

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, РАДИОЛОКАЦИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

УДК 551.508.85

Е. Н. Белов, О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. А. Руднев, Г. И. Хлопов, С. И. Хоменко

ДВУХЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЖИДКИХ ОСАДКОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТЕОРАДАРА МРЛ-1

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: khlopov@ire.kharkov.ua*

Рассматриваются результаты экспериментального исследования двухчастотного метода зондирования жидких осадков с использованием сигналов метеорадара МРЛ-1 для измерения их микроструктурных характеристик. Приведенный алгоритм обеспечивает однозначное восстановление микроструктурных характеристик с учетом затухания сигналов в дожде. Полученные результаты сравниваются с показаниями быстродействующего наземного дождемера. Представлены основные расчетные соотношения, параметры экспериментального оборудования, а также методика и результаты предварительных натуральных экспериментов. Ил. 20. Табл. 3. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, дифференциальная эффективная поверхность рассеяния, коэффициент ослабления, интенсивность дождя, метеорадар.

Разработке радиолокационных методов измерения характеристик жидких осадков уделяется значительное внимание в связи с исследованиями физических процессов в атмосфере [1], а также при решении многочисленных прикладных задач [2].

Используемые в настоящее время методы в значительной мере основаны на применении так называемого $Z-I$ -соотношения [3], которое отражает корреляционную связь между интенсивностью осадков I (мм/ч) и радиолокационной отражаемостью Z (мм⁶/м³) в виде $Z = AI^B$, где константы A и B определяются экспериментально. При этом одному и тому же значению интенсивности дождя может соответствовать различная структура осадков (вид распределения частиц по размерам), поэтому значения констант меняются в широких пределах ($A = 50 \div 1000$, $B = 1 \div 2,87$) в зависимости от региона, времени года и происхождения осадков [4].

Значительный интерес представляет применение двухчастотного метода зондирования [4, 5], который получил развитие в связи с использованием метеорадаров космического базирования [6, 7]. Преимуществом подобного подхода является то, что в этом случае задача формулируется относительно параметров распределения частиц осадков (микроструктурных параметров), а интегральные характеристики, включая интенсивность и водность осадков, вычисляются на основе полученного распределения частиц, что значительно повышает достоверность и надежность дистанционного зондирования.

Подобный подход успешно реализуется для двухпараметрических распределений (Маршалла-Пальмера, Лоуса-Парсона и др. [8]), которые, однако, описывают мелкокапельную и крупнокапельную части реальных распределений с большой погрешностью [9].

В настоящее время широко используется трехпараметрическое гамма-распределение $N(D) = N_0 D^\alpha \exp(-D/\beta)$ (здесь D – диаметр частиц; N_0 , α и β – микроструктурные параметры распределения) [9], которое удовлетворительно аппроксимирует экспериментальные данные для интервалов усреднения порядка десятков секунд [6]. Однако при двухчастотном зондировании возможно определить только два параметра, поэтому исследовались [6, 7, 9] различные подходы с целью доопределить систему уравнений за счет дополнительных корреляционных связей между микроструктурными параметрами гамма-распределения.

В то же время было предложено [10, 11] использовать данные контактных измерений [12], которые связывают параметры гамма-распределения с интенсивностью дождя. Указанные зависимости получены в результате статистической обработки данных обширных измерений и отличаются высокой надежностью. В итоге, как показали результаты численного моделирования, подобный подход позволяет обеспечить однозначное измерение микроструктурных параметров распределения, а также интегральных характеристик (концентрация капель, интенсивность и водность осадков) с учетом затухания сигналов.

Также представляет интерес экспериментальная оценка эффективности предложенного алгоритма в натуральных условиях, что и является целью настоящей работы. При этом приводится описание алгоритма обработки сигналов, измерительного комплекса на основе двухчастотного метеорадара типа МРЛ-1, результаты экспериментов и сопоставление их с данными контактных измерений интенсивности дождя с помощью наземного дождемера.

1. Алгоритм обработки данных двухчастотного зондирования. Двухчастотное зондирование осадков основано на измерении дифферен-

циального значения принятой мощности $P_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{P_R(\lambda_1)}{P_R(\lambda_2)}$ на двух длинах волн λ_1, λ_2 и вычислении дифференциальной эффективной поверхности рассеяния (ДЭПР) $\sigma_D(\lambda_1, \lambda_2)$ в виде отношения [11, 13] удельных ЭПР $\sigma_0(\lambda_{1,2})$:

$$\sigma_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\sigma_0(\lambda_1)}{\sigma_0(\lambda_2)} = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2) K_D(\lambda_1, \lambda_2, R)}, \quad (1)$$

где $C_r = \frac{P_T(\lambda_1) G_A^2(\lambda_1) \lambda_1^2 V_{ef}(\lambda_1)}{P_T(\lambda_2) G_A^2(\lambda_2) \lambda_2^2 V_{ef}(\lambda_2)}$ – постоянная радара; P_T – мощность передатчика; G_A – коэффициент усиления антенны; V_{ef} – эффективный рассеивающий объем; $K_D(\lambda_1, \lambda_2, R) = \frac{K(\lambda_1)}{K(\lambda_2)}$ – дифференциальное значение коэффициента ослабления отраженных сигналов в дожде $K(\lambda_{1,2})$ (рис.1).

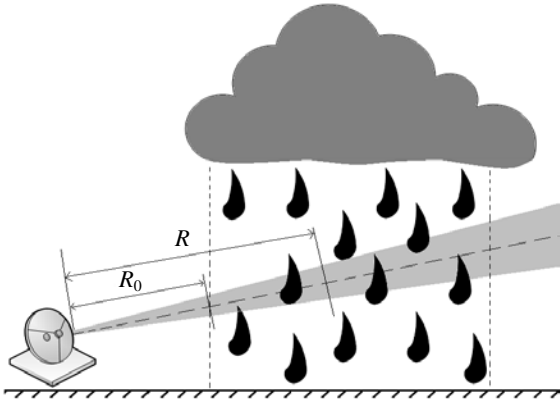


Рис. 1. Радиолокационное зондирование зоны дождя

При этом дифференциальный коэффициент ослабления записывается в виде [11]

$$K_D(\lambda_1, \lambda_2, R) = \exp\left\{-2 \cdot 10^{-3} \int_{R_0}^R dR' N_T(R') \times \int_0^\infty dD F(D, \alpha) [\sigma_{AT}(D, \lambda_1) - \sigma_{AT}(D, \lambda_2)]\right\}, \quad (2)$$

где R_0 и R – расстояния до зоны дождя и до рассеивающего объема соответственно;

$N_T = \int_0^\infty dD N(D)$ – концентрация частиц в единице объема; $F(D)$ – плотность вероятности распределения частиц по размерам, в качестве которой используется широко распространенное гамма-распределение [9]

$$F(D) = \frac{N(D)}{N_T} = \frac{D^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)\beta^{\alpha+1}} \exp\left(-\frac{D}{\beta}\right), \quad (3)$$

где D – диаметр частиц; $\Gamma(\alpha + 1) = \int_0^\infty dt t^\alpha e^{-t}$ – гамма-функция. В общем случае микроструктурные параметры зависят от расстояния R , но эта зависимость в дальнейшем опущена.

Выражение для коэффициента ослабления отраженных сигналов в дожде имеет вид [14] $K(\lambda, R) = \exp\{-2\gamma(\lambda, R)\}$ (4)

и определяется коэффициентом затухания $\gamma(\lambda, R) = 10^{-3} \int_{R_0}^R \chi(R') dR'$, который зависит от

удельного ослабления $\chi(R)$, $\text{мм}^2/\text{м}^3$. В случае полидисперсной среды удельные значения ослабления и ЭПР записываются в симметричной форме [13, 15]:

$$\chi(R) = N_T \int_0^\infty \sigma_{AT}(D, \lambda) F[D, \alpha, \beta] dD; \quad (5)$$

$$\sigma_0(\lambda) = N_T \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda) F(D, \alpha, \beta) dD, \quad (6)$$

где $\sigma_{AT}(\lambda, D)$ и $\sigma_p(D, \lambda)$ – поперечные сечения ослабления и рассеяния одной частицы, мм^2 [15, 16].

Как показано [13], при двухчастотном зондировании наилучшие результаты достигаются при использовании длин волн $\lambda_1 \approx 8$ мм и $\lambda_2 \approx 3,2$ см. Однако на длине волны $\lambda \approx 8$ мм крупнокапельная часть распределения частиц по размерам соответствует области резонансного рассеяния

$$\rho = \frac{\pi D}{\lambda_1} \sqrt{|\epsilon'|} \geq 1, \text{ где } \epsilon' - \text{ комплексная диэлектрическая}$$

проницаемость воды. Поэтому для вычисления поперечного сечения ослабления $\sigma_{AT}(\lambda, D)$ и рассеяния $\sigma_p(D, \lambda)$ в настоящей работе рассматриваются частицы сферической формы, что позволяет использовать решение задачи о дифракции электромагнитных волн на диэлектрической сфере (теория Ми [15]):

$$\sigma_{AT} = \frac{\pi D^2}{2\rho^2} \sum_{n=1}^\infty (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n); \quad (7)$$

$$\sigma_p = \frac{\pi r^2}{\rho_{1,2}^2} \left| \sum_{n=1}^\infty (-1)^n (2n+1)(a_n - b_n) \right|^2, \quad (8)$$

где a_n и b_n – коэффициенты разложения рассеянного поля, выражения для которых приведены в работе [15].

Комбинируя выражения (1)–(8) можно получить уравнение

$$\frac{\sigma_0(\alpha, \beta, \lambda_1)}{\sigma_0(\alpha, \beta, \lambda_2)} K_D(\lambda_1, \lambda_2, R) = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2)}, \quad (9)$$

которое содержит 3 неизвестных микроструктурных параметра. Для их вычисления в работах [10, 11]

предложен новый подход, основанный на использовании экспериментальных данных [12] контактных измерений зависимостей микроструктурных характеристик $\alpha(I)$ и $\beta(I)$ от интенсивности дождя. Аппроксимация полученных зависимостей с помощью метода наименьших квадратов позволяет получить эмпирические выражения для параметров распределения в следующем виде:

$$\alpha = aI^{-b} \text{ и } \beta = cI^d, \text{ мм,} \quad (10)$$

где $a = 3,8$; $b = 0,42$; $c = 0,148$ мм и $d = 0,38$. Тогда, исключая интенсивность дождя, можно получить уравнение, дополняющее (9):

$$\beta = c \left(\frac{a}{\alpha} \right)^{\frac{d}{b}}. \quad (11)$$

Кроме того, авторами [10, 11] также предложено использовать априорную информацию о рассеивающем объеме дождя в виде начальных условий при решении уравнений (9), (11). При этом рассматриваются два вида начальных условий (рис. 2):

– радар располагается на расстоянии R_0 от передней границы осадков, причем слева от зоны дождя ослабление сигналов отсутствует $K_D(R_0) \equiv 1$;

– радар находится в зоне дождя и начальные значения микроструктурных параметров в месте расположения радара могут быть найдены с помощью контактных измерений.

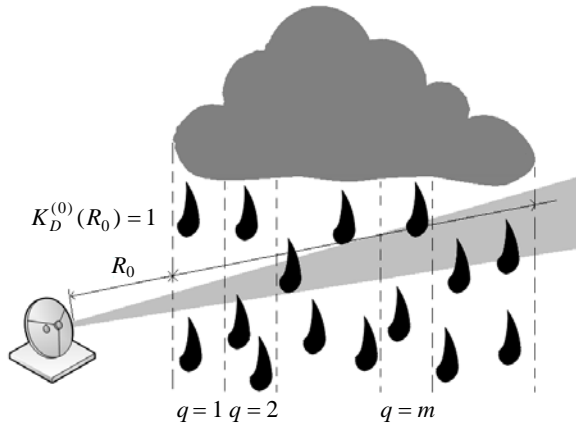


Рис. 2. Схема зондирования осадков

Рассмотрим случай использования радара с высоким разрешением по дальности ΔR , когда микроструктурные параметры дождя можно считать однородными в пределах одного элемента разрешения. При этом зона осадков протяженностью L содержит M элементов разрешения

$$1 \leq m \leq M = \text{Int} \left(\frac{L}{\Delta R} \right),$$

расстояние до которых равно $R_m = R_0 + (m-1)\Delta R$. Тогда для начальных условий первого типа дифференциальный коэф-

фициент ослабления для m -го элемента может быть представлен в виде произведения коэффициентов ослабления в предыдущих ячейках $q \leq m$

$$K_D(R_m) = \prod_{q=1}^m \exp\{-\Phi_q\}, \quad (12)$$

где q – порядковый номер ячейки разрешения радара, а выражение в показателе экспоненты $\Phi_q = 0,002\Delta R N_{Tq} \times$

$$\times \int_0^\infty dD F(D, \alpha_q, \beta_q) \Delta\sigma(D, \lambda_1, \lambda_2), \quad (13)$$

$$\Delta\sigma = [\sigma_{AT}(D, \lambda_1) - \sigma_{AT}(D, \lambda_2)],$$

где $\alpha_q = \alpha(R_q)$; $\beta_q = \beta(R_q)$; $N_{Tq} = N_T(R_q)$.

Значения микроструктурных параметров для первого элемента разрешения α_1 и β_1 можно найти, численно решая систему уравнений для среды без потерь, где $K_D(R_0) \equiv 1$:

$$\begin{cases} \sigma_D(\alpha_1, \beta_1) = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2)}; \\ \beta_1 = c \left(\frac{a}{\alpha_1} \right)^{\frac{d}{b}}, \end{cases} \quad (14)$$

а параметр N_{01} – в результате вычисления выражения

$$N_{01} = \frac{\sigma_0(R_0, \lambda_2) \beta^{-(\alpha_1+1)}}{\Gamma(\alpha_1+1) \int_0^\infty dD \sigma_p(D, \lambda_2) F(D, \alpha_1, \beta_1)} \quad (15)$$

Чтобы уточнить значения микроструктурных параметров, выражения (14), (15) следует рассматривать как начальные значения для последующих итераций. В общем случае выражение для итераций порядка p запишется в виде

$$\begin{aligned} \sigma_D(\alpha_1^{(p-1)}, \beta_1^{(p-1)}) K_D(\alpha_1^{(p-1)}, \beta_1^{(p-1)}, N_{01}^{(p-1)}) = \\ = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2)}; \end{aligned}$$

$$\beta_1^{(p)} = c \left(\frac{a}{\alpha_1^{(p)}} \right)^{\frac{d}{b}}; \quad (16)$$

$$N_{01}^{(p)} = \frac{\sigma_0(\lambda_2) [\beta_1^{(p)}]^{-\alpha_1^{(p)}+1}}{\Gamma(\alpha_1^{(p)}+1) \int_0^\infty dD \sigma_p(D, \lambda_2) F(D, \alpha_1^{(p)}, \beta_1^{(p)})}$$

$$N_{01}^{(-1)} = 0; \quad p = 1, 2, 3, \dots$$

Найденные микроструктурные параметры для 1-го элемента разрешения служат начальными значениями для следующей ячейки разрешения и позволяют последовательно применять описанный алгоритм к остальным элементам разрешения $2 \leq m \leq M$, что дает возможность по-

строить профиль микроструктурных параметров вдоль луча радара. Однако, в связи с нелинейным характером зависимости радиолокационной отражаемости от размеров частиц на длинах волн $\lambda_1 = 8$ мм $\lambda_2 = 3,2$ см, их разность меняет знак при увеличении размеров частиц (рис. 3).

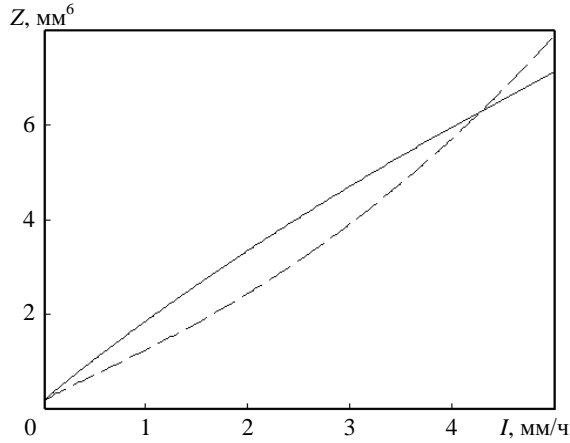


Рис. 3. Зависимости отражаемости от интенсивности дождя: сплошная линия – $\lambda = 8,2$ мм; штриховая – $\lambda = 3,2$ см

Это приводит к неоднозначности измерения микроструктурных параметров (рис. 4). В этом случае одному значению дифференциальной ЭПР соответствуют два значения параметра распределения (зависимость параметра α показана на рис. 4, а, параметра β – на рис. 4, б, N_0 – на рис. 4, в).

Для устранения неоднозначности предлагается использовать зависимости микроструктурных параметров от удельного значения ЭПР, которые имеют монотонный характер, как показано на рис. 5 для параметра α при $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см.

Это позволяет сформулировать систему трансцендентных неравенств для выбора соответствующей ветви зависимости (рис. 4) и исключить неоднозначность

$$\begin{cases} \alpha \leq \alpha_0 \text{ при } \sigma_0(\lambda_1) \leq \sigma_{01}, & \sigma_0(\lambda_2) \leq \sigma_{02}; \\ \alpha > \alpha_0 \text{ при } \sigma_0(\lambda_1) > \sigma_{01}, & \sigma_0(\lambda_2) > \sigma_{02}, \end{cases} \quad (17)$$

где значения констант равны $\alpha_0 = 4,05$, $\sigma_{01} = 11,94$ мм²/м³, $\sigma_{02} = 0,035$ мм²/м³, а их смысл иллюстрирует рис. 5. Как показывает анализ, приведенные в (17) значения констант одинаковы для всех трех параметров и не зависят от параметров радара и интенсивности дождя.

В результате найденные значения микроструктурных параметров α , β и N_0 позволяют вычислить интегральные параметры, включая концентрацию капель (м⁻³)

$$N_T(R) = N_0 \Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}, \quad (18)$$

интенсивность дождя (мм/ч)

$$I = 3,6 \cdot 10^{-3} \frac{\pi}{6} N_T \int_0^{\infty} dD D^3 V(D) F(D, \alpha, \beta) \quad (19)$$

и водность (г/м³)

$$W = \frac{10^{-9} \pi \rho_w N_T \Gamma(\alpha + 4) \beta^3}{6 \Gamma(\alpha + 1)}, \quad (20)$$

где $V(D)$ – зависимость скорости падения капель от их диаметра [17], м/с; ρ_w – плотность воды, г/м³.

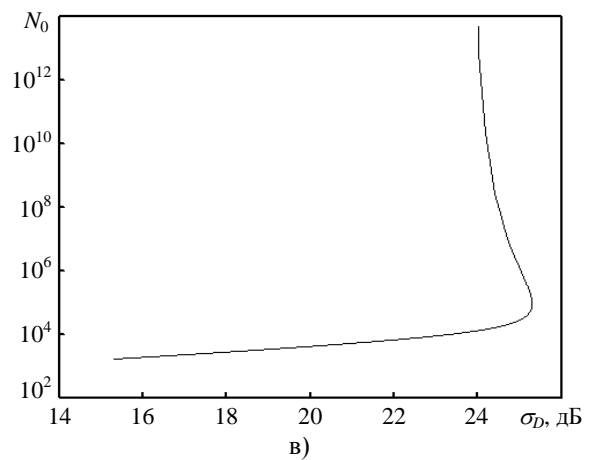
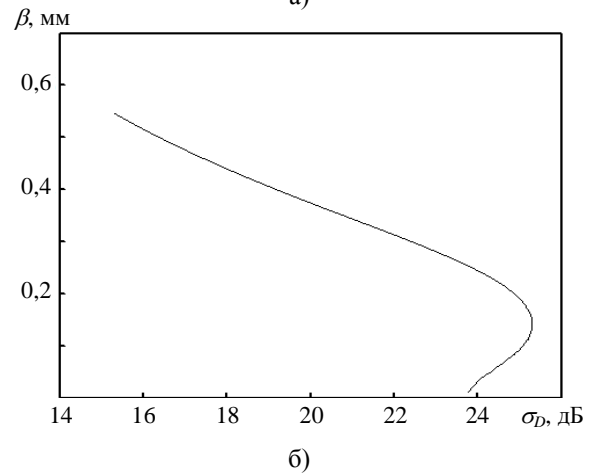
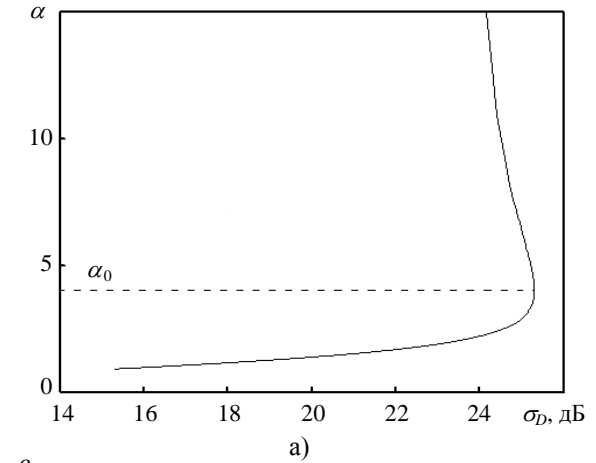


Рис. 4. Зависимость микроструктурных параметров от дифференциальной отражаемости: а) – α ; б) – β ; в) – N_0

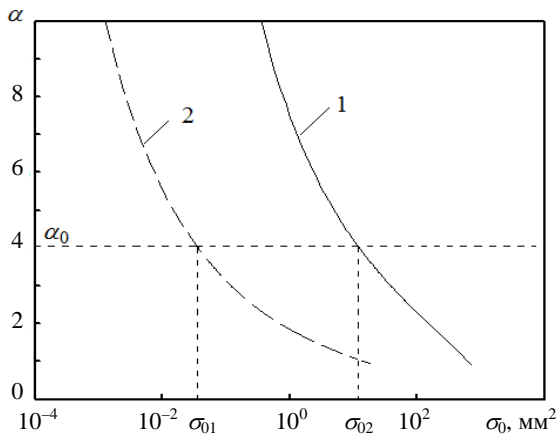


Рис. 5. Зависимость параметра α от удельного значения ЭПР: 1 – $\lambda = 8,2$ мм; 2 – $\lambda = 3,2$ см

Важным свойством итерационной схемы вычисления является ее сходимость к истинному значению вычисляемой величины. На рис. 6 приведены результаты вычислений (сплошные кривые) согласно описанной итерационной процедуры (1)–(18) для модели осадков с равномерным профилем интенсивности 11 и 15 мм/ч (пунктир) в зависимости от разрешающей способности двухчастотного радара по дальности ΔR .

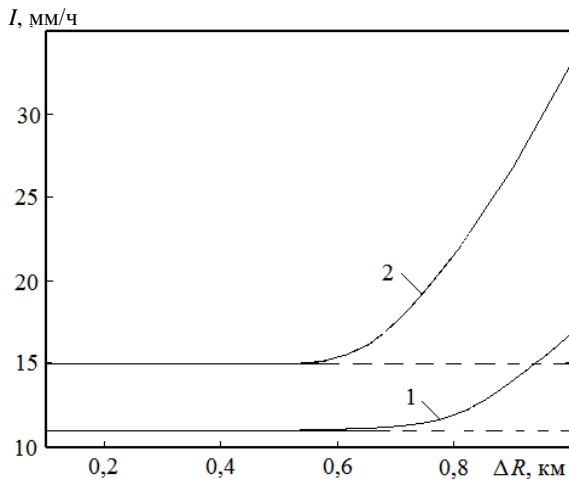


Рис. 6. Сходимость итерационной схемы для модели осадков с равномерным профилем: 1 – $I = 15$ мм/ч; 2 – $I = 15$ мм/ч

Как видно, для интенсивности осадков $I \geq 10$ мм/ч погрешность вычислений резко возрастает при размерах элемента разрешения $\Delta R \geq 600$ м, так как предположение об однородном распределении микроструктурных параметров внутри элемента разрешения (12) выполняется тем хуже, чем больше интенсивность дождя.

Однако для типовых метеорадаров разрешение по дальности обычно составляет порядка

$\Delta R \cong 150$ м, поэтому, как показывает анализ [16], применение описанной итерационной процедуры обеспечивает графическую точность даже для дождей значительной интенсивности $I \cong 15$ мм/ч (рис. 7: гладкие кривые – модельный профиль, точки – восстановленный), а количество итераций в самом неблагоприятном случае не превышает пяти. При этом рамки применимости описанного подхода ограничены точностью измерения ЭПР дождя, когда для осадков значительной интенсивности решение уравнений (14)–(16) становится неустойчивым (малые приращения дифференциальной ЭПР соответствуют большим изменениям его интенсивности). Поэтому при достижимой точности радиолокационных измерений порядка ± 1 дБ максимальная интенсивность дождя, которая может быть измерена с помощью описанного метода, не превышает 20 мм/ч. Вероятность выпадения дождей с такой интенсивностью на европейской территории составляет 75 % [18].

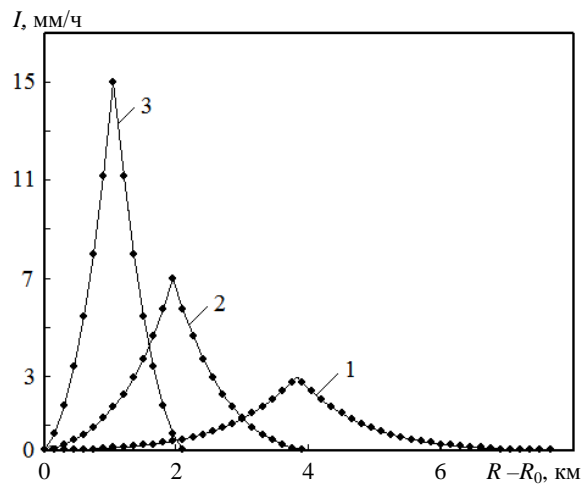


Рис. 7. Восстановление профиля интенсивности: 1 – $I_{\max} = 3$ мм/ч; 2 – $I_{\max} = 7$ мм/ч; 3 – $I_{\max} = 15$ мм/ч

2. Экспериментальный комплекс для природных исследований. Для проведения экспериментальных исследований в природных условиях разработан радиолокационный комплекс (рис. 8) на основе модернизированного импульсного некогерентного метеорадара типа МРЛ-1 [8] и специально изготовленного быстродействующего дождемера. При этом в состав радара дополнительно введены (рис. 8, б): блок калибровки чувствительности приемного устройства, оптико-телевизионный визир (ТВ визир) для визуального наблюдения исследуемых объектов, блок интерфейса для сопряжения РЛС с персональным компьютером (ПК) и блок управления положением антенны.

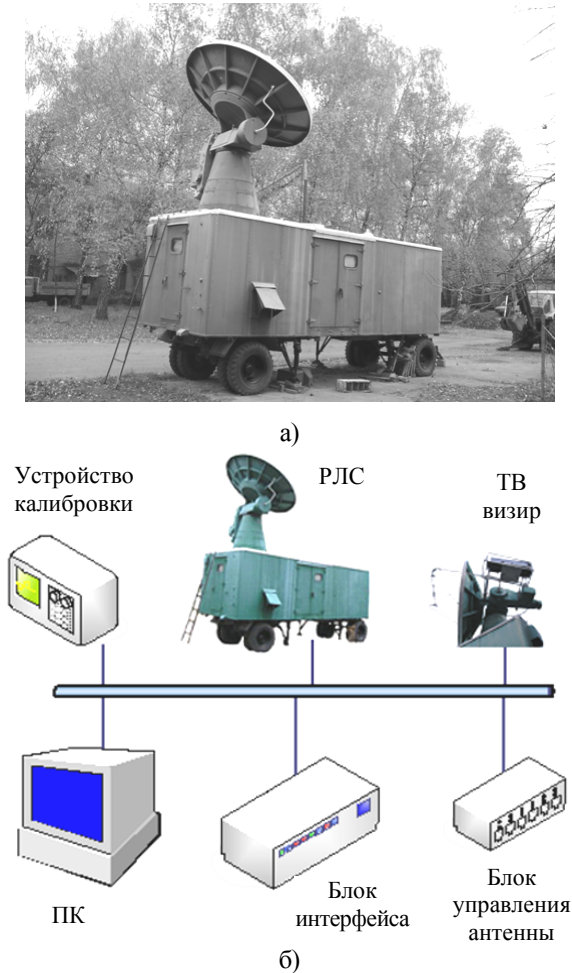


Рис. 8. Радиолокационный комплекс: а) – общий вид; б) – его структура

Использование ПК обеспечивает управление антенной радара, а калибровка чувствительности приемного устройства совместно с встроенным измерителем мощности передатчика и разработанным программным обеспечением позволяет измерять абсолютные значения мощности отраженных сигналов.

При этом нелинейность амплитудной характеристики приемного устройства компенсируется в диапазоне не менее 45 дБ, что обеспечивает измерение радиолокационной отражаемости исследуемых объектов с точностью не хуже $\pm 1,0$ дБ с учетом калибровки усиления антенны и потерь в антенно-фидерном тракте.

Предварительная обработка и передача дискретизированных данных осуществляется синхронно с импульсами запуска РЛС с периодом 3,33 мс (300 Гц). Временной интервал, в течение которого осуществляется прием отраженных сигналов, составляет 250 мкс (максимальная дальность 37,5 км), интервал предварительной обработки отраженных сигналов равен 230 мкс, а передача данных в ПК осуществляется за время 2,85 мс.

Блок сопряжения формирует импульсы запуска приемопередатчика РЛС, управляет положением антенны по азимуту и углу места, а также обеспечивает преобразование принятых сигналов в цифровую форму с последующей передачей в ПК.

Блок интерфейса осуществляет связь радара с ПК и управляет работой блока управления приводом антенны. Кроме того, блок интерфейса управляет аналого-цифровым преобразователем (АЦП) для оцифровывания отраженных сигналов и содержит устройство формирования запускающих импульсов для временной синхронизации всех подсистем измерительного комплекса, включая приемопередатчик (штатное устройство запуска передатчика радара отключается), блок управления и индикации, а также систему обработки отраженных сигналов. Оцифрованные отраженные сигналы с выхода двух АЦП накапливаются в модуле предварительной обработки, откуда передаются в ПК по шине *USB*, где и осуществляется их вторичная обработка и отображение.

Время сканирования сектора по углу места $0 \div 90^\circ$ составляет ≈ 77 с (шаг сканирования антенны $\approx 1,0^\circ$, количество ячеек по дальности – 250). Основные характеристики измерительного комплекса приведены в табл. 1.

Таблица 1
Параметры измерительного радара

Параметр	Канал 1	Канал 2
Длина волны λ , мм	8,2	32
Импульсная мощность P_T , кВт	70	250
Коэффициент усиления антенны G_A , дБ	58	46
Ширина диаграммы направленности антенны, $^\circ$	0,22	0,7
Разрешение по дальности, м	75	150

Для проведения синхронных дистанционных и контактных измерений интенсивности дождя разработан и изготовлен быстродействующий дождемер на основе электронных весов, схема которого приведена на рис. 9.

Капли дождя улавливаются воронкой 1 с диаметром входного отверстия $D_d = 500$ мм и стекают в сосуд 2, установленный на чаше электронных весов 3. Показания электронных весов вводятся в ПК, а программное обеспечение позволяет выбирать время обновления показаний и длительность реализации. При этом текущая интенсивность и количество осадков Q (мм) вычисляются в соответствии с выражениями

$$I(t) = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\rho S_0} \frac{\Delta M(t)}{\Delta t}, \quad Q = \frac{\Delta t}{3,6 \cdot 10^3} \sum_{n=1}^N I(t_n), \quad (21)$$

где ρ – плотность воды, г/мм³; $S_0 = \pi a^2$ – площадь входного отверстия воронки радиусом $a = D_d / 2$; $\Delta M(t)$ – приращение массы воды (τ) за время Δt (с).



Рис. 9. Дождемер: 1 – воронка; 2 – сосуд; 3 – весы

3. Результаты экспериментальных исследований. Целью натурных экспериментов является оценка работоспособности предложенного алгоритма двухчастотного зондирования жидких осадков путем сравнения результатов с данными наземного дождемера. Для этого дождемер располагался рядом с метеорадаром (рис. 10), антенна которого ориентировалась в зенит, а записи сигналов с выхода метеорадара и дождемера проводились синхронно. Время усреднения данных для дождемера составляет 6 с, для радара – 0,86 с (256 отсчетов), а период обновления данных с выхода радара 2 с.

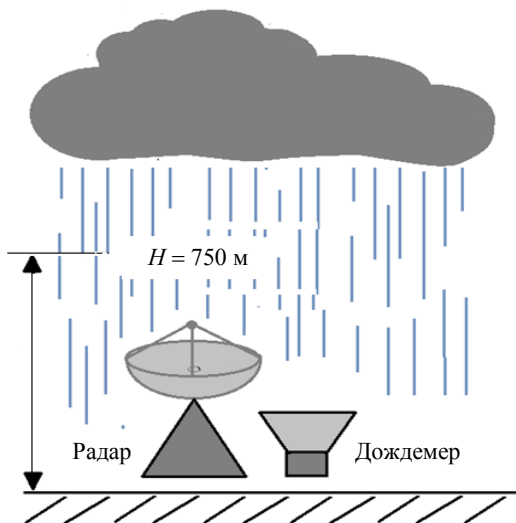


Рис. 10. Схема проведения измерений

В общем случае сопоставление данных наземных и дистанционных измерений представляет весьма трудную задачу, так как необходимо обеспечить проведение измерений для одной и той же пространственной области дождя. Необходимым условием для этого является отсутствие бокового сноса дождевых масс, причем отсутствие ветра вблизи земной поверхности не гарантирует отсутствие бокового сноса по высоте.

Кроме того, из-за неизвестной скорости падения дождевых масс данные радиолокационного зондирования и наземного дождемера разнесены во времени на неопределенный интервал. Так как скорость падения капель зависит от их размера [18], то скорость падения дождевой массы в целом зависит от априори неизвестного распределения капель по размерам, и это является основной причиной, которая затрудняет сопоставление наземных и дистанционных данных.

Поэтому в работе вычислялась взаимная корреляционная функция интенсивности дождя, измеренной дистанционно $I_p(t)$ и с помощью наземного дождемера $I_d(t)$

$$K(\tau) = \int_0^{\tau_p} dt I_d(t) I_p(t - \tau), \quad (22)$$

причем время падения дождевых масс τ_d соответствует максимуму коэффициента корреляции $K(\tau_d) = K_{\max}$.

На рис. 11 показан пример радиолокационного изображения одного из исследованных дождей, которое соответствует практически полному отсутствию ветра (средняя скорость $\bar{V} < 0,5$ м/с) и вертикальному падению капель. При этом пространственное распределение интенсивности относительно равномерно (интенсивность осадков пропорциональна интенсивности окраски).

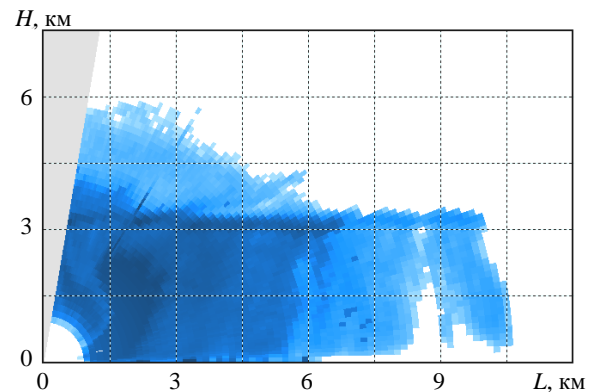


Рис. 11. Радиолокационное изображение дождя

На рис. 12 показаны примеры измерений интенсивности дождя с помощью радара (кривая 1) и дождемера (кривая 2), которые построены в масштабе единого времени.

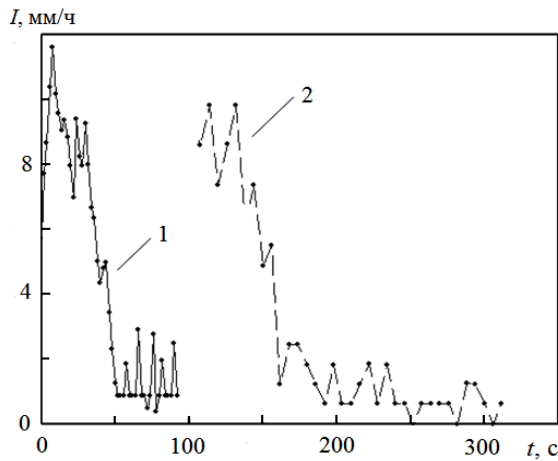


Рис. 12. Сравнение полученных данных

При вычислении микроструктурных характеристик ослабление сигналов в дожде учитывалось путем использования описанной итерационной процедуры (14)–(17), а вычисление максимума корреляционного интеграла (22) $K(\tau_d) \cong 0,8$ позволило определить запаздывание данных дождемера относительно радиолокационных данных $\tau_d \cong 114$ с, которое соответствует средней скорости падения дождевых масс 6,8 м/с.

Так как описанный алгоритм двухчастотного зондирования построен на основе усредненных данных контактных измерений [12], то не следует ожидать совпадения радиолокационных и наземных данных в каждый момент времени, несмотря на качественно похожий характер зависимостей (рис. 12). Однако сравнение радиолокационных и наземных данных (табл. 2), усредненных за время 20...30 с для разных реализаций отличаются незначительно $\delta_I = 2 \frac{|\bar{I}_p - \bar{I}_d|}{\bar{I}_p + \bar{I}_d} \cdot 100\% \leq 15\%$ (\bar{I}_p, \bar{I}_d – средние значения интенсивности, полученные с помощью радара и дождемера соответственно).

Таблица 2
Усредненные параметры дождя

№	\bar{I}_p , мм/ч	\bar{I}_d , мм/ч	δ_I , %	W , г/м ³
1	8,76	8,34	4,9	1,16
2	4,11	4,73	14,1	0,4
3	1,39	1,37	1,5	0,14
4	3,94	3,79	3,9	0,48

При этом данные экспериментов № 1–3 соответствуют дождям практически постоянной интенсивности, а эксперимент № 4 – осадкам с ярко выраженной изменчивостью.

Описанный метод двухчастотного зондирования сформулирован относительно микроструктурных характеристик осадков, и это позво-

ляет определить не только интенсивность дождя, но также и другие интегральные параметры, включая модальный диаметр $D_{\text{мод}}$, концентрацию частиц N_T (м⁻³), вид закона распределения $F(D)$, а также водность осадков W (г/м³).

На рис. 13 приведена временная структура микроструктурных характеристик дождя (см. рис. 11), в том числе параметра $\alpha(t)$ – рис. 13, а, $\beta(t)$ – рис. 13, б и $N_0(t)$ – рис. 13, в.

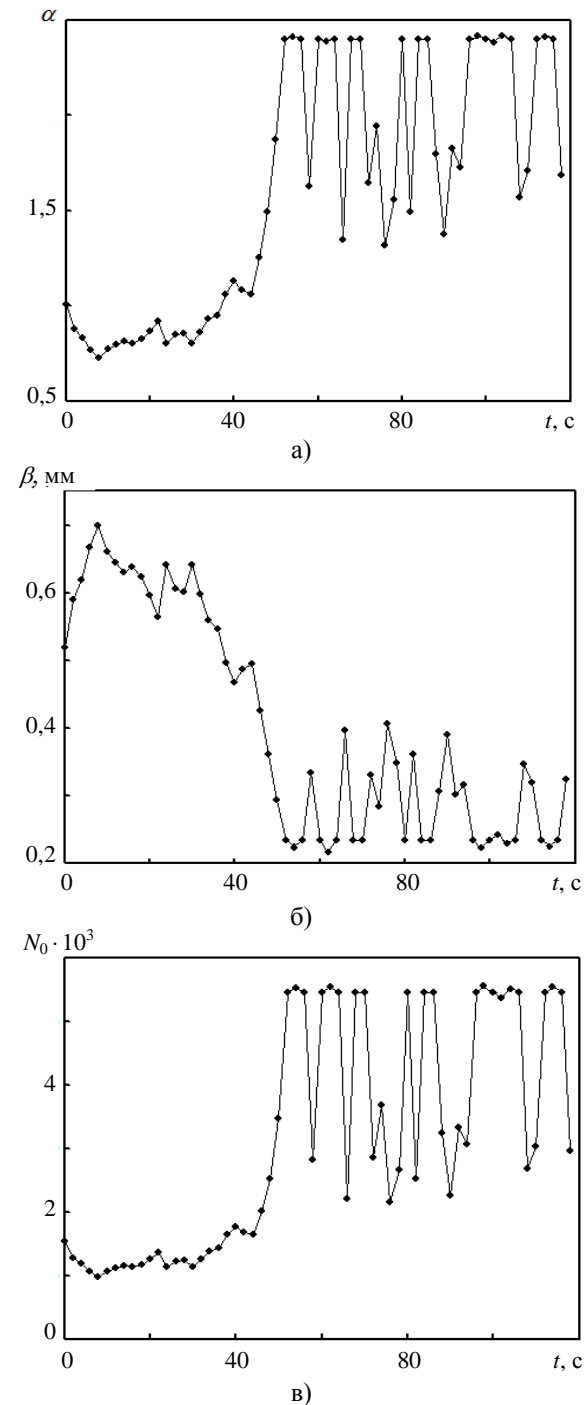


Рис. 13. Временная структура микроструктурных параметров дождя (см. рис. 11): а) – $\alpha(t)$; б) – $\beta(t)$; в) – $N_0(t)$

Как следует из приведенных графиков, микроструктурные характеристики отличаются значительной изменчивостью, в связи с чем одной и той же интенсивности могут соответствовать дожди с разными законами распределения частиц. Это, в частности, объясняет известные ограничения одночастотного зондирования на основе $Z-I$ -соотношения [6, 7].

Кроме того, следует отметить характерные области насыщения на рис. 13, а, в, которые, по-видимому, можно объяснить специфической зависимостью концентрации капель от интенсивности дождя (рис. 14) согласно [12, 19]. Сначала интенсивность дождя растет за счет увеличения концентрации капель, а в дальнейшем – из-за увеличения размеров капель при практически постоянной концентрации.

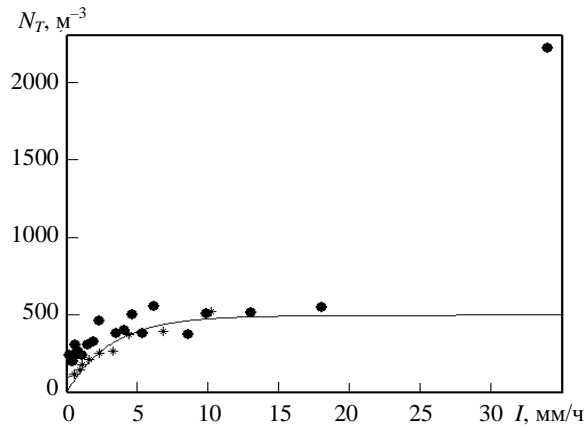


Рис. 14. Зависимость концентрации капель от интенсивности дождя: сплошная кривая – аппроксимация данных [12, 19]

Полученные данные использованы для вычисления (18)–(20) концентрации частиц в единице объема N_T (рис. 15) и водности дождя W (рис. 16). При этом максимальная концентрация частиц при $t \leq 50$ с и водность осадков соответствуют времени максимальной интенсивности дождя (см. рис. 12).

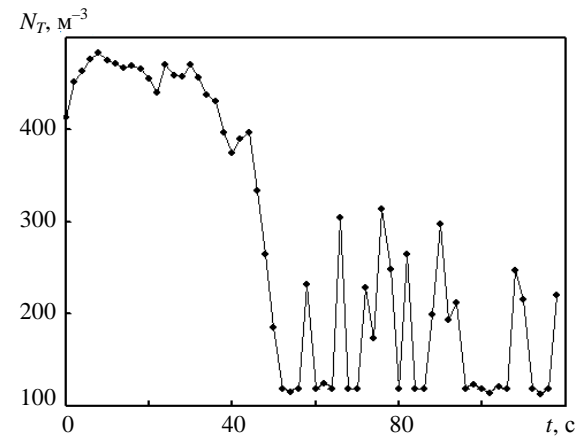


Рис. 15. Изменение концентрации частиц во времени

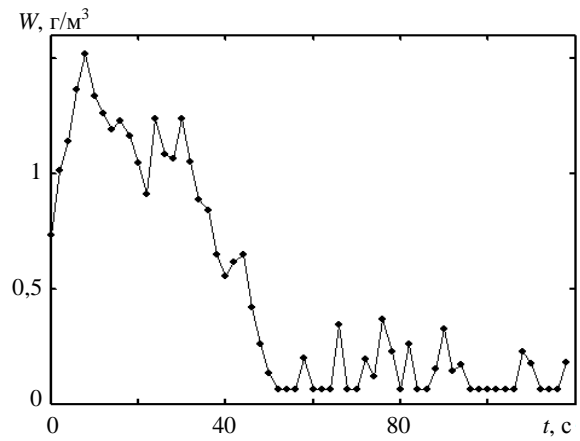


Рис. 16. Изменение водности дождя во времени

Учитывая значительную временную изменчивость измеренных микроструктурных характеристик, представляет интерес вычисление их средних значений (табл. 3).

Таблица 3

Параметр	Средние значения микроструктурных параметров			
	Номер эксперимента			
	1	2	3	4
$\bar{\alpha}$	0,83	1,63	2	1,59
$\bar{\beta}$, мм	0,62	0,38	0,28	0,4
\bar{N}_0	1188	3180	4240	3100
\bar{N}_T , m^{-3}	461	270	174	279
$\bar{D}_{\text{мод}}$, мм	0,51	0,54	0,55	0,54

Отметим, что несмотря на разную интенсивность дождей ($I = 1 \div 9$ мм/ч), медианный диаметр остается практически неизменным, что соответствует временной зависимости концентрации капель (рис. 15). Этот вывод также подтверждается видом функции распределения для исследованных дождей (рис. 17), который рассчитан с использованием данных табл. 3.

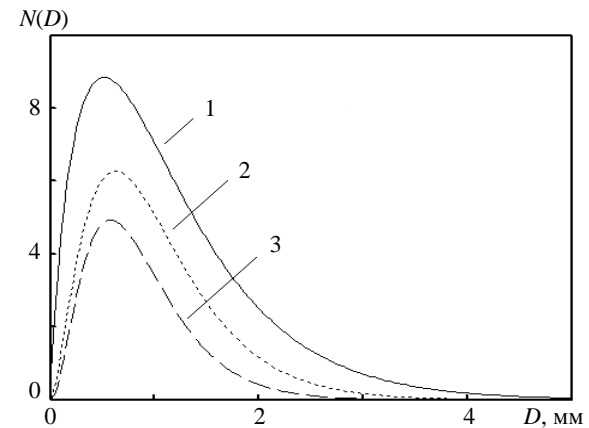


Рис. 17. Функция распределения для исследованных дождей: 1 – $I = 8,8$ мм/ч; 2 – $I = 4,1$ мм/ч; 3 – $I = 1,4$ мм/ч

В то же время, как было указано выше, сопоставление радиолокационных и наземных измерений возможно далеко не всегда, в частности, при воздействии бокового ветра. На рис. 18 приведено радиолокационное изображение сильно неоднородного дождя в присутствии сильного бокового ветра (средняя скорость $\bar{V} \cong 8$ м/с). При этом сопоставление данных радиолокационных измерений (рис. 19) и наземных данных (рис. 20) показывают их значительное расхождение (максимальные значения $I_p \cong 18$ мм/ч и $I_d \cong 9$ мм/ч соответственно).

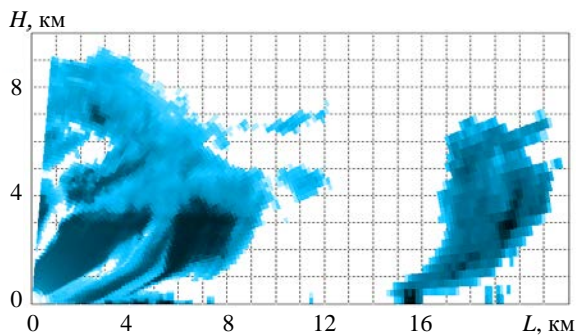


Рис. 18. Влияние сильного бокового ветра на структуру дождя

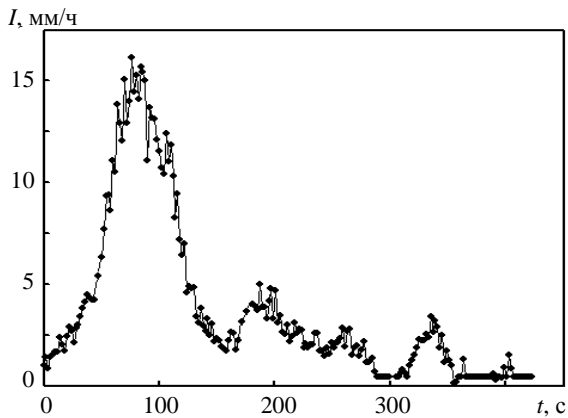


Рис. 19. Радиолокационные измерения интенсивности дождя при сильном ветровом сносе

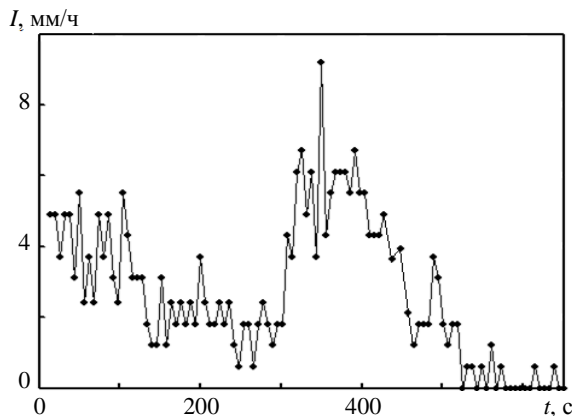


Рис. 20. Наземные измерения интенсивности дождя при сильном ветровом сносе

Кроме того, учитывая большое запаздывание наземных данных относительно дистанционных измерений $\cong 290$ с, можно сделать вывод о невозможности сопоставления дистанционных и наземных данных в условиях сильного бокового ветра.

Выводы. Таким образом, разработан и создан комплекс экспериментального оборудования для двухчастотного зондирования жидких осадков в составе модернизированного метеорадара МРЛ-1 и быстродействующего дождемера.

Разработана методика сопоставления данных двухчастотного радиолокационного зондирования жидких осадков и наземного дождемера для оценки эффективности предложенного алгоритма обработки данных дистанционного зондирования.

В результате проведенных измерений можно сделать предварительный вывод о перспективности предложенного алгоритма обработки данных двухчастотного зондирования жидких осадков. Однако для оценки точности метода необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований в широком диапазоне интенсивности дождей и в условиях разных сезонов.

1. *Скорер Р. С.* Аэродинамика окружающей среды / Р. С. Скорер; пер. с англ. под ред. А. Я. Прессман. – М.: Мир, 1980. – 549 с.
2. *Алексеев М. И.* Применение данных метеорадиолокаторов для прогноза поступления дождевых вод в систему водоотведения Санкт-Петербурга / М. И. Алексеев, Ф. В. Кармазинов, В. Д. Степаненко и др. // Тр. Главной геофиз. обсерватории. – 2007. – Вып. 556. – С. 202–214.
3. *Горелик А. Г.* О взаимосвязи радиолокационной отражаемости и интенсивности дождя / А. Г. Горелик, С. Ф. Коломиец // Успехи современной радиоэлектрон. – 2006. – № 11. – С. 56–68.
4. *Абшаев М. Т.* О возможностях радиолокационного исследования микроструктуры облаков и осадков / М. Т. Абшаев, Ю. А. Дадали // Тр. Высокогорного геофиз. ин-та. – 1966. – Вып. 5. – С. 71–85.
5. *Сулаквелидзе Г. Л.* Измерение интенсивности осадков мультисекторным / Г. Л. Сулаквелидзе, Ю. А. Абшаев // Тр. Высокогорного геофиз. ин-та. – 1968. – Вып. 11. – С. 198–214.
6. *Munchak S. J.* Retrieval of Raindrop Size Distribution from Simulated Dual-Frequency Radar Measurements / S. J. Munchak // J. Appl. Meteor. and Climatology. – 2008. – 47, N 1. – P. 223–239.
7. *Meneghini R.* Differential frequency Doppler weather radar: Theory and Experiment / R. Meneghini, S. W. Bidwell, R. Rincon, G. M. Heymsfield // Radio Sci. – 2003. – 8, N 3. – P. 1–10.
8. *Степаненко В. Д.* Радиолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 343 с.
9. *Haddad Z. S.* Parameterizing the raindrop distribution / Z. S. Haddad, S. L. Durden, E. Im // J. Appl. Meteor. – 1996. – 35, N 1. – P. 3–13.
10. *Linkova A.* Double frequency sounding of liquid precipitation / A. Linkova, G. Khlopov, S. Khomenko, O. Voitovych // Proc. 11th Intern. Radar Symp. (IRS). – Vilnius, 2010. – 1. – P. 324–325.
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. *Литвинов И. В.* Структура атмосферных осадков / И. В. Литвинов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 153 с.

13. Cherniakov M. O. Use of double frequency radar for measurements of rain parameter profile / M. Cherniakov, G. Khlopov, A. Linkova, O. Voitovych // Proc. Intern. Radar Symp. (IRS'2011). – Leipzig, 2011. – P. 250–255.
14. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах / Под ред. М. А. Колосова. – М.: Наука, 1977. – 122 с.
15. Ван-де-Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван-де-Хюлст; пер. с англ. под ред. В. В. Соболева. – М.: Изд. иностр. лит., 1961. – 536 с.
16. 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.
17. Gunn R. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air / R. Gunn, G. D. Kinzer // J. Meteorol. – 1949. – 6, N 4. – P. 243–248.
18. Алибегова Ж. Д. Пространственно-временная структура полей жидких осадков / Ж. Д. Алибегова. – Л.: Гидрометеопиздат, 1985. – 229 с.
19. Kelkar V. N. Size distribution of raindrops, III / V. N. Kelkar // Indian J. Meteorol. Geophys. – 1961. – 12, N 4. – P. 553–570.

Рукопись поступила 14.10.2011.

Ye. N. Belov, O. A. Voitovych, A. M. Linkova,
G. A. Rudnev, G. I. Khlopov, S. I. Khomenko

DOUBLE FREQUENCY SENSING OF LIQUID PRECIPITATION BY WEATHER RADAR MRL-1

Results of experimental study of double frequency sensing of microstructure parameters of liquid precipitation on the

base of on earlier developed algorithm and by means of weather radar of type MRL-1 are described. The used algorithm provides single-valued reconstruction of microstructure parameters and allows to take into account signal attenuation in the rain. Obtained radar results are compared with data of fast-acting ground rain gage. Main calculating relations, parameters of experimental equipments and results of preliminary experiments are presented.

Key words: radar cross-section, differential radar cross-section, attenuation coefficient, rain intensity, weather radar.

Є. М. Белов, О. А. Войтович, А. М. Лінкова,
Г. О. Руднєв, Г. І. Хлопов, С. І. Хоменко

ДВОЧАСТОТНЕ ЗОНДУВАННЯ РІДКИХ ОПАДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТЕОРАДАРА МРЛ-1

Розглядаються результати експериментального дослідження двочастотного методу зондування рідких опадів з використанням сигналів метеорадара МРЛ-1 для вимірювання їх мікроструктурних характеристик. Наведений алгоритм забезпечує однозначне відновлення мікроструктурних характеристик з урахуванням затухання сигналів внаслідок дощу. Отримані результати порівнюються з показаннями швидкодіючого наземного дощоміра. Подано основні розрахункові співвідношення, характеристики експериментального обладнання, а також методика та результати попередніх натурних експериментів.

Ключові слова: ефективна поверхня розсіяння, диференціальна ефективна поверхня розсіяння, коефіцієнт послаблення, інтенсивність дощу, метеорадар.