

УДК 551.508.85

**А. Б. Веселовская, О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов***Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: [veselovskaya3@mail.ru](mailto:veselovskaya3@mail.ru)**ДВУХЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВОДЯНЫХ КАПЕЛЬ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ**

Разработке радиолокационных методов измерения характеристик жидких осадков уделяется значительное внимание в связи с исследованиями физических процессов в атмосфере, а также при решении прикладных задач. При этом большое внимание уделяется двухчастотному зондированию, однако большинство опубликованных работ связано с анализом капель сферической формы, в то время как форма реальных капель существенно отличается от сферической, особенно для крупных частиц. Это существенно влияет на характеристики отраженных сигналов, в связи с чем значительный интерес представляет решение задачи о рассеянии поля на диэлектрических частицах эллипсоидальной формы. Работа посвящена анализу особенностей двухчастотного зондирования капель воды эллипсоидальной формы путем численного моделирования. Рассмотрение проведено в рамках модели Пруппахера с использованием метода дипольных моментов при расчете отражаемости капель воды. Показано, что дифференциальная отражаемость эллипсоидальных капель и капель сферической формы с одинаковым среднекубическим диаметром практически не отличаются. Проведено сравнение с опубликованными данными и показано, что результаты совпадают с графической точностью для частиц воды, среднекубический диаметр которых не превышает 3 мм. Сделан вывод о слабом влиянии формы капель на результаты двухчастотного зондирования. Ил. 8. Табл. 1. Библиогр.: 20 назв.

**Ключевые слова:** эллипсоидная капля, эффективная площадь рассеяния, дистанционное зондирование, среднекубический радиус.

Измерение параметров жидких осадков представляет значительный интерес при проведении исследований в области метеорологии и климатологии, а также для решения ряда прикладных задач, в том числе для предупреждения паводков и наводнений. При этом применение радиолокационных методов также представляет интерес, так как позволяет оперативно получать информацию с больших площадей.

Однако традиционно используемые методы одночастотного зондирования с использованием, так называемого  $Z-I$ -соотношения [1–4] не обеспечивают однозначного восстановления параметров осадков (интенсивность, влагосодержание и др.) по характеристикам отраженных сигналов, в связи с чем в настоящее время активно развиваются методы двухчастотного зондирования [5, 6], в частности, в рамках *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* [7], а также *Global Precipitation Measurement (GPM)* [8]. Главным преимуществом двухчастотных методов по сравнению с одночастотными [9, 10] является возможность измерения микроструктурных параметров жидких осадков, что позволяет исследовать практически все их характеристики.

Кроме этого, применение двухчастотного зондирования позволяет решить проблему неоднозначности при решении обратной задачи [11–13], используя, в частности, комбинированный метод измерения профиля микроструктурных параметров дождя с учетом ослабления сигналов.

В общем случае двухчастотное зондирование осадков основано на измерении дифференциального значения эквивалентной площади рассеяния (ЭПР) осадков в виде отношения их

удельных ЭПР на двух частотах  $\sigma_d = \frac{\sigma(\lambda_1)}{\sigma(\lambda_2)}$ , где

$$\sigma = \int_0^{\infty} dr \sigma_p(r, \lambda) N(r), \quad \sigma(r, \lambda) - \text{ЭПР отдельной}$$

частицы,  $N(r)$  – распределение частиц по размерам [5–7]. При этом для восстановления микроструктурных характеристик дождя традиционно используется предположение о сферической форме капель, что позволяет использовать строгое решение задачи о дифракции электромагнитных волн на диэлектрической сфере (теория Ми) [14] для расчета величины  $\sigma(r, \lambda) = \sigma_s(r, \lambda)$ .

Однако форма дождевых капель заметно отличается от сферической, причем тем больше, чем больше размер капель [3], поэтому возникает вопрос о применимости предположения об их сферичности. Целью настоящей работы является исследование влияния несферичности водяных капель на результаты двухчастотного зондирования жидких осадков.

*Форма капель в режиме установившегося падения.* При отсутствии ветрового воздействия и в режиме установившегося падения на каплю действуют силы тяжести, аэродинамического сопротивления и поверхностного натяжения, что нарушает сферичность их формы [3] (рис. 1, а). Решение соответствующей задачи с учетом воздействия указанных сил привело к формированию широко распространенной модели, известной как капля Пруппахера [15]. В этом режиме форма капли может быть аппроксимирована двухосным эллипсоидом (рис. 1, б).

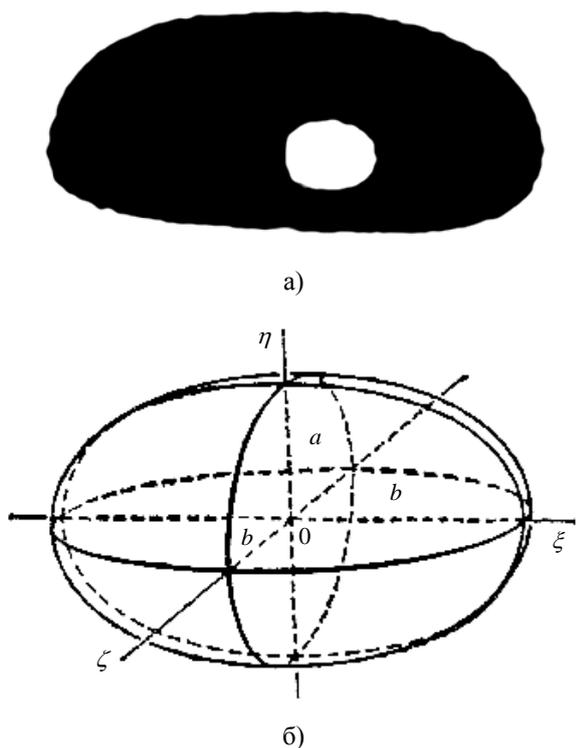


Рис. 1. Форма падающей капли (а) и система координат эллипсоидальной капли (б)

В вертикальной плоскости  $\eta 0 \zeta$  сечение эллипсоида имеет форму эллипса, горизонтальная ось которого равна  $2b$ , вертикальная ось вращения –  $2a$ , в горизонтальной плоскости  $\zeta 0 \zeta$  эллипсоид представляет собой окружность диаметром  $2b$ .

Для анализа рассеивающих свойств двухосного эллипсоида введем в рассмотрение эквивалентную сферу, объем которой  $V_{sf}$  равен объему соответствующего эллипсоида  $V_{el}$ , а ее радиус (среднекубический радиус) равен

$$r_3 = \sqrt[3]{ab^2}. \quad (1)$$

В рамках модели Пруппахера сформулированы следующие уравнения для отношения полуосей эллипса (эксцентриситет капли) [15]:

$$e = \frac{a}{b} = \begin{cases} \left[ 1 - \frac{9}{16} r_3 \rho_m \frac{V_\infty^2}{\gamma} \right]^{1/2} & \text{для } 0 \leq r_3 \leq 0,45 \text{ мм,} \\ 1,03 - 0,124 r_3 & \text{для } 0,45 < r_3 \leq 4,5 \text{ мм,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\rho_m = 1,1937 \cdot 10^{-6}$  – плотность насыщенных паров воды,  $\text{г} \cdot \text{мм}^{-3}$ ;  $V_\infty$  – установившаяся скорость падения капель,  $\text{м/с}$ ;  $\gamma = 72,75$  – поверхностное натяжение воды,  $\text{г} \cdot \text{с}^{-2}$ , при температуре  $t = 20^\circ \text{C}$ .

Зависимость установившейся скорости падения капли от ее среднекубического размера может быть аппроксимирована выражением [2]

$$V(r_3) = 9,65 - 10,3e^{-1,2r_3}. \quad (3)$$

На рис. 2 приведены результаты расчетов зависимости установившейся скорости падения капли от их среднекубического размера (3), которые показывают, что скорость монотонно возрастает и асимптотически стремится к значению  $9,8 \text{ м/с}$ .

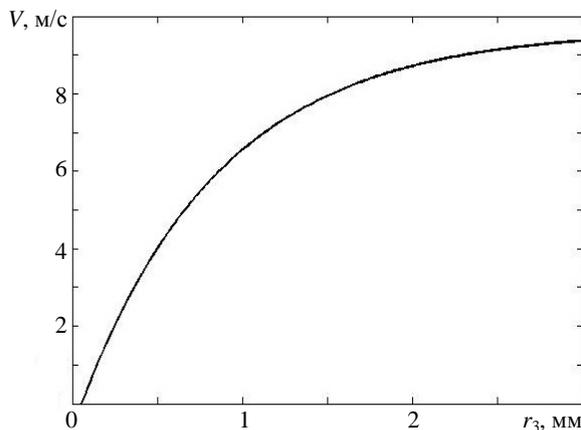


Рис. 2. Зависимость скорости падения капель от среднекубического радиуса эквивалентной сферы

Приведенные данные позволяют рассчитать зависимость эксцентриситета падающей капли (2) от среднекубического радиуса (рис. 3).

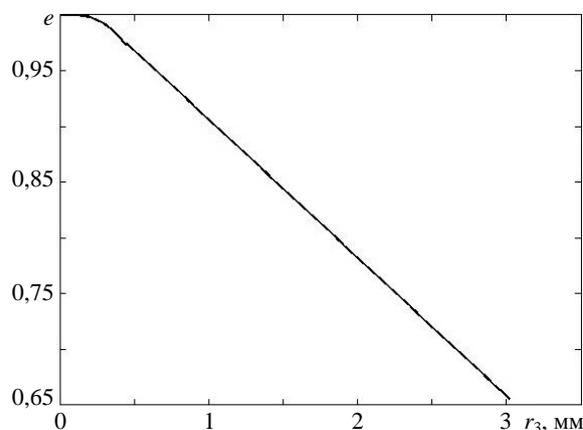


Рис. 3. Зависимость эксцентриситета падающей капли от среднекубического радиуса эквивалентной сферы

Как видно, на начальном участке  $r_3 < 450 \text{ мкм}$  зависимость имеет квадратичный вид

$$e = \left[ 1 - \frac{9}{16} r_3 \rho_m \frac{V_\infty^2}{\gamma} \right]^{1/2},$$

а при увеличении размеров капли  $r_3 \geq 450 \text{ мкм}$  – вид линейно падающей зависимости  $e = 1,03 - 0,124 r_3$ .

Используя выражения (1), (2), можно рассчитать размеры капель вдоль большой и малой осей эллипсоида в следующем виде:

$$a = \begin{cases} b \sqrt{1 - \frac{9r_3 \rho_m V_\infty^2}{16\gamma}} & \text{если } 0 \leq r_3 \leq 0,45 \text{ мм,} \\ b(1,03 - 0,124r_3) & \text{если } 0,45 < r_3 \leq 4,5 \text{ мм;} \end{cases} \quad (4)$$

$$b = \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{r_3^3}{1 - \frac{9r_3 \rho_m V_\infty^2}{16\gamma}}} & \text{если } 0 \leq r_3 \leq 0,45 \text{ мм,} \\ \sqrt[3]{\frac{r_3^3}{1,03 - 0,124r_3}} & \text{если } 0,45 < r_3 \leq 4,5 \text{ мм.} \end{cases} \quad (5)$$

Вид приведенных зависимостей от среднекубического радиуса показан на рис. 4.

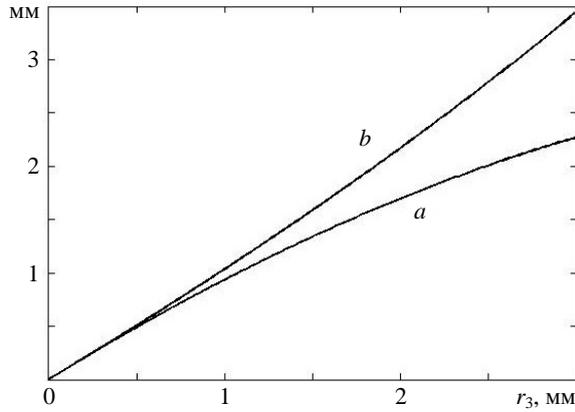


Рис. 4. Зависимость полуосей эллипсоидальной капли от среднекубического радиуса эквивалентной сферы

Как видно, при увеличении радиуса эквивалентной сферы горизонтальный размер капли  $2b$  увеличивается быстрее, чем вертикальный  $2a$ , что решающим образом сказывается на рассеивающих свойствах дождевых капель.

Чтобы вычислить энергию, рассеянную каплей в обратном направлении, необходимо найти компоненты отраженного поля в раскрыве антенны радара. В общем случае, решение задачи о дифракции электромагнитных волн на частицах несферической формы представляет значительные трудности, поэтому представляет интерес использование приближенных методов.

В частности, рассмотрим подход, основанный на вычислении дипольного момента [16], когда интенсивность рассеянного поля пропорциональна квадрату дипольного момента, который в свою очередь зависит от амплитуды падающего поля:

$$P_\xi = gE_\xi, \quad P_\eta = g'E_\eta, \quad P_\zeta = g'E_\zeta, \quad (6)$$

где коэффициенты  $g$  и  $g'$  равны

$$g = \frac{a^2 b}{3} \frac{\varepsilon' - 1}{1 + (\varepsilon' - 1)q}; \quad (7)$$

$$g' = \frac{a^2 b}{3} \frac{\varepsilon' - 1}{1 + (\varepsilon' - 1)q'}, \quad (8)$$

$\varepsilon'$  – вещественная часть диэлектрической проницаемости капли;  $q$  и  $q'$  – величины, которые зависят от формы эллипсоида и определяются выражениями

$$q = \frac{1}{e^2} \left( 1 - \sqrt{\frac{1 - e^2}{e^2}} \arcsin e \right), \quad (9)$$

$$q' = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}q.$$

В частном случае сферической капли коэффициенты  $g$  и  $g'$  равны

$$g = g' = g_s = a^3 \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon' + 2}. \quad (10)$$

Величина энергии, рассеянная эллипсоидальной частицей и нормированная на соответствующее значение для эквивалентной сферы, запишем в виде

$$I_x = \frac{i_x}{i_s} = \frac{\sigma_x}{\sigma_s} = \frac{[(g - g')\alpha_1(\alpha_2 \sin \alpha + \alpha_1 \cos \alpha) + g' \cos \alpha]^2}{g_s^2}; \quad (11)$$

$$I_y = \frac{i_y}{i_s} = \frac{\sigma_y}{\sigma_s} = \frac{[(g - g')\alpha_2(\alpha_2 \sin \alpha + \alpha_1 \cos \alpha) + g' \sin \alpha]^2}{g_s^2}, \quad (12)$$

где  $\sigma_{x,y}$  – ЭПР эллипсоидальной капли вдоль осей  $x$  и  $y$ ;  $\sigma_s$  – ЭПР сферической капли.

Для вертикальной поляризации падающего поля значения коэффициентов равны

$$\alpha = 90^\circ, \quad \alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = 1, \quad \alpha_3 = 0, \quad (13)$$

нормированная величина энергии, рассеянная эллипсоидальной частицей, запишем в виде

$$I_x = 0, \quad I_y = \frac{g^2}{g_s^2}, \quad (14)$$

а для горизонтальной поляризации

$$\alpha = 0^\circ, \quad \alpha_1 = 1, \quad \alpha_2 = 0, \quad \alpha_3 = 0; \quad (15)$$

$$I_x = \frac{g'^2}{g_s^2}, \quad I_y = 0. \quad (16)$$

При этом ЭПР эллипсоидальной капли вдоль малой и большой осей равна  $\sigma_{x,y} = I_{x,y} \sigma_s$ .

При вычислении ЭПР сферической капли в (11), (12) необходимо учитывать, что обычно

применяемое длинноволновое приближение (приближение Рэлея [1]) не выполняется уже в 3-см диапазоне радиоволн (дифракционный параметр  $\rho_d = \frac{2\pi r_3}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'} \geq 1$  для каплей диаметром  $2r_3 \sim 1$  мм). Поэтому для определения ЭПР сферической капли необходимо использовать результаты строгого решения задачи дифракции электромагнитного поля на диэлектрической сфере [14, 17, 18] (теория Ми).

В этом случае выражение для ЭПР отдельной частицы, нормированное на ее поперечное сечение  $\pi r^2$ , запишем в виде [18]

$$\sigma_s(r_3) = \frac{1}{\rho^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (a_n - b_n) \right|^2, \quad (17)$$

где  $\rho = \frac{2\pi}{\lambda} r_3$ ;  $a_n$  и  $b_n$  – коэффициенты разложения рассеянного поля, которые зависят от длины волны и коэффициента преломления материала частиц (коэффициенты Ми) [18].

В выражение (17) входит комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon''$ , зависимость которой от температуры и длины волны хорошо описывается обобщенными формулами Дебая [18, 19].

Как показано [18], реальная и мнимая части диэлектрической проницаемости сильно зависят от температуры и длины волны, причем уменьшение температуры практически всегда приводит к уменьшению вещественной части проницаемости и диэлектрических потерь. Поэтому при многочастотном зондировании дождя необходимо учитывать дисперсионные свойства диэлектрической проницаемости воды.

Рассмотрим рассеивающие свойства каплей воды эллипсоидальной формы, используя соотношения (1)–(17). Нами приведены зависимости нормированной ЭПР каплей от среднекубического радиуса в диапазонах радиоволн  $\lambda = 8,6$  мм (рис. 5, а),  $\lambda = 3,2$  см (рис. 5, б) и  $\lambda = 10$  мм (рис. 5, в) причем кривые 1 соответствуют горизонтальной поляризации падающего поля, а кривые 2 – вертикальной поляризации.

Для сравнения, кривые 3 соответствуют сферическим каплям, вид которых подтверждает физически очевидный факт: ЭПР эллипсоидальной капли на горизонтальной поляризации всегда больше ЭПР сферической капли, которая в свою очередь превышает ЭПР эллипсоидальной капли на вертикальной поляризации.

При этом обращает на себя внимание практически одинаковая расходимость кривых 1 и 2 для ортогональных поляризаций с увеличением среднекубического радиуса в разных диапазонах волн – (рис. 5).

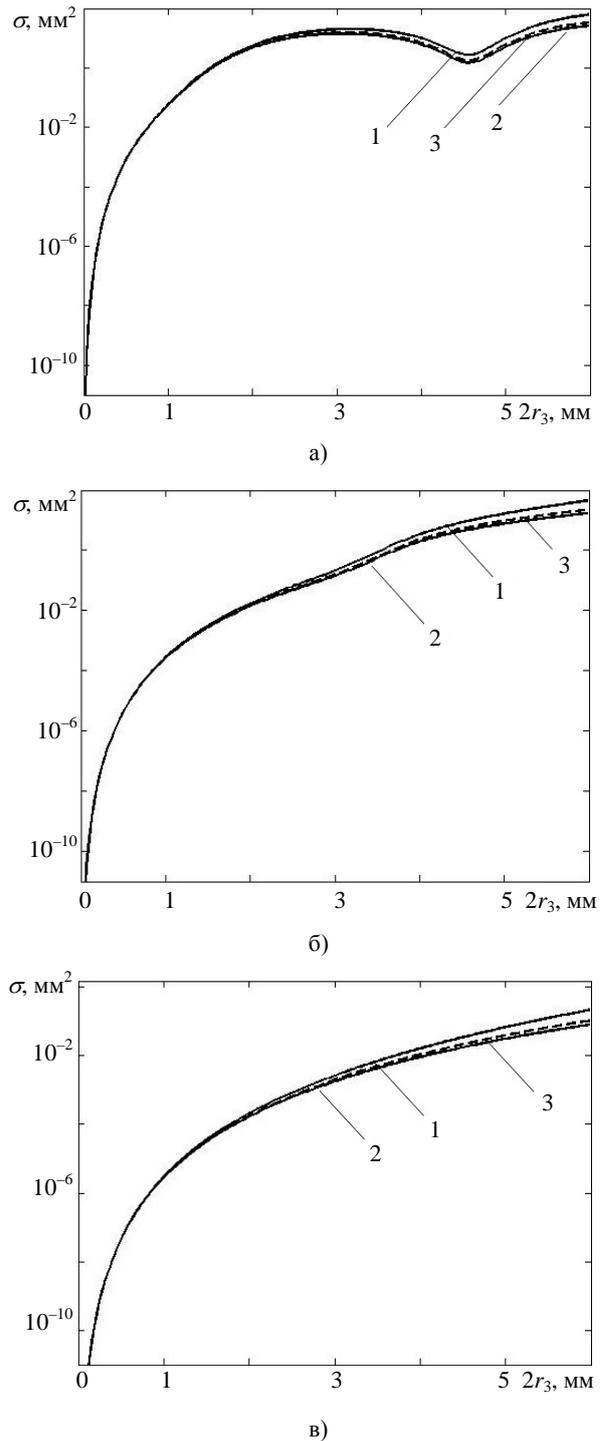
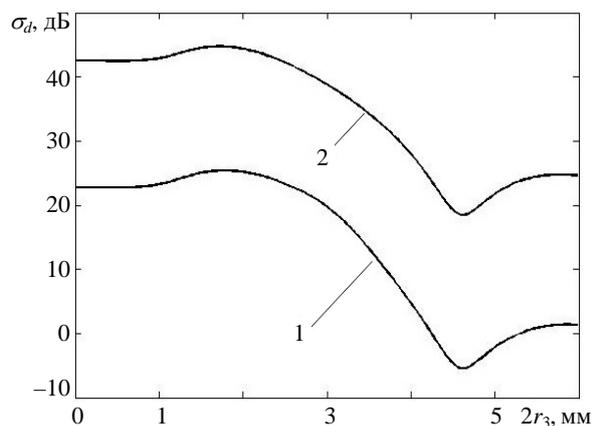


Рис. 5. ЭПР эллипсоидальной капли для горизонтальной поляризации (кривые 1), для вертикальной поляризации (кривые 2) и для сферической капли (кривые 3) в диапазонах: а) –  $\lambda = 8,6$  мм; б) –  $\lambda = 3,2$  см; в) –  $\lambda = 10$  см

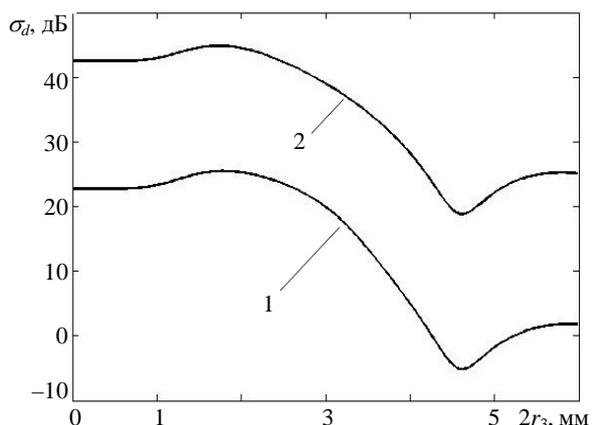
Это приводит к важному следствию: дифференциальные ЭПР эллипсоидальной и сферической каплей одинакового объема практически не отличаются в широком диапазоне изменения среднекубического радиуса и для различных комбинаций диапазонов волн (рис. 6, а – го-

ризонгальная полярзация, рис. 6, б – вертикальная полярзация, кривые 1 соответствуют  $\lambda_1 = 0,86$  см и  $\lambda_2 = 3,2$  см, кривые 2 –  $\lambda_1 = 0,86$  см и  $\lambda_2 = 10$  см).

Таким образом, в рамках проведенного рассмотрения результаты двухчастотного зондирования дождя практически не зависят от формы капель и предположение об их сферичности вполне оправдано.



а)



б)

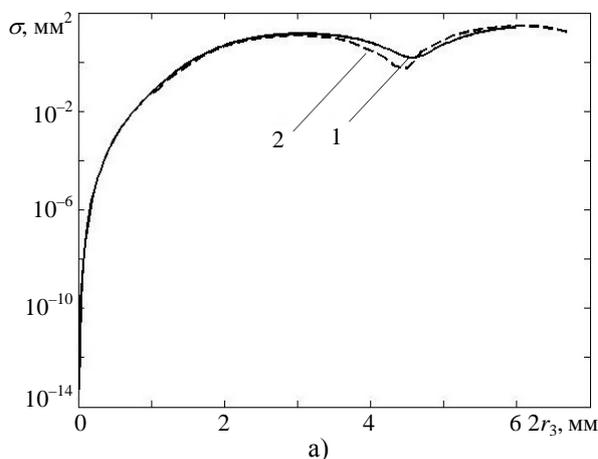
Рис. 6. Зависимость дифференциальной ЭПР эллиптической капли для горизонтальной полярзации (а) и вертикальной полярзации (б): 1 –  $\lambda_1 = 0,86$  см и  $\lambda_2 = 3,2$  см; 2 –  $\lambda_1 = 0,86$  см и  $\lambda_2 = 10$  см

В то же время, учитывая приближенный характер проведенных вычислений с использованием дипольных моментов, интересно выяснить, в какой мере полученные результаты отличаются от строгого решения задачи о дифракции электромагнитных волн на каплях эллипсоидальной формы [17].

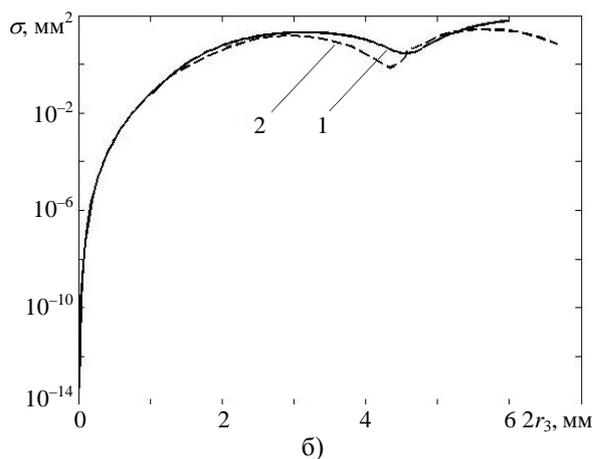
На рис. 7 приведены результаты строгого решения задачи об обратном рассеянии капли Пруппахера [17] в диапазоне 8,6 мм (кривые 2) для вертикальной полярзации падающего поля (рис. 7, а) и для горизонтальной полярзации (рис. 7, б), а кривые 1 соответствуют расчетам согласно выражениям (11), (12). Как видно, ис-

пользованное приближение практически не отличается от результатов строгого решения [17], когда среднекубический диаметр не превышает  $2r_3 \leq 3$  мм (дифракционный параметр

$$\rho_d = \frac{2\pi r_3}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'} \leq 10).$$



а)



б)

Рис. 7. Сравнение ЭПР эллипсоидальной капли (кривые 1) с данными [17] (кривые 2) для вертикальной полярзации (а) и горизонтальной полярзации (б) в диапазоне  $\lambda = 8,6$  мм

Несмотря на указанные расхождения результатов вычислений в области крупных капель, необходимо отметить, что диаметр основной массы дождевых капель для осадков на Европейской территории не превышает  $2r_3 = 0,8 \div 0,9$  мм [16], а максимальный диаметр  $2r_3 = 3$  мм встречается в очень сильных ливневых дождях интенсивностью более  $I \geq 50 \div 60$  мм/ч, вероятность выпадения которых не превышает 0,1 % [20]. Поэтому вполне обосновано предположить, что вклад ошибки приближенных вычислений ЭПР за счет крупных капель  $2r_3 \geq 3$  мм в общую ЭПР полидисперсной среды для большинства практически значимых ситуаций в среднем должен быть пренебрежимо мал.

Выводы относительно малости влияния несферической формы капель дождя на результа-

ты двухчастотного зондирования каплей дождя качественно подтверждаются также результатами экспериментальных исследований в диапазонах 8 мм и 3,2 см, которые выполнены в работе [18]. В цитируемой работе исследовалось в том числе рассеяние на каплях, форма которых заметно отличалась от сферической (рис. 8).



Рис. 8. Форма падающей капли

Однако, в отличие от случая свободного падения, капли не сплющивались, а вытягивались в вертикальном направлении, что вызвано растяжением капель в момент их отрыва от выходного отверстия генератора капель и небольшим расстоянием свободного падения  $< 2$  м.

При этом направление вытянутости капли (в вертикальной или горизонтальной плоскости) в рассматриваемом случае роли не играет, а результаты измерения среднекубического радиуса капли с помощью двухчастотного зондирования  $r_{2f}$  хорошо соответствуют контактным измерениям путем вычисления ее объема  $r_v$  и фотографирования  $r_f$ , причем расхождение данных не превышает 4 % (см. таблицу).

Результаты сравнительных измерений

$r_{2f}$ , мм	$r_v$ , мм	$r_f$ , мм
1,83	1,89	1,84
1,95	2	1,97

Таким образом, приведенные экспериментальные данные косвенно подтверждают возможность использования двухчастотного метода для измерения размеров несферических капель с достаточной для практики точностью.

**Выводы.** Проведен анализ рассеивающих свойств эллипсоидальных дождевых капель на основе модели Пруппахера, которая учитывает влияние сил гравитации, аэродинамического сопротивления и поверхностного натяжения на форму свободно падающей капли. Несмотря на заметное отличие ЭПР эллипсоидальных и сферических капель, их дифференциальная отражаемость практически не отличается в широком диапазоне изменения геометрического и частотного параметров. Полученные приближенные выражения для обратного рассеяния электромагнитных

волн на эллипсоидальных каплях мало отличаются от строгого решения вплоть до значения дифракционного параметра  $\rho_d = \frac{2\pi r_3}{\lambda} \sqrt{\epsilon'} \leq 10$ .

Показано, что результаты двухчастотного зондирования дождя практически не зависят от формы капель и предположение об их сферичности вполне оправдано. Полученные результаты подтверждаются опубликованными данными экспериментальных исследований.

#### Библиографический список

1. *Атлас Д.* Успехи радарной метеорологии / Д. Атлас. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 194 с.
2. *Довиак Р.* Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Р. Довиак, Д. Зрнич; пер. с англ., под ред. А. А. Черникова. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 509 с.
3. *Mott H.* Remote Sensing with Polarimetric Radar / H. Mott. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2007. – 309 p.
4. *Абшаев М. Т.* Активно-пассивный метод обнаружения градовых очагов в кучево-дождевых облаках / М. Т. Абшаев, Х. Н. Кармов // Тр. Высокогорного геофиз. ин-та. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – Вып. 33. – С. 43–56.
5. *Menenghini R.* On the equivalence of dual-wavelength and dual-polarization equations for estimations of the raindrop size distribution / R. Menenghini, L. Liao // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2007. – 24. – P. 806–820.
6. *Khlopov G.* Profiling of rain parameters by double frequency radar / G. Khlopov, A. Linkova, O. Voitovych // Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp. (MRRS'2011). – Kiev, 2011. – P. 213–216.
7. *Tropical Rainfall Measuring Mission: description* [Электронный ресурс] / Goddard space flight centre, NASA. – <http://www.trmm.gsfc.nasa.gov>. – 20.04.2011.
8. *Global Precipitation Measurement: description* [Электронный ресурс] / Goddard space flight centre, NASA. – <http://pmm.nasa.gov/GPM>. – 20.04.2011.
9. *Горелик А. Г.* О взаимосвязи радиолокационной отражаемости и интенсивности дождя / А. Г. Горелик, С. Ф. Коломиец // Успехи современной радиоэлектрон. – 2006. – № 11. – С. 56–68.
10. *Степаненко В. Д.* Радиолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.
11. *Линкова А. М.* Использование микроструктурных параметров для обработки данных двухчастотного измерения интенсивности дождя / А. М. Линкова // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 1. – С. 33–38.
12. *Войтович О. А.* Двухчастотное профилирование параметров дождя / О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 3. – С. 51–60.
13. *Двухчастотное зондирование жидких осадков с помощью метеорадара МРЛ-1* / Е. Н. Белов, О. А. Войтович, А. М. Линкова и др. // Радиофизика и электрон. – 2012. – 3(17), № 1. – С. 49–59.
14. *Хюлст Г. ван де.* Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст; пер. с англ. под ред. В. В. Соболева. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 536 с.
15. *Pruppacher H. R.* A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air / H. R. Pruppacher, K. V. Beard // Quart. J. Roy. Met. Soc. – 1970. – 96, iss. 408. – P. 247–256.
16. *Шупяцкий А. Б.* Радиолокационное измерение интенсивности и некоторых других характеристики осадков / А. Б. Шупяцкий. – М.: Гидрометеиздат, 1960. – 119 с.
17. *Айвазян Г. М.* Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках / Г. М. Айвазян. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 480 с.
18. *Огутти Т.* Распространение и рассеяние электромагнитных волн в дожде и других гидрометеорах / Т. Огутти //

- Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон. – 1983. – 71, № 9. – С. 6–65.
19. Kulemin G. P. Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter / G. P. Kulemin; D. Barton (ed.). – Boston-L.: Artech House, 2003. – 327 p.
20. Дистанционное измерение размеров капель воды с помощью двухчастотного зондирования / О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов, С. И. Хоменко // Радиопизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 4. – С. 78–84.

*Рукопись поступила 24.05.2012.*

G. Veselovska, O. Voitovych,  
A. Linkova, G. Khlopov

## DUAL SENSING OF WATER DROPLETS OF ELLIPSOIDAL SHAPE

The development of radar methods for measurement of rainfall characteristics is of great interest because of study of physical processes in atmosphere, as well as solving of practical problems. A lot of attention is paid to development of double-frequency methods, but the majority of published papers are related to analysis of spherical drops, while the shape of the actual drop is significantly different from a sphere, especially for great particles. This significantly affects the characteristics of the scattered signals, therefore the scattering of electromagnetic wave at dielectric particles of ellipsoidal shape is of a considerable interest. The present paper is devoted to peculiarities of double-frequency sensing of ellipsoidal drops by numerical calculations. The consideration is performed in the framework of Pruppaher model using the method of dipole moments in the calculations of drops reflectivity. It is shown that the differential reflectivity of ellipsoidal drops and drops of spherical shape with equal root-mean-cube diameter is practically the same. The data obtained were compared with published data and it was shown that the results are consistent with the graphic accuracy of water particles with root-mean-cube diameter less than 3 mm. The main conclusion of the paper is

made about low impact of nonsphericity of drops on the double-frequency sensing.

**Key words:** ellipsoidal drop, the effective area of scattering, remote sensing, root-mean-cube radius.

Г. Б. Веселовська, О. А. Войтович,  
А. М. Лінкова, Г. І. Хлопов

## ДВОЧАСТОТНЕ ЗОНДУВАННЯ ВОДЯНИХ КРАПЕЛЬ ЕЛІПСОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ

Розробці радіолокаційних методів вимірювання рідких опадів приділяється значна увага у зв'язку з дослідженнями фізичних процесів у атмосфері, також при розв'язанні прикладних задач. При цьому особливу увагу приділено двочастотному зондуванню, однак більшість опублікованих робіт пов'язано з аналізом крапель сферичної форми, у той час як форма реальних крапель суттєво відрізняється від сферичної, особливо для великих часток. Це значно впливає на характеристики відбиваних сигналів, у зв'язку з чим значний інтерес представляє розв'язання задачі розсіювання поля на діелектричних частках еліпсоїдальної форми. Робота присвячена аналізу можливостей двочастотного зондування для вимірювання розмірів крапель води шляхом числового моделювання. Розгляд проблеми проведено у рамках моделі Пруппахера з урахуванням методу дипольних моментів при розрахунку відбиваності крапель води. Показано, що диференційна відбиваність еліпсоїдальних крапель і крапель сферичної форми з однаковим середньокубічним діаметром практично не відрізняються. Проведено порівняння з опублікованими даними і показано, що результати співпадають з графічною точністю для часток води, середньокубічний діаметр яких не перевищує 3 мм. Зроблено висновок про слабкий вплив форми крапель на результати двочастотного зондування.

**Ключові слова:** еліпсоїдна крапля, ефективна площа розсіювання, дистанційне зондування, середньокубічний радіус.