

**А. Б. Веселовская, Г. И. Хлопов**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [veselovskaya3@ukr.net](mailto:veselovskaya3@ukr.net)

## ИНДИКАТРИСА РАССЕЙЕНИЯ СНЕЖНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Радиолокационные методы исследования облаков и осадков являются одними из наиболее эффективных методов дистанционного зондирования атмосферы. Преимущества радиолокационных методов в том, что они позволяют оперативно измерять характеристики осадков на больших площадях. В условиях турбулентной среды частицы могут находиться под различными углами по отношению к падающему полю, поэтому в работе сделана попытка исследования индикатрисы рассеяния снежных кристаллов (зависимости эффективной площади рассеяния (ЭПР) от угла падения электромагнитной волны), что позволило оценить пределы изменчивости ЭПР частиц снега при вариациях угла возвышения антенны радара. Для численного моделирования рассеивающих свойств снежных частиц использовались частицы двух типов под различными углами наблюдения, при этом в работе рассматриваются два азимутальных угла падения электромагнитного поля в широком частотном диапазоне. Ил. 6. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** кристалл снега, индикатриса рассеяния.

Погодные и климатические аномалии последних лет в форме катастрофических наводнений, вызванных осадками экстремальной интенсивности, приводят к необходимости их мониторинга с помощью средств дистанционного зондирования.

В общем случае в атмосфере присутствуют гидрометеоры разных типов, включая снежинки, кристаллы льда, капли дождя, а также их сочетания. Преимущества радиолокационных методов [1] состоят в том, что они позволяют оперативно измерять характеристики осадков на больших площадях [2]. В случае осадков в виде снега измерение их параметров традиционно основано на эмпирическом соотношении между отражаемостью  $Z$  ( $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ) и интенсивностью  $I$  ( $\text{мм}/\text{ч}$ )  $Z = AI^B$ , где  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты, значения которых зависят от параметров микроструктуры снегопадов, распределения снежинок по размерам, их формы, плотности и агрегатного состояния (сухие, тающие), поэтому приведенное соотношение сильно зависит от конкретных условий.

За последние годы сделано много попыток теоретически определить значения коэффициентов  $A$  и  $B$ , используя, в частности, распределения частиц по размерам [3–7], а также экспериментально [8–9]. При этом полученные значения коэффициентов  $A$  и  $B$  могут находиться в пределах 200...2 000 и 1,6...2,0 соответственно.

Однако неопределенность в выборе параметров  $A$  и  $B$  приводит к тому, что точное измерение интегральных характеристик снегопадов без учета их микроструктуры становится невозможным, в связи с чем значительный интерес представляет расчет характеристик рассеяния снежных частиц строгими методами.

В работах авторов ранее была сделана попытка строгого расчета эффективной площади рассеяния (ЭПР) снежных частиц в виде шести-

гранников различной формы, включая правильный шестигранник, а также шестигранники со сглаженными углами и вогнутыми гранями (рис. 1).

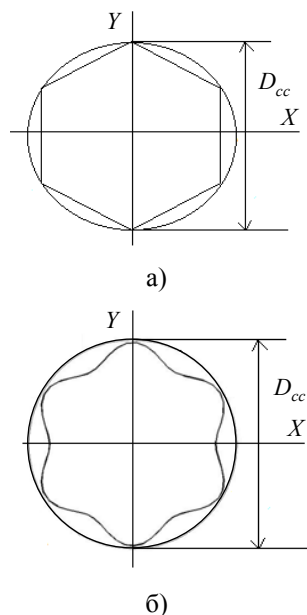


Рис. 1. Формы снежной частицы: правильный шестигранник (а), шестигранник со сглаженными углами и вогнутыми гранями (б)

Выбор частиц в форме шестигранника обусловлен тем, что подобные частицы наиболее широко представлены среди снежных частиц, так как из всего многообразия структур гексагональная (шестигранная) форма является базовой, когда шесть молекул воды (тетраэдров) объединяются в кольцо.

При этом радиус описанной окружности для деформированного шестигранника обычно не превышает  $r_{cc} = D_{cc}/2 \leq 3$  мм, в то время как более крупные частицы подвержены разрушению. Также необходимо отметить, что при таянии снежинок в первую очередь происходит сглаживание

острых углов, что оказывает заметное влияние на их рассеивающие свойства. Поэтому нами рассмотрены два типа частиц (рис. 1), которые в значительной мере определяют характеристики рассеяния.

В работе [10] приведено эмпирическое соотношение  $h = \gamma D_{cc}^\Omega$ , связывающее толщину шестигранника  $h$  и диаметр описанной окружности  $D_{cc}$  (рис. 1, а), где параметры  $\gamma$  и  $\Omega$  измерены экспериментально и соответствуют значениям  $\gamma = 0,014$  и  $\Omega = 0,474$ .

В условиях турбулентной среды частицы могут находиться под различными углами  $\theta$  по отношению к падающему электромагнитному полю (рис. 2, а). Наиболее интересны случаи падения электромагнитных волн на грань рассматриваемого шестигранника и на его острый угол (рис. 2, б).

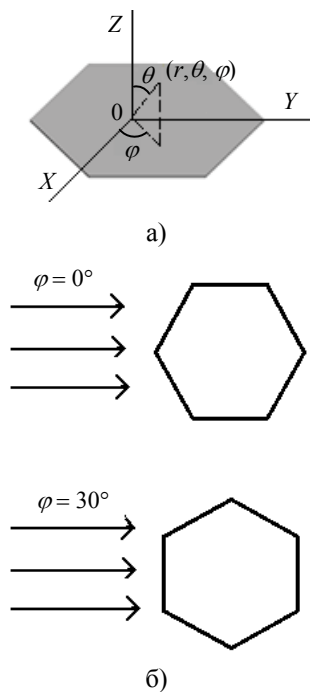


Рис. 2. Снежные частицы в форме правильного шестигранника: а) геометрия структуры; б) примеры падения электромагнитных волн на шестигранник

Эта работа посвящена исследованию индикатрисы рассеяния снежных частиц (зависимости ЭПР от угла падения электромагнитной волны  $\sigma = \sigma(\theta)$ ), что позволяет оценить пределы изменчивости ЭПР частиц снега при вариациях угла возвышения антенны радара. Как показывают поляризационные радиолокационные измерения [11], одиночные снежинки ориентируются преимущественно горизонтально со стандартным отклонением около  $9^\circ$  в отсутствие сильного бокового ветра.

В расчетах использовался метод моментов, на основе которого созданы различные программные продукты, в частности FEKO [12], что позволило осуществить численное моделирование рассеяния электромагнитных волн на снежных частицах.

Для численного моделирования рассеивающих свойств использовались снежные частицы двух типов, под различными углами наблюдения  $\theta$  (рис. 2, а). При этом в работе рассматриваются два азимутальных угла падения электромагнитного поля в плоскости частицы ( $\varphi = 0^\circ, 30^\circ$ ; рис. 2, б).

На рис. 3 приведены индикатрисы рассеяния правильного шестигранника, у которого диаметр описанной окружности равен  $D_{cc} = 2$  мм (рис. 3, а и г),  $D_{cc} = 4$  мм (рис. 3, б и д),  $D_{cc} = 6$  мм (рис. 3, в и е), причем рис. 3, а–в соответствуют горизонтальной поляризации, а рис. 3, г–е – вертикальной. Данные рассчитаны для диапазонов длин волн  $\lambda = 0,8; 3,2; 5,5$  и  $10,0$  см (кривые 1–4 соответственно). Сплошные кривые построены для случая падения электромагнитных волн со стороны грани ( $\varphi = 30^\circ$  – рис. 2, б), а пунктирные – со стороны угла шестигранника ( $\varphi = 0^\circ$ ).

Следует отметить, что в приведенных данных отсутствует преимущественная поляризация в смысле постоянного превышения ЭПР для какой-либо ориентации электрического вектора, так как значения ЭПР на горизонтальной поляризации (рис. 3, а–в) сопоставимы с соответствующими значениями на вертикальной поляризации (рис. 3, г–е) практически для всех выбранных диапазонов длин волн. Кроме того, ЭПР практически не зависит от азимутального угла падения (рис. 2, б) электромагнитной волны для  $\varphi = 30^\circ$  (пунктир) и  $\varphi = 0^\circ$  (сплошные кривые).

В процессе моделирования была выявлена слабая зависимость индикатрисы рассеяния от угла падения  $\theta$ , когда значения ЭПР при нормальном падении ( $\theta = 0^\circ$ ) и параллельно плоскости  $XOY$  частицы ( $\theta = 90^\circ$ ) практически одинаковы, особенно для вертикальной поляризации (рис. 3, г–е) и в длинноволновом диапазоне ( $\lambda = 3 \dots 10$  см). Для выяснения этого обстоятельства были рассчитаны аналогичные зависимости диэлектрического и металлического дисков (рис. 4) для горизонтальной поляризации падающего поля. Кривые 1–3 соответствуют  $D_{cc} = 2$  мм; кривые 4–6 соответствуют  $D_{cc} = 4$  мм; кривые 7–9 соответствуют  $D_{cc} = 6$  мм (сплошные кривые соответствуют  $\lambda = 3,2$  см, пунктирные –  $\lambda = 5,5$  см, штрихпунктирные –  $\lambda = 10$  см).

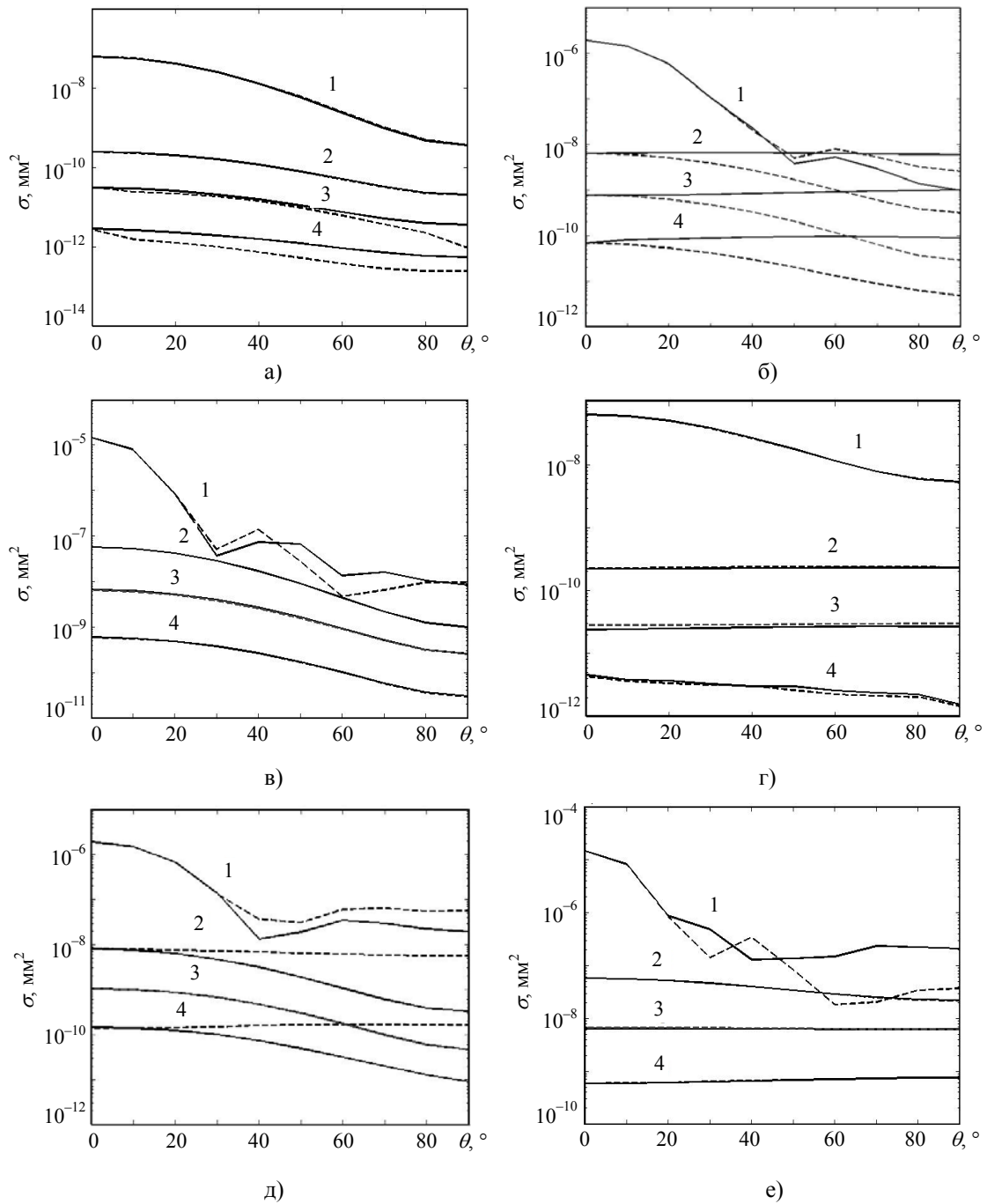


Рис. 3. Графики зависимости ЭПР правильного шестигранника от угла падения электромагнитного поля для горизонтальной (а–в) и вертикальной (г–е) поляризации

Исследовав характер поведения двух типов поляризации падающего поля, можно отметить, что ЭПР диэлектрического и металлического дисков для горизонтальной поляризации на один-два порядка отличаются от результатов, полученных на вертикальной поляризации падающего поля. Причем при рассеянии на металлическом диске (рис. 4, а) наблюдается зависимость ЭПР от угла падения, так как рассеяние по нормали к диску ( $\theta = 0^\circ$ ) существенно больше,

чем в плоскости диска  $\theta = 90^\circ$ , что, впрочем, совершенно естественно, потому что геометрическая площадь рассеивателя в этом случае значительно больше.

Однако для диэлектрического диска (рис. 4, б) указанная зависимость нарушается при  $\lambda = 5,5$  см (для  $D_{cc} = 4$  мм), что может объясняться возбуждением резонансного рассеяния по периметру диска. В этом случае индикатриса рас-

сеяния диска подобна рассеянию рамки тока [13], которая формирует диаграмму направленности в виде «восьмерки» с максимумом, ортогональную плоскости рамки (рис. 4, в).

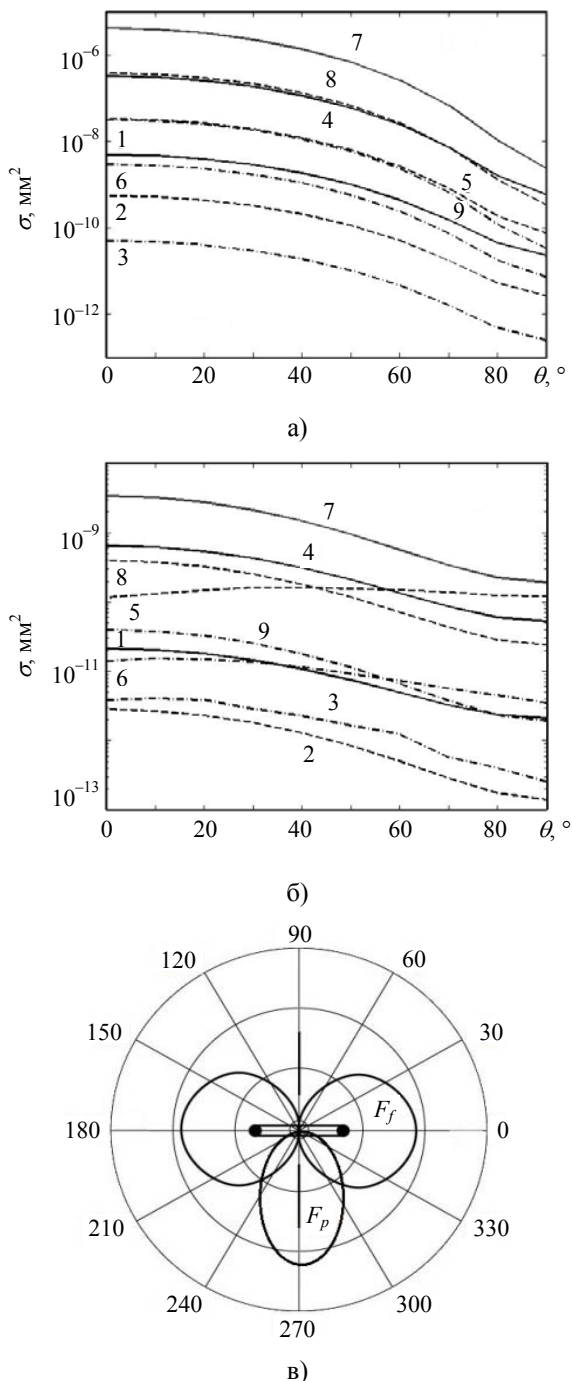


Рис. 4. Графики зависимости ЭПР металлического (а) и диэлектрического (б) дисков от угла падения для горизонтальной поляризации электромагнитного поля; диаграмма направленности рамочной антенны (в)

Поэтому можно предположить, что интенсивности излучения в плоскости рамки  $F_f$  и перпендикулярно плоскости  $F_p$  становятся соиз-

меримыми, объясняя слабую зависимость суммарного рассеянного поля от угла падения  $\theta$  (рис. 4, в). По-видимому, аналогичный механизм рассеяния также имеет место и в случае правильного шестигранника (рис. 3), хотя численные параметры геометрии рассеивающего объекта, естественно, отличаются.

На рис. 5 приведен вид индикатрисы рассеяния шестигранника со сглаженными углами и вогнутыми гранями, у которого параметр деформации  $\delta = 0,05$ . Этот параметр входит в полиномиальное представление Чебышева четного порядка [14]  $r(\theta) = r_0 [1 + \delta T_n(\cos \theta)]$ ,  $|\delta| < 1$ , где  $r_0$  – радиус описанной окружности правильного шестигранника;  $\delta$  – параметр деформации, описывающий сглаживание углов правильного шестигранника с одновременным формированием провала по центру грани (рис. 1, б) за счет подтаивания снежинки, приводящего к уменьшению радиуса описанной окружности  $r_{sm}$  на величину  $\Delta r = r_0 - r_{sm} = r_0 \delta$ ;  $T_n(\cos \theta) = \cos n\theta$  – полином Чебышева степени  $n$ .

Диаметры описанной окружности шестигранника составляют  $D_{cc} = 2$  мм (рис. 5, а и г),  $D_{cc} = 4$  мм (рис. 5, б и д),  $D_{cc} = 6$  мм (рис. 5, в и е), причем рис. 5, а–в соответствуют горизонтальной поляризации падающего поля, а рис. 5, г–е – вертикальной поляризации. Данные рассчитаны для диапазонов длин волн  $\lambda = 0,8; 3,2; 5,5$  и  $10,0$  см (кривые 1–4 соответственно), причем сплошные кривые построены для случая падения поля со стороны грани ( $\varphi = 30^\circ$  – рис. 2, б), а пунктирные – со стороны угла шестигранника ( $\varphi = 0^\circ$ ).

Прежде всего необходимо отметить, что ЭПР шестигранника со сглаженными углами и вогнутыми гранями существенно меньше, чем ЭПР правильного шестигранника за счет уменьшения «вклада» острых углов. Это увеличивает зависимость механизма рассеяния снежинок от погодных условий, в частности, от температуры.

Также результаты моделирования говорят об отсутствии преимущественной поляризации для произвольной поляризации электрического вектора падающего поля, так как значения ЭПР для ортогональных поляризаций практически одинаковы в исследованных диапазонах длин волн.

Аналогичная ситуация сохраняется и для соотношения ЭПР частицы для падения поля со стороны грани ( $\varphi = 30^\circ$ , сплошные кривые) и со стороны угла ( $\varphi = 0^\circ$ , пунктирные).

Остается в силе слабая зависимость индикатрисы рассеяния от угла падения, особенно для вертикальной поляризации (рис. 5, г–е) и в

длинноволновых диапазонах  $\lambda = 3,2 \dots 10$  см. Судя по всему, механизм этого явления остается без

изменений, как и в случае правильного шестигранника (рис. 3, г–е).

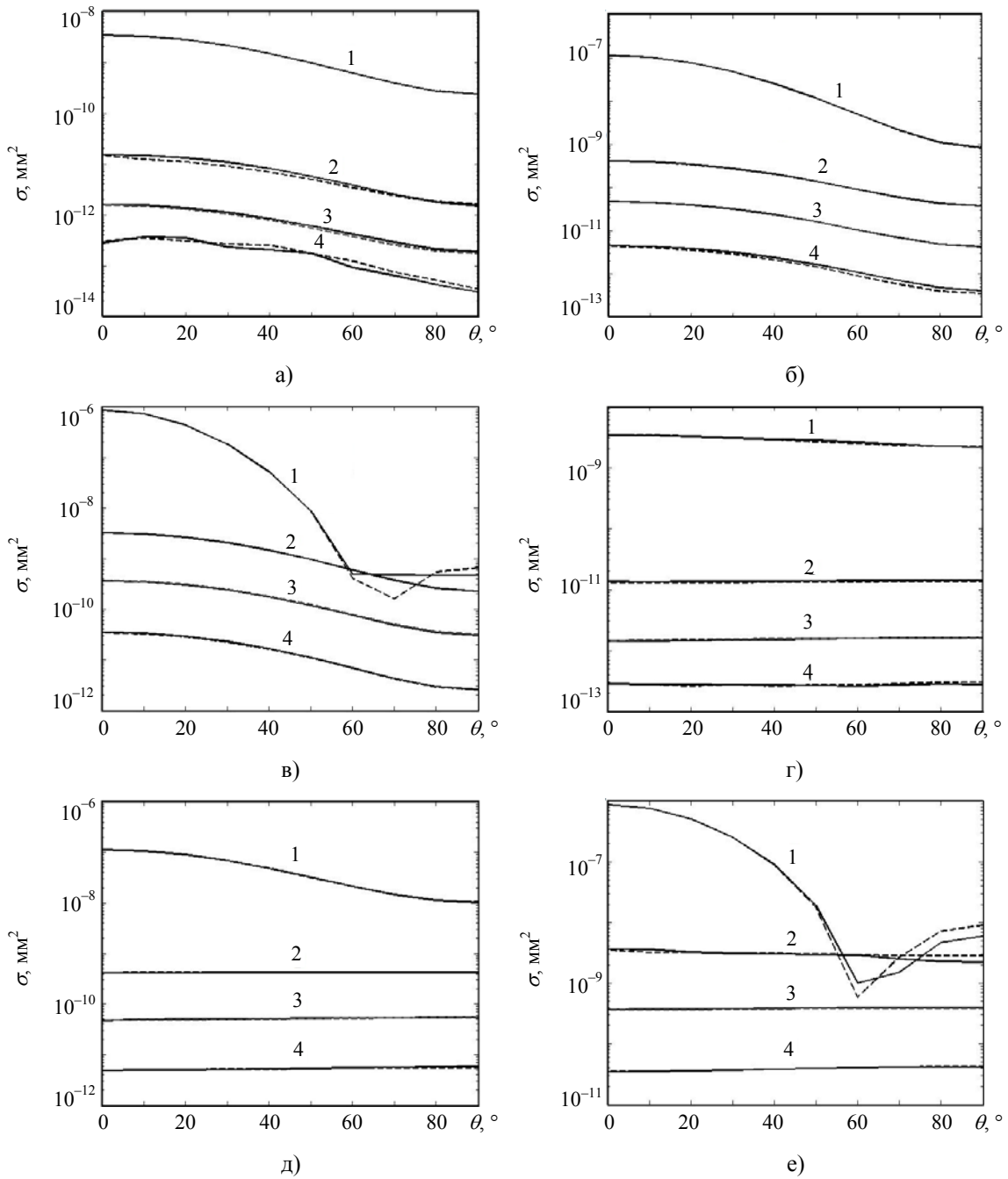


Рис. 5. Графики зависимости ЭПР шестигранника со сглаженными углами и вогнутыми гранями от угла падения электромагнитного поля  $\delta = 0,05$  для горизонтальной (а–в) и вертикальной (г–е) поляризации

На рис. 6 приведен вид индикатрисы рассеяния шестигранника со сглаженными углами и вогнутыми гранями, у которого параметр деформации существенно больше  $\delta = 0,1$ , чем в рассмотренном выше случае. Обозначения те же, что и на рис. 5.

Тем не менее, несмотря на довольно значительную деформацию снежинок, их рассеивающие свойства мало изменились, что подчеркивает важность наличия острых граней в рассеивающем объекте при формировании отраженного поля. Причем основные свойства ЭПР, рассмот-

ренные выше для слабо сглаженного шестигранника (рис. 4), остаются практически неизменными.

Таким образом, основной эффект, связанный со сглаживанием граней правильного

шестигранника, проявляется в существенном уменьшении ЭПР, в то время как поляризационные свойства и вид угловой зависимости ЭПР практически остаются без изменений.

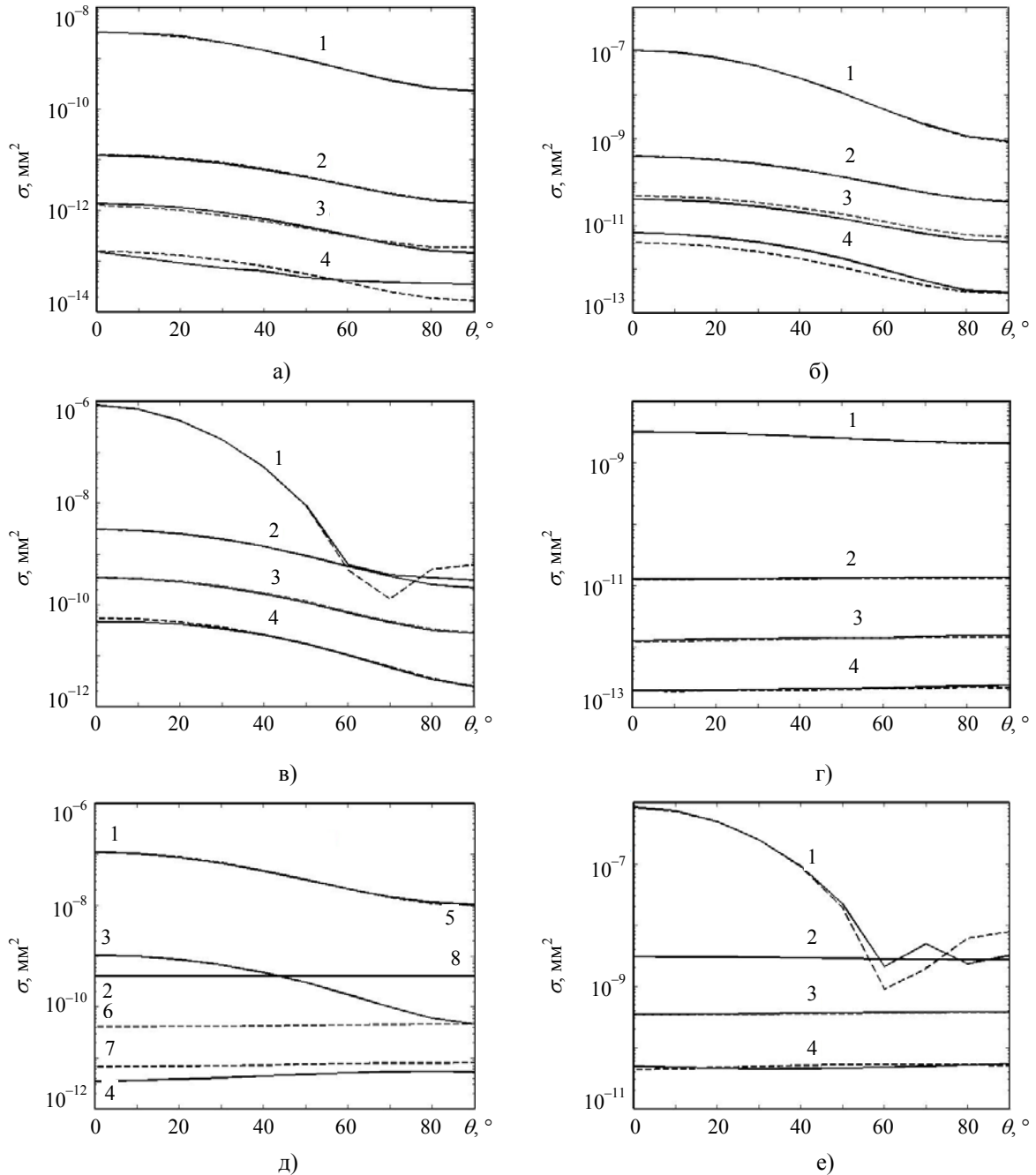


Рис. 6. Графики зависимости ЭПР шестигранника со сглаженными углами и вогнутыми гранями от угла падения электромагнитного поля  $\delta=0,1$  для горизонтальной (а–в) и вертикальной (г–е) поляризации

**Выводы.** В статье приведен анализ индикатрисы рассеяния снежных кристаллов при вариациях угла возвышения антенны радиолокатора. Показано, что индикатриса рассеяния правильного шестигранника и шестигранников со

сглаженными углами практически не зависит от ориентации поляризации падающего поля. При этом ЭПР правильного шестигранника и шестигранников со сглаженными углами практически не зависит от азимутального угла падения электро-

магнитной волны. В то же время индикатриса рассеяния слабо зависит от угла падения, особенно для вертикальной поляризации и в длинноволновом диапазоне, что связано с резонансным возбуждением токов вдоль периметра частицы. Также ЭПР шестигранника со сглаженными углами и вогнутыми гранями существенно меньше, чем ЭПР правильного шестигранника за счет уменьшения «вклада» острых углов, что увеличивает зависимость механизма рассеяния снежинок от погодных условий, в частности, от температуры.

#### Библиографический список

1. *Радиолокационные измерения осадков* / А. М. Боровиков, В. В. Костарев, И. П. Мазин, А. А. Черников. – М: Гидрометеоздат, 1967. – 140 с.
2. *Atlas D. Radar in Meteorology* / D. Atlas. – 1<sup>st</sup> edition. – Boston: American Meteorological Society, 1990. – 785 p.
3. *Gunn K. L. S. The distribution with size of aggregate snowflakes* / K. L. S. Gunn, J. S. Marshall // *J. Meteorol.* – 1958. – 15, N 10. – P. 452–461.
4. *Sekhon R. S. Snow size spectra and radar reflectivity* / R. S. Sekhon, R. C. Srivastava // *J. Atmos. Sci.* – 1970. – 27, N 3. – P. 299–307.
5. *Passarelli R. E. Theoretical explanation for Z-R relationships in snow* / R. E. Passarelli // 18<sup>th</sup> Conf. Radar Meteor. – Boston: American Meteorological Society, 1978. – P. 332–335.
6. *Ohtake T. Radar reflectivity of aggregated snowflakes* / T. Ohtake, T. Henmi // 14<sup>th</sup> Conf. Radar Meteor. – Boston: American Meteorological Society, 1970. – P. 209–210.
7. *Веселовская А. Б. Дистанционное зондирование снегопадов. Обзор* / А. Б. Веселовская // *Радиофизика и электрон.* – 2015. – 6(20), № 3. – С. 38–48.
8. *Determination of a Z-R relationship for snowfall using a radar and high sensitivity snow gauges* // Y. Fujiyoshi, T. Endoh, T. Yamada et al. // *J. Appl. Meteorol.* – 1990. – 29, N 2. – P. 147–152.
9. *Boucher R. J. Radar determination of snowfall rate and accumulation* / R. J. Boucher, J. G. Wiener // *J. Climate Appl. Meteorol.* – 1985. – 24, N 1. – P. 68–73.
10. *Pruppacher H. R. Microphysics of Clouds and Precipitation* / H. R. Pruppacher, J. D. Klett. – 2<sup>nd</sup> edition. – Kluwer Academic Publ., 1997. – 954 p.
11. *Sasyo Y. The collection efficiency of simulated snow particles for water droplets (II)-on the oscillatory angular motion of the snowflake* / Y. Sasyo // *Meteorol. and Geophys.* – 1977. – 28. – P. 159–168.
12. *Harrington R. F. Field Computation by Moment Methods* / R. F. Harrington. – Piscataway: Wiley-IEEE Press, 1993. – 240 p.

13. *Антенны. Ч. 1* / Н. П. Габеля, А. Д. Истрашкин, Ю. К. Муравьев, В. П. Серков; под ред. Ю. К. Муравьева. – Л.: Воен. Краснознам. акад. связи, 1963. – 630 с.
14. *Mishchenko M. I. Capabilities and limitations of a current Fortran implementation of the T-matrix method for randomly oriented, rotationally symmetric scatterers* / M. I. Mishchenko, L. D. Travis // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* – 1998. – 60, N 3. – P. 309–324.

Рукопись поступила 22.03.2016.

G. Veselovska, G. Khlopov

#### SCATTERING INDICATRIX OF SNOW CRYSTALS

Radar methods of investigation of clouds and precipitation are the most effective methods of remote sensing of the atmosphere. The advantages of radar techniques are the abilities to measure quickly the characteristics of precipitation over large areas. In the context of the turbulent medium the particles may be at a different angle relatively to the incident field, so in the paper there was an attempt to study the scattering indicatrix of snow crystals (dependence of the radar cross-section (RCS) on the incidence angle of the electromagnetic wave), which allowed to evaluate the variability of the RCS of snow crystals at the variations of the elevation angle of the radar antenna. For the numerical simulation of the scattering properties of the snow crystals we used two types of particles at various angles of observation, at that in the paper we consider two azimuthal angles of incidence of electromagnetic field in a wide frequency range.

**Key words:** snow crystal, scattering indicatrix.

Г. Б. Веселовська, Г. І. Хлопов

#### ІНДИКАТРИСА РОЗСІЯННЯ КРИСТАЛІВ СНІГУ

Радіолокаційні методи дослідження хмар і опадів є одними з найбільш ефективних методів дистанційного зондування атмосфери. Переваги радіолокаційних методів у тому, що вони дозволяють оперативно вимірювати характеристики опадів на великих площах. За умов турбулентного середовища частинки можуть знаходитися під різними кутами відносно до падаючого поля, тому в роботі зроблено спробу дослідження індикатрисі розсіяння кристалів снігу (залежності ефективної площі розсіяння (ЕПР) від кута падіння електромагнітної хвилі), що дозволило оцінити межі мінливості ЕПР частинок снігу при варіаціях кута піднесення антени радара. Для числового моделювання розсіювальних властивостей частинок снігу використовувалися частинки двох типів під різними кутами спостереження, при цьому в роботі розглядалися два азимутальних кути падіння електромагнітного поля в широкому частотному діапазоні.

**Ключові слова:** кристал снігу, індикатриса розсіяння.