГО*. – 1957. – Вып. 68. – С. 88-91.

15. Бартенева О.Д. Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы / О.Д. Бартенева, Е.Н. Довгялло, Е.А. Полякова // *Труды ГГО*. – 1967. – Вып. 220. – С. 98-101.

16. Ugai S. Fine structure of rainfall / S. Ugai, K. Kato // *Annales des Telecommunications*. – 1977. – Vol. 32, No 11-12. – P. 422-429.

17. Huang J.Y. Measurements of raindrop sizes and canting angles / J.Y. Huang, C. Wang // *Int. J. of IR and Millimeter waves*. – 1989. – Vol. 10, No 9ю – P. 1112-1130.

18. Uplinger C.W. A new formula for raindrop terminal velocity / C.W. Uplinger // *20-th Conf. On Radar Meteorology*. – Boston, 1981. – P. 389-391.

19. Gunn R. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air / R. Gunn, G.D. Kinser // *J. of Meteorology*. – 1949. – Vol. 6. – P. 221-227.

Поступила в редколлегию 21.11.2008

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, с.н.с. В.К. Иванов, Институт радиопізики і електроніки НАН України, Харків.

## ФУНКЦІЯ РОЗПОДІЛУ ДОЩОВИХ КРАПЕЛЬ ЗА РОЗМІРАМИ ДЛЯ МІЛІМЕТРОВОГО І ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНІВ РАДІОХВИЛЬ

Ю.І. Малишенко, А.М. Рєнко

У роботі проаналізовано функції розподілу дощових крапель за розмірами, які найчастіше використовуються для прогнозування якості дії мікрохвильових радіолокаційних та систем зв'язку у дощових умовах, та показано, що майже всі вони не досить вірно відображають внесок реально присутніх у дощах дрібних крапель. Запропонована нова більш адекватна функція розподілу, яку може бути використано у більш високочастотному діапазоні електромагнітних хвиль (понад 100 ГГц), який зараз має назву терагерцового.

**Ключові слова:** радіометеорологія і дистанційне зондування Землі, радіолокація і радіозв'язок, функція розподілу дощових крапель за розмірами, терагерцовий діапазон електромагнітних хвиль.

## FUNCTION OF DISTRIBUTING OF RAINDROPS ON SIZES FOR MILLIMETRIC AND TERAHERTZ OF RANGES OF RADIO WAVES

Yu.I. Malyshenko, A.N. Roenko

The probability density distributions of rain drop sizes, which are widely used in calculating of rain attenuation statistics for microwave radar and communication systems, are analyzed. It is shown that the majority of these distributions sufficiently poor describe the real quantity of the rain small droplets. The new more adequate function is proposed, which may be used in more higher frequency ranges (above 100 GHz), nowadays named as terahertz one.

**Keywords:** radio meteorology and remote sensing of Earth, radio-location and radio contact, function of distributing of raindrops on sizes, terahertz range of hertzian waves.