

УДК № 551.501.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-164-172

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ОГИБАЮЩЕЙ ПРИ ОБРАТНОМ РАССЕЯНИИ ПРОСТОГО РАДИОИМПУЛЬСА НА ЧАСТИЦАХ РАЗРЕЖЕННЫХ СРЕД

Д.А. ДЕНИСЕНКОВ<sup>1</sup>, А.Г. ГОРЕЛИК<sup>2</sup>, С.Ф. КОЛОМИЕЦ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия

Основу современных радиолокационных методик составляет прямое использование радиофизических данных о мощности обратного рассеяния. Вместе с тем объемы данных, получаемых от радиолокатора, позволяют формировать новые и существенно уточнять классические оценки. В этом направлении сделаны заметные шаги с использованием, например, фазовых (доплеровских) методов. Используемая в радиолокационной метеорологии «модифицированная рэлеевская модель» формирования рассеянного поля на частицах разреженной среды называется моделью Керра – Райса. Основным плюсом рэлеевской модели является простота. Но в ней самой заложено глубокое противоречие, состоящее в ее логической завершенности. На основе исследования статистики первого распределения в дождях различной интенсивности авторы на большом статистическом материале установили факт их нерэлеевской формы и чрезвычайной стабильности последней в отношении естественных изменений интенсивности осадков. Установлено отличие первого распределения от теоретически ожидаемого в рамках модели Керра-Райса, дающее возможность использовать линейно-логарифмическое детектирование. Сделан вывод, что ширина и среднее спектра того же самого сигнала имеют ожидаемую динамику относительно изменения интенсивности осадков и динамических процессов в них. Приведены таблицы с экспериментальными данными. Рассмотрены две основных модели распределения: логонормальная и «лого-гаммофункциональная». Сделан вывод, что, несмотря на отсутствие качественных отличий, разница в форме распределений, полученных на различной аппаратуре, может являться закономерным следствием значительных расхождений в пиковой мощности и/или ширине диаграммы направленности антенны. Приведены графики экспериментальных первых распределений флуктуаций огибающей в линейном и полулогарифмическом масштабе.

**Ключевые слова:** радиолокация, импульсный режим, разреженная среда, модель Керра – Райса, радиометеорология.

### ВВЕДЕНИЕ

Основу современных радиолокационных методик составляет прямое использование радиофизических данных о мощности обратного рассеяния. Теоретически она допускает недостаточно достоверный, но простой и непосредственный переход к метеорологическим оценкам. Практически во многих современных приложениях ее без какой-либо обработки наносят на карты и используют для краткосрочного прогноза погоды, оценки интенсивности осадков и количества выпадающей на землю влаги, в системах градозащиты. Такие методики имеют наблюдательный, полуколичественный характер.

Вместе с тем объемы данных, получаемые от радиолокатора, позволяют формировать новые и существенно уточнять классические оценки. В этом направлении сделаны заметные шаги с использованием, например, фазовых (доплеровских) методов. Измерения, позволяющие получать надежную количественную информацию в условиях, которые ранее были недоступны классическим методам, могут стать основой для существенного повышения точности и достоверности прогноза, расширения физических представлений об атмосферных процессах. Но измерительные методики требуют существенно больших затрат как на обработку сигналов, так и формирование теоретических основ для такой обработки. Их формирование невозможно без адекватных оперативных данных о микроструктуре рассеивающих объектов. Последняя чрезвычайно изменчива, как во времени, так и в пространстве, ее вклад зависит от направления зондирования. Использование неизменных на всем времени измерения,

априорных сведений о микроструктуре приводит либо к явным ошибкам или оценкам с недопустимо большими доверительными интервалами. Эффективные методы оперативной оценки микроструктуры не сформированы. Достоверные оперативные измерения такой величины представляют собой сложнейшую проблему. Но ее важность заставляет искать новые решения.

Целью настоящей статьи является рассмотрение ранее не обсуждавшихся в литературе экспериментальных результатов измерения плотности вероятности радиоэхо от жидкокапельных осадков и возможных способов их математической и геофизической интерпретации.

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Основная масса эмпирического материала в классический период развития радиолокационной метеорологии была получена с использованием обычного радиолокатора. В качестве теоретической базы для их интерпретации использовались и до сих пор используются простейшие энергетические соотношения, входящие в так называемое «основное уравнение метеорологической радиолокации». Соответствующие зависимости были сформулированы еще до Второй мировой войны и до настоящего времени существенно не изменялись.

Используемая в радиолокационной метеорологии «модифицированная рэлеевская модель» формирования рассеянного поля на частицах разреженной среды называется моделью Керра – Райса [1]. В геометрическом плане модификация затронула форму представления элементарного рассеивающего объема (ЭРО). Обратное рассеяние подразумевало переход от ЭРО в виде кубов к слоям. Экспериментальное обоснование указанной модели заключалось в построении первого и второго распределений по данным однопозиционного зондирования интенсивных осадков и облака пассивных отражателей на длине волны 10 см и дистанции около 10 км. Экспоненциальная форма плотности вероятности флуктуаций мощности, опубликованная в [1], позволяла провести полную аналогию с флуктуациями интенсивности в рэлеевской модели и тем самым установить аналогию между классической рэлеевской моделью и моделью зондирования осадков. В конце 40-х годов прошлого века Керр писал: «Отражатели, создающие сигнал от осадков, представляют или дождевые капли, или льдинки. Можно, следовательно, думать, что условия, которым должно удовлетворять собрание случайных отражателей, здесь так же хорошо выполняется, как и для «облака вибраторов». Это мнение основывается на результатах опыта».

Принципы рассеяния на случайно расположенных в пространстве и случайно движущихся рассеивателях были сформулированы Рэлеем относительно рассеяния «в бок», применительно к «микроскопическим рассеивателям» (молекулам разреженных газов), облучаемым широкополосными сигналами видимого диапазона солнечного излучения непрерывно. Поэтому сама возможность использовать эти соотношения применительно к «макроскопическим рассеивателям» в условиях обратного рассеяния с использованием когерентных и узкополосных сигналов в импульсном режиме работы радиолокатора имеет фундаментальное значение.

Основным плюсом рэлеевской модели является простота. Но в ней самой заложено глубокое противоречие, состоящее в ее логической завершенности. Опыт оптики учит, что усовершенствование таких моделей требует специально поставленных тонких экспериментов. Подобная практика в радиолокационной метеорологии значительно осложняется отсутствием эффективных средств контроля микроструктуры и динамики среды в рассеивающем объеме, и потому недостаточно развита. Тем не менее развитие возможностей тонкого анализа сигналов позволяет надеяться на получение подобной информации из данных обычных радиолокационных экспериментов, массово проводимых в радиолокационной метеорологии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Массовый переход к доплеровской обработке сигнала в шестидесятые годы привел к тому, что понятия первого распределения (плотности вероятности флуктуаций мощности, или огибающей), использовавшиеся в работах Керра, уже практически не встречались в литературе и не исследовалось на практике. Однако, когда решается вопрос о применимости той или иной модели, контроль формы первого распределения является достаточно эффективным решением.

Исследуя статистику первого распределения в дождях различной интенсивности авторы на большом статистическом материале был установлен факт их нерэлеевской формы и чрезвычайной стабильности последней в отношении естественных изменений интенсивности осадков. Информационный поиск позволил установить, что аналогичные результаты были получены в США еще в 1976 году, но до 2009 года не публиковались. В результате тезис о «независимости» формы и дисперсии первого распределения от интенсивности осадков получил еще более надежное подтверждение. Причем в американском отчете этот факт устанавливался для целого ряда различных частот зондирования сантиметрового и миллиметрового диапазона, а также круговой правой, вертикальной и горизонтальной поляризации (см. табл. 1, где данные об аппаратуре авторов показаны курсивом).

Установить отличие первого распределения от теоретически ожидаемого в рамках модели Керра – Райса позволило использование линейно-логарифмического детектирования. Рэлеевский сигнал на выходе подобного детектора должен иметь отрицательную асимметрию, но реальные распределения устойчиво демонстрировали протяженное правое крыло (рис. 1).

Важно подчеркнуть, что ширина и среднее спектра того же самого сигнала демонстрировали ожидаемую динамику относительно изменения интенсивности осадков и динамических процессов в них.

**Таблица 1**  
**Table 1**

Параметры РЛС и условий измерений  
Parameters of radar and measurement conditions

| №  | Параметр                        | 9 ГГц | 9 ГГц  | 18 ГГц  | 35 ГГц | 70 ГГц | 95 ГГц |
|----|---------------------------------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 1  | Пиковая мощность, Вт            | 40    | 250000 | 700     | 20     | 10     | 8      |
| 2  | Диаметр антенны, м              | 1,83  | 4,5    | 1,0/0,2 | 0,92   | 0,92   | 0,92   |
| 3  | Дальняя зона, м                 | 112   | 450    | 80      | 106    | 197    | 300    |
| 4  | Ширина диаграммы                | 1,2°  | 0,5°   | 10,4°   | 0,68°  | 0,34°  | 0,24°  |
| 5  | Длительность импульса, мкс      | 0,7   | 1,0    | 0,4     | 0,2    | 0,085  | 0,080  |
| 6  | Период повторения, мкс          | 625   | 830    | 263     | 312,5  | 250    | 250    |
| 7  | Полоса приемника, МГц           | 4     | –      | –       | 6      | 14     | 20     |
| 8  | Шум-фактор, дБ                  | 10    | –      | 18      | 13,4   | 18     | 28     |
| 9  | Дистанция зондирования, км      | 0,7   | 5      | 1,2–1,8 | 0,7    | 0,7    | 0,7    |
| 10 | Продольный масштаб ( $L$ ), м   | 105   | 125    | 60      | 30     | 13     | 12     |
| 11 | Поперечный масштаб ( $T$ ), м   | 1,83  | 5      | 4       | 0,92   | 0,92   | 0,92   |
| 12 | Объем ( $\pi LT^2/4$ ) куб. м   | 276   | 2500   | ~400    | 20     | 8,6    | 8,0    |
| 13 | Эксцентриситет объема ( $L/T$ ) | 57    | 25     | 15      | 32     | 14     | 13     |

Тем не менее есть все основания рассматривать две основные модели: логонормальную и «лого-гаммофункциональную». Несмотря на отсутствие качественных отличий, разница в форме распределений, полученных на различной аппаратуре, может являться закономерным следствием значительных расхождений в пиковой мощности и/или ширине диаграммы направленности антенны (табл. 1). В этом случае они могут нести важную количественную информацию о микроструктуре и динамических процессах в рассеивающем объеме.

Окончательное формулирование физически ясной модели, безусловно, требует специально поставленных экспериментов для получения более массового материала в режимах разных мощностей, угловых размеров основного лепестка диаграммы направленности антенны, длительности импульса (величины рабочего объема с различными соотношениями продольного и поперечного масштаба). Тем не менее в ожидании такого материала предварительный анализ на основе уже имеющихся данных представляет определенный интерес.

Таблица 2  
Table 2

Аппроксимация плотности огибающей на входе и выходе детектора  
Approximation of the envelope density at the input and output of the detector

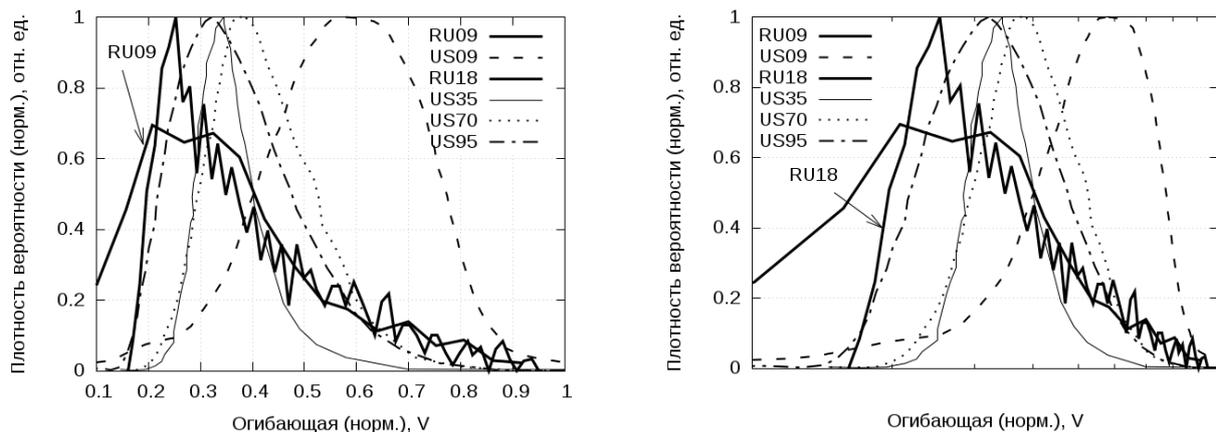
|       | 1                              | 2  | 3  |
|-------|--------------------------------|--|--|
| Вход  | $\frac{Ke^{-\ln(\ln r)^2}}{r}$ | $\frac{Ke^{\ln(\ln r)^m}}{r(\ln r)^\beta}$ | $\frac{r}{D} e^{-\frac{r^2}{2D}}$                    |
| Выход | $Ke^{(\ln x)^2}$               | $K(\ln x)^m e^{-\beta \ln x}$              | $\frac{e^{-\left(\frac{e^{2x}}{2D} - 2x\right)}}{D}$ |

Соотношения, приведенные в табл. 2, указывают, что в модели Керра – Райса на миллиметровых длинах волн классическую рэлеевскую плотность вероятности имеют флуктуации логарифма огибающей. То есть характер расширения экспериментальных зависимостей по сравнению с рэлеевским распределением – экспоненциальный. Это иллюстрирует рис. 2, а, на котором приведен полулогарифмический вид логонормального распределения (стр. 1 табл. 2) и график рэлеевского распределения огибающей в линейном масштабе.

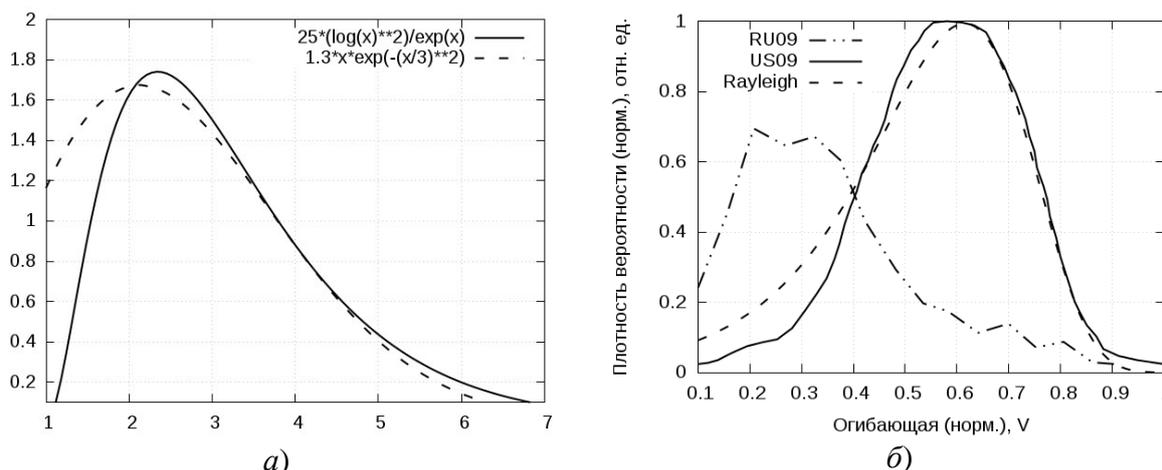
Обращает на себя внимание различная степень расширения распределения по сравнению с классическим, рэлеевским, наблюдаемая при различных мощностях излучения, на различных длинах волн и в различных по размеру и эксцентриситету объемах.

Показательно, что «трехсантиметровые данные», полученные в малых объемах при малых мощностях, имеют почти рэлеевское распределение, а в больших объемах и при больших мощностях – явно ему не соответствуют (см. RU09 и US09 на рис. 1, рис. 2, б).

Но что за процесс в зондируемом объеме может обеспечить такой эффект? Ответ на этот вопрос потребовал изучения целого ряда известных, но редко рассматриваемых в литературе факторов. Среди них следует отметить: особенности распределения капель по размерам, наличие быстро движущихся сверхкрупных капель, пространственную кластеризацию капель, смену рассеивателей, нестабильность мощности радиолокационного импульса.



**Рис. 1.** Экспериментальные первые распределения флуктуаций огибающей в линейном и полулогарифмическом масштабе (для читаемости, график RU09 изображен с отклонениями от принятого способа нормирования модового максимума и дисперсии на единицу)  
**Fig. 1.** The experimental first distributions of the envelope fluctuations on the linear and the semi-logarithmic scale (for readability, RU09 graph is depicted with deviations from the accepted method of normalizing the mode maximum and dispersion per unit)



**Рис. 2.** Сопоставление экспериментальных и теоретических распределений:

*a* – аппроксимация логнормального распределения по данным, полученным в малых рассеивающих объемах на миллиметровых длинах волн (флуктуации логарифма огибающей сигнала на входе логарифмического детектора, который приводит на его выходе к логнормальному распределению (сплошная линия), имеют рэлеевский характер (штриховая линия));

*b* – рэлеевская аппроксимация (штриховая линия) экспериментального распределения, полученного на сантиметровых длинах волн в «малых» объемах (сплошная линия) и аналогичное экспериментальное распределение, полученное на тех же длинах волн в «большом» объеме (штрих-пунктирная линия)

**Fig. 2.** Comparison of experimental and theoretical distributions

*a* – the approximation of the lognormal distribution on data obtained in small scattering volumes on millimeter wavelengths (the fluctuations of the logarithm of the signal envelope at the input of the logarithmic detector, which leads to its lognormal distribution (solid line) at its exit, are of Rayleigh character (dashed line));

*b* – Rayleigh approximation (dashed line) of the experimental distribution obtained at centimeter wavelengths in "small" volumes (solid line) and a similar experimental distribution obtained at the same wavelengths in a "large" volume (dash-dotted line)

Однако по условиям проведения радиолокационных измерений, которые подразумевают практически неподвижные рассеиватели на времени одного импульса и незначительное их смещение в промежутках между импульсами, все известные процессы, определяющие неравномерность распределения рассеивающих частиц и их распределения по размерам, мало подходят для объяснения наблюдаемого эффекта.

В частности, при достаточно высокой средней скорости среды 10 м/с среднее смещение частиц между импульсами, следующими с интервалом 250 мкс, составляет 2,5 мм. Это совсем незначительно превышает средний размер рассеивателя. Среднюю скорость гравитационного падения следует принять вполтину меньше указанной величины. За 1000 импульсов смещение составит порядка 2,5 м (или 1,5 м для гравитационного падения капли с диаметром порядка 1,2 мм, что можно принять за средний размер для интенсивных осадков). Такие величины смещения уже сравнимы с радиусом корреляции флуктуаций концентрации частиц (который можно допустить на основе имеющихся в литературе представлений о возможных причинах подобной кластеризации) и сравнимы с поперечным масштабом «малых» зондируемых объемов (табл. 1).

Таким образом, допуская возможность существования флуктуаций с корреляцией концентрации порядка метра и меньше, при накоплении больших статистик можно ожидать на характерных периодах времени измерения эффективной смены кластеров и/или частиц в рассеивающем объеме, при зондировании в малых объемах поперек направления сильного ветра и/или в интенсивных осадках.

Настоящая статья не позволяет детально остановиться на анализе влияния на первое распределение всех возможных факторов и их комбинаций. Отметим лишь, что с этой целью – на основе классических принципов моделирования рассеянного поля на разреженных частицах – авторами была разработана достаточно развитая численная модель, позволяющая учитывать различные особенности пространственного распределения и движения рассеивающих частиц [2, 3]. Она позволила качественно оценить принципиальную возможность формирования характерных эффектов в первом распределении и, главное, оценить их стабильность в отношении измерения условий моделирования. С использованием указанной модели не удалось установить какого-либо изолированного эффекта или совокупности эффектов, которые могли бы определять значительные расширения первых распределений, характеризующиеся высокой стабильностью и изменяющиеся заданным образом при изменении размеров импульсного объема или частоты зондирования. Ожидаемое снижение эффекта от кластеризации с ростом размеров импульсного объема противоречит приведенным выше данным измерений на трех сантиметрах (рис. 2, б). К тому же проблемы возникают с объяснением стабильности порождаемых кластеризацией отклонений от рэлеевской статистики.

Устойчивые и широкие нерэлеевские распределения возможны при наличии небольших кластеров с достаточно высокой концентрацией. Такие кластеры окажутся достаточно стабильны, так как средняя интенсивность турбулентных пульсаций в атмосфере не превышает 3–4 % от средней скорости среды. Неравномерность смещений отдельных малых частиц в пространстве по отношению к вышеприведенному среднему смещению имеет тот же порядок. С учетом же инерции крупных частиц можно утверждать, что диффузионное размытие пространственной структуры будет сказываться на значительно больших периодах времени, чем интервал между импульсами. Наличие подобных стабильных образований не могло бы остаться незамеченным, например, в пассивном зондировании или трассовых экспериментах с короткими трассами. Ожидаемая меньшая выраженность кластерных эффектов для миллиметровых длин волн зондирования не подтверждается экспериментом.

В целом, следует отметить совершенно недостаточные сведения о кластеризации частиц в жидкокапельных осадках. Классические исследования в этом направлении традиционно ориентировались на чисто геофизические задачи, такие как оценка усредненных распределений, исследование доверительных интервалов перехода от оценок контактных выборок к оценкам генеральной совокупности [4, 5]. Однако появление в девяностые годы прошлого века оптических дидрометров открыло возможности для исследования микроструктуры с высоким разрешением во времени [6]. Такой экспериментальный материал в настоящее время находится в процессе массового накопления, в том числе с непосредственным сравнением контактных и радиолокационных данных [7, 8]. Поэтому вопрос о влиянии кластеризации частиц на стати-

стику регистрируемых сигналов в различных по размеру импульсных объемах и на различных длинах волн зондирующего излучения нельзя считать решенным. В этом смысле следует отметить работы [9, 10], которые содержат не только предварительное обобщение экспериментальных результатов, но также описание возможных подходов к физически ясному объяснению наблюдаемых эффектов.

Однако основываясь на результатах моделирования, и в частности сложностях с получением стабильных эффектов значительной интенсивности, авторы склоняются к необходимости поиска иного, ранее не рассматривавшегося процесса, стабильность которого удовлетворяла бы экспериментальным данным, а интенсивность нарастала бы при увеличении величины зондируемого объема и уменьшении длины волны зондирующего излучения.

## ВЫВОДЫ

В статье проведен анализ многоволновых экспериментальных данных обратного рассеяния в дождях. Показано, что плотность вероятности огибающей радиоэхо может заметно отклоняться от рэлеевской формы в миллиметровом диапазоне длин волн зондирующего излучения и в сантиметровом диапазоне при условии зондирования с большими импульсными объемами.

На основе результатов численного моделирования процессов формирования обратного рассеяния на частицах разреженных сред, учитывающей ряд тонких эффектов, способы аналитического описания которых не сложились окончательно, предполагается, что ни один из них не может формировать характерные первые распределения найденные экспериментально.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распространение ультракоротких радиоволн: пер. с англ. / под ред. Б.А. Шиллерова. М.: Сов. радио, 1954. 710 с.
2. **Коломиец С.Ф.** Рассеяния простого одиночного радиоимпульса на частицах разреженных рассеивающих сред. Научный Вестник МГТУ ГА. Серия «Радиофизика и электроника». 2015. № 222. С. 21–29.
3. **Gorelik A.G., Kolomiets S.F.,** Rayleigh's Principle of Power Addition (From the Point of View of Stochastic Point and Pulse Processes). Proceedings of 15-th International Radar Symposium (IRS), 2014.
4. **Bringi V.N., Chandrasekar V., Hubbert J., Gorgucci E., Randeu W.L., Schoenhuber M.** Raindrop Size Distribution in Different Climatic Regimes from Disdrometer and Dual-Polarized Radar Analysis. J. Atm. Sci. 2002, Vol. 60, no. 2, pp. 354–365.
5. **Tapiador F.J., Navarro A., Moreno R. et al.** On the Optimal Measuring Area for Pointwise Rainfall Estimation: A Dedicated Experiment with 14 Laser Disdrometers. Journal of Hydrometeorology, 2017, Vol. 18, no. 3, pp. 753–760.
6. **Kruger A., Krajewski W.F.** Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description. J. Atmos. Oce. Tech., 2017, Vol. 19, pp. 602–617.
7. **Janapati J., Kumar B., Reddy M.V., Reddy K.K., Lin P., Rao T.N., Liu C.** A study on raindrop size distribution variability in before and after landfall precipitations of tropical cyclones observed over southern India. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2017, Vol. 159, pp. 23–40. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682616302747> (дата обращения 1.09.2017).
8. **Kim D., Lee D.** Raindrop size distribution properties associated with vertical air motion in the stratiform region of a springtime rain event from 1290 MHz wind profiler, micro rain radar and Parsivel disdrometer measurements. Meteorological Applications, 2016, Vol. 23, no. 1, pp. 40–49.
9. **Tokay A., Bashor P.G.** An Experimental Study of Small-Scale Variability of Raindrop Size Distribution. J. App. Meteorol. and Clim., 2010, Vol. 49, no. 7, pp. 2348–2365.

10. Стерлядкин В.В. Пространственная селекция и группировка дождевых капель по размерам при ветровых порывах // Изв. РАН. Физика атм. и океана. 2015. Т. 51, № 6.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Горелик Андрей Габриэлович**, профессор, доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института.

**Денисенков Дмитрий Анатольевич**, преподаватель кафедры технологий и средств геофизического обеспечения войск ВКА им. А.Ф. Можайского.

**Коломиец Сергей Федорович**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Московского физико-технического института.

## ENVELOPE FLUCTUATIONS DISTRIBUTION OF SIMPLE RADAR PULSE BACKSCATTERING IN RARIFIED MEDIUM

Dmitriy A. Denisenkov<sup>1</sup>, Andrey G. Gorelik<sup>2</sup>, Sergey F. Kolomiets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>VKA named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

### ABSTRACT

The basis of modern radar techniques is the direct use of radio-physical data on the power of backscattering. At the same time, the data volume received from the radar allows us to form new estimates and essentially specify classical ones. Significant steps have been made in this direction, using, for example, phase (Doppler) methods. The "modified Rayleigh model" used in radar meteorology to form a scattered field on rarefied medium particles is called the Kerr-Rice model. The main advantage of the Rayleigh model is its simplicity. But it itself contains a deep contradiction, consisting in its logical completion. Based on the statistics study of the first distribution in the rains of varying intensity the authors on a large statistical material have determined the fact of their not Rayleigh form and extreme stability of the latter in relation to natural changes of precipitation intensity. The first distribution is different from the theoretically expected one in the Kerr-Rice model, which makes it possible to use linear-logarithmic detection. It is concluded that the width and the mean of the spectrum of the same signal have the expected dynamics with respect to changes in precipitation intensity and dynamic processes in them. Tables with experimental data are presented. Two main distribution models are considered: lognormal and "logo-gamma-functional". It is concluded that, despite the absence of qualitative differences, the difference in the form of the distributions obtained with different equipment can be a natural consequence of significant discrepancies in the peak power and / or the width of the antenna pattern. The graphs of the first experimental distributions of envelope fluctuations on a linear and semi-logarithmic scale are presented.

**Key words:** radar, pulsed mode, rarified medium, Kerr-Rice model, radar meteorology.

### REFERENCES

1. *Rasprostranenie ultrakortkix radiovoln* [Propagation of ultrashort radio waves]. Trans. from English. Ed. by B.A. Shillerov. Moscow, Soviet radio, 1954, 710 p. (in Russian).

2. **Kolomiets S.F.** *Rasseyaniya prostogo odinochnogo radioimpulsa na chasticax razrezhennyx rasseivayushhix sred* [Scattering of a simple single radio impulse on particles sparse scattering media]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii Seriya "Radiophysika i elektronika* [Scientific Bulletin of the MSTUCA, Series "Radiophysics and Electronics"], 2015, Vol. 222, pp. 21–29 (in Russian).

3. **Gorelik A.G., Kolomiets S.F.** Rayleigh's Principle of Power Addition (From the Point of View of Stochastic Point and Pulse Processes). Proceedings of 15-th International Radar Symposium (IRS), 2014.

4. **Bringi V.N., Chandrasekar V., Hubbert J., Gorgucci E., Randeu W.L., Schoenhuber M.** Raindrop Size Distribution in Different Climatic Regimes from Disdrometer and Dual-Polarized Radar Analysis. *J. Atm. Sci.*, 2002, Vol. 60, no. 2, pp. 354–365.

5. **Tapiador F.J., Navarro A., Moreno R. et al.** On the Optimal Measuring Area for Pointwise Rainfall Estimation: A Dedicated Experiment with 14 Laser Disdrometers. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, Vol. 18, no. 3, pp. 753–760.

6. **Kruger A., Krajewski W.F.** Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description. *J. Atmos. Océ. Tech.*, 2002, Vol. 19, pp. 602–617.

7. **Janapati J., Kumar B., Reddy M.V., Reddy K.K., Lin P., Rao T.N., Liu C.**, A study on raindrop size distribution variability in before and after landfall precipitations of tropical cyclones observed over southern India. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, Vol. 159, pp. 23–40. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682616302747> (accessed: 1.09.2017).

8. **Kim D., Lee D.** Raindrop size distribution properties associated with vertical air motion in the stratiform region of a springtime rain event from 1290 MHz wind profiler, micro rain radar and Parsivel disdrometer measurements. *Meteorological Applications*, 2016, Vol. 23, no. 1, pp. 40–49.

9. **Tokay A., Bashor P.G.** An Experimental Study of Small-Scale Variability of Raindrop Size Distribution. *J. App. Meteorol. and Clim.*, 2010, Vol. 49, no. 7, pp. 2348–2365.

10. **Sterlyadkin V.V.** *Prostranstvennaya selekciya i gruppirovka dozhdevyx kapel po razmeram pri vetrovyx poryvax* [Spatial selection and grouping of rain drops by dimensions in case of wind gusts]. *Izv. RAS. Physics of atmosphere and the ocean*, 2015, Vol. 51, no. 6. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dmitriy A. Denisenkov**, Teacher of the Technologies and Means of Troops Geophysical Support Chair, Mozhaisky Military-Space Academy.

**Andrey G. Gorelik**, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology.

**Sergey F. Kolomiets**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Associate of the Moscow Institute of Physics and Technology.

Поступила в редакцию 15.09.2017  
Принята в печать 23.11.2017

Received 15.09.2017  
Accepted for publication 23.11.2017