

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.26>

УДК: 535.36, 621.396.11

## ВЛИЯНИЕ КЛАСТЕРОВ НА РАССЕЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СУХОМ СНЕГЕ

В.А. Голунов

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал  
141190, Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2023 г.

**Аннотация.** В данной работе выполнено исследование частотной зависимости коэффициента рассеяния микроволнового теплового излучения в свежеснегавшем, мелкозернистом и крупнозернистом сухом снеге. На частотах 22.2, 37.5, 60 и 94 ГГц в лабораторных условиях выполнены измерения полных коэффициентов отражения и пропускания от толщины слоя снега. Коэффициенты поглощения и рассеяния снега восстанавливались посредством аппроксимации экспериментальных данных базовыми функциями двухпоточковой теории Кубелки-Мунка. Экспериментальные результаты показали, что показатель частотной зависимости коэффициента рассеяния сильно зависит от интервала рассматриваемых частот. Выполнены расчеты коэффициентов рассеяния снежоподобной среды на основе теории Ми при учете возрастания комплексной диэлектрической проницаемости среды и уменьшения корреляционного размера частиц при ее уплотнении. Сравнение экспериментальных данных для свежеснегавшего и мелкозернистого снега с результатами расчетов на основе теории Ми показало, что на интервале частот 22.2...37.5 ГГц показатель степени частотной зависимости коэффициента рассеяния аномально низкое, а на частоте 94 ГГц излучение рассеивается в соответствии с уравнением Релея. Используя уравнение Релея, установлено, что

аномальное рассеяние на частотах 22.2...37.5 ГГц обусловлено кластерами с масштабами, которые могут превышать размеры рассеивателей на частоте 94 ГГц в свежеснежавшем снеге более чем в 3 раза, а в мелкозернистом снеге – более чем в 2 раза. При уплотнении снега влияние кластеров ослабляется.

**Ключевые слова:** тепловое излучение, сухой снег, микроволны, рассеяние, теория Ми, кластеры.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

**Автор для переписки:** Голунов Валерий Алексеевич [golsnow@mail.ru](mailto:golsnow@mail.ru)

## Введение

Излучательные и рассеивающие свойства сухого снежного покрова в диапазоне микроволновых волн широко исследуются в течение последних десятилетий в связи с развитием методов дистанционного зондирования земной поверхности из космоса. Одной из основных целей исследований является разработка алгоритмов дистанционного восстановления водного эквивалента и толщины снежного покрова.

Для разработки алгоритмов требуется информация о частотных зависимостях таких величин, как коэффициенты поглощения, обратного рассеяния и ослабления излучения в зависимости от структуры снежного покрова.

Снежный покров, относится к плотным случайным дискретным средам с липкими частицами. В таких средах интенсивность рассеяния зависит от объемной плотности частиц нелинейно, что обусловлено изменяющейся при уплотнении коррелированностью местоположения рассеивателей [1]. Установлено, что плотно упакованные липкие частицы обнаруживают частотную зависимость коэффициента рассеяния слабее, чем у независимого рассеяния [1].

Другим основным фактором, определяющим интенсивность рассеяния в сухом снеге, является характерный размер частиц льда. Именно характерный

размер и объемная плотность частиц льда определяют, главным образом, частотные характеристики теплового излучения снега в микроволновом диапазоне [1].

Еще одним фактором, способным влиять на частотные характеристики излучения снега, являются кластеры частиц. Достаточно длительное время существование кластеров в снеге прогнозировалось только теоретически [1]. В отличие от таких сред, как атмосферные аэрозоли и снегопады, в которых кластеры в виде отдельных аэрозолей и снежинок образуют разреженную среду, кластеры в зернистом снеге обнаружить визуально крайне сложно. Объективный контроль структуры снега в виде измерения коэффициента отражения в ближнем ИК-диапазоне позволяет лишь оценить эквивалентный диаметр ледяных частиц в снеге [2, 3].

По-видимому, пока единственной возможностью обнаружения кластеров в снеге является экспериментальное исследование частотной зависимости интенсивности обратного рассеяния методом многочастотного радиометрического зондирования. Данная работа является развитием исследований влияния кластеров на частотные зависимости коэффициентов рассеяния в снеге, начатых в предыдущих работах автора [4-6].

Цель работы – выявить основные закономерности формирования кластеров в снеге и их влияния на интенсивность его теплового излучения на основе экспериментального исследования на частотах в полосе 22...94 ГГц.

## 1. Аппаратура и методика измерений

Измерения выполнены в период зимних сезонов 2016 – 2019 г.г на частотах 22.2, 37.5, 60 и 94 ГГц с использованием радиометрического стенда и методики, описанных в [7]. В стенде использовалась искусственная «холодная» подсветка исследуемых образцов, что позволило измерять характеристики ослабления и излучения снега в лабораторных условиях. Для каждой исследованной структуры снега измерялись полные коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $t$ .

Образцы самосформировавшихся структур снега аккуратно изымались из выбранного слоя снежного покрова, укладывались друг на друга в стопу до достижения требуемой толщины. Основания изъятых образцов были больше оснований металлических цилиндрических контейнеров для снега, которые использовались при измерениях. Контейнеры заполнялись снегом путем “ввинчивания” цилиндров в толщу сформированной стопы. Лишний снег затем удалялся, а в основания цилиндров вставлялись пенопластовые пластины толщиной 0.005 м. Использовался набор цилиндров длиной 0.02...1 м при диаметре 0.2 м. При необходимости увеличения толщины образцов более 1 м цилиндры со снегом состыковывались.

Для стабилизации термодинамической температуры образцов снега в процессе измерений, проводимых в охлажденном помещении, на внешние поверхности измерительных цилиндров было установлено теплоизоляционное покрытие.

При измерениях использовались четыре черных тела с различной температурой: первое находилось в термодинамическом равновесии с лабораторным помещением, второе – с исследуемым снегом, третье и четвертое – с жидким азотом [7]. Одно из черных тел, охлаждаемых жидким азотом, служило источником подсветки при измерениях коэффициента отражения, а другое – при измерениях коэффициентов пропускания.

В данной работе из 53-х исследованных образцов снега представлены образцы с наиболее информативными данными. К сожалению, набор использованных частотных каналов из года в год по различным причинам ограничивался или расширялся.

## **2. Модель излучения снега**

Для восстановления параметров переноса излучения в исследованных образцах снега использована двухпотоковая теория Кубелки-Мунка [8].

В соответствии с теорией Кубелки-Мунка полные коэффициенты отражения  $R_{KM}$  и пропускания  $t_{KM}$ , как функции толщины слоя  $h$ , определяются следующими соотношениями:

$$R_{KM}(h) = \frac{R_0 [1 - \exp(-2\alpha_{KM} h)]}{1 - R_0^2 \exp(-2\alpha_{KM} h)}, \quad (1)$$

$$t_{KM}(h) = \frac{(1 - R_0^2) \exp(-\alpha_{KM} h)}{1 - R_0^2 \exp(-2\alpha_{KM} h)}, \quad (2)$$

где

$$R_0 = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\frac{K^2}{S^2} + 2\frac{K}{S}} \quad (3)$$

– полный коэффициент отражения полубесконечного слоя,  $\alpha_{KM} = \sqrt{K(K+2S)}$ ,  $K$  и  $S$  – коэффициенты ослабления, поглощения и обратного рассеяния диффузной интенсивности соответственно. Из (1)-(3) следует, что зависимости  $R_{KM}(h)$  и  $t_{KM}(h)$  полностью описываются двумя параметрами:  $K$  и  $S$ . Далее анализируются частотные зависимости только коэффициента рассеяния  $S(f)$ , полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных соотношениями (1) и (2).

Исследование частотной зависимости коэффициента рассеяния будет основано на следующем определении показателя степени  $\eta$  частотной зависимости на различных интервалах частот  $(f_1, f_2)$ :

$$\frac{S(f_1)}{S(f_2)} = \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^\eta,$$

$$\eta = \log \frac{S(f_1)}{S(f_2)} / \log \frac{f_1}{f_2}. \quad (4)$$

### 3. Экспериментальные результаты

#### 3.1 Свежевыпавший снег

На рис. 1 в качестве примера базовых экспериментальных данных показаны графики экспериментальных и аппроксимированных зависимостей коэффициентов пропускания  $t$  и отражения  $R$  от толщины слоя свежевыпавшего и пятисуточного метелевого снега на частотах 22.2...94 ГГц. Экспериментальные данные отражают изменения характеристик излучения снега через 5 дней после его выпадения. Разброс экспериментальных данных связан не только и не столько с ошибками измерений, сколько с неоднородностями структуры снега в исследованных образцах.

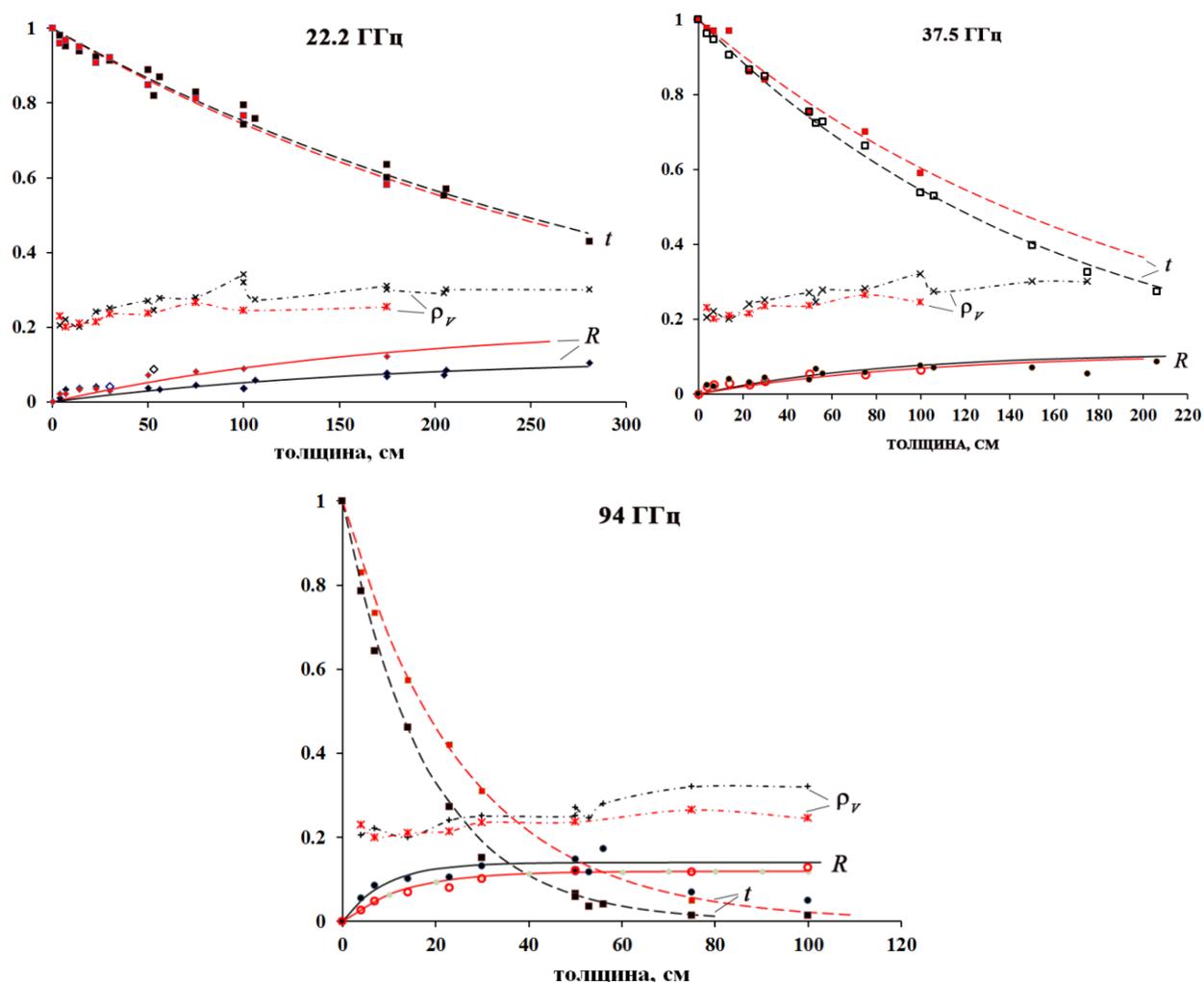


Рис. 1. Экспериментальные (символы) и аппроксимационные зависимости коэффициентов пропускания  $t$  и отражения  $R$  от толщины слоя свежевыпавшего (красный цвет) и пятисуточного (черный цвет) метелевого снега при объемной плотности  $\rho_v$  на частотах 22.2, 37.5 и 94 ГГц.

При заполнении измерительного контейнера плотность свежевыпавшего снега увеличивалась под воздействием собственного веса. В связи с этим объемная плотность исследованных образцов свежевыпавшего снега была выше, чем у исходного полевого снега.

Для четырех образцов свежевыпавшего снега, значения объемной плотности которых приведены в Таблице 1, на рис. 2 показаны графики зависимости показателя частотной зависимости  $\eta$  коэффициента рассеяния  $S$  от интервалов частот внутри диапазона 22.2...94 ГГц, а на рис. 3 – графики  $R_0(f)$ .

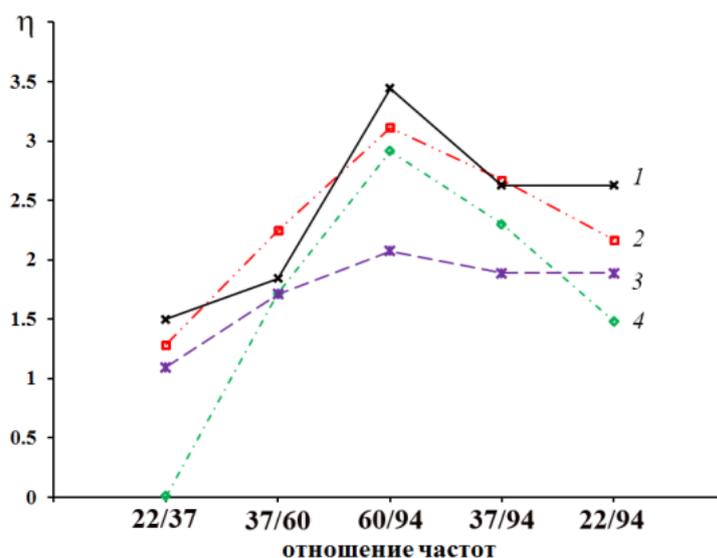


Рис. 2. Частотный показатель степени на различных интервалах частот для коэффициента обратного рассеяния  $S$  образцов свежевыпавшего снега.

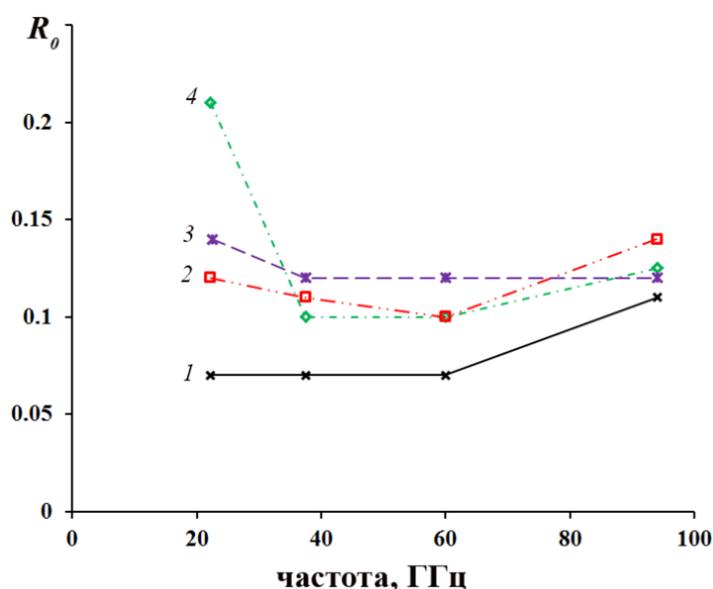


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициентов отражения образцов свежевыпавшего снега.

Таблица 1. Объемная плотность образцов свежеснежавшего снега.

номер образца на рис. 3	1	2	3	4
$\rho$	0.26	0.27	0.21	0.25

Образцы снега под номерами 1 и 3 отличались только тем, что снег в образце 3 имел структуру с минимальными нарушениями при изъятии из покрова, а в образце 1 эта структура была разрушена перемешиванием тонким прутиком. В результате объемная плотность снега увеличилась на 0.05 (см. Таблицу 1). Из сравнения графиков 1, 3 на рис. 2 следует, что в результате нарушения структуры и ее уплотнения показатель  $\eta$  возрос на всех частотах, особенно на интервале частот 60...94 ГГц. При этом, как видно из рис. 3, коэффициент отражения уменьшился, особенно, на частотах ниже 94 ГГц.

Образцы снега 2, 4 тоже взаимосвязаны. Исходные экспериментальные данные для этих образцов показаны выше на рис. 1. Образец 4 представлял собой метелевый снег, а образец 2 – тот же снег, но по прошествии 5-ти суток. Температура воздуха в этот период была чуть ниже 0°C, но на 5-ый день она понизилась до -13°C. В результате снег незначительно уплотнился, и, возможно, вследствие метаморфизма изменилась структура снега. В итоге, как следует из сравнения графиков 2 и 4 на рис. 3, рассеяние на частоте 22.2 ГГц существенно ослабло, в то время как на частоте 94 ГГц возросло. Это привело к возрастанию коэффициента  $\eta$  на всех интервалах частот (графики 2 и 4 на рис. 2), но, особенно, на интервале 22.2...37.5 ГГц, за счет ослабления аномально сильного рассеяния на частоте 22.2 ГГц.

Таким образом, из вышеизложенного анализа следует, что, во-первых, наименьшие значения показателя частотной зависимости  $\eta$  наблюдаются на интервале частот 22.2...37.5 ГГц, а максимальные – на интервале 60...94 ГГц, во-вторых, незначительное уплотнение снега приводит к усилению (т.е. к увеличению  $\eta$ ) частотной зависимости коэффициента рассеяния. Другие экспериментальные результаты показали, что если свежеснежавший снег уплотнить до значений  $\rho_V = 0.5...0.6$ , то эффекты объемного рассеяния практически полностью исчезают.

### 3.2 Мелкозернистый снег

Структура мелкозернистого снега формируется в результате метаморфизма свежеснегавшего снега и во многом определяется метеоусловиями, при которых осуществляется метаморфизм. Как правило, сначала тают ветви снежинок и в центре снежинок образуется ядро, при этом сохраняется сцепление с соседними снежинками с помощью своих лучей. В последующем происходит формирование конгломератов, состоящих из нескольких (как правило, трех) подтаявших снежинок с остатками лучей, которые затем превращаются в мелкие зерна размером менее 1 мм.

На рис. 4 показаны графики зависимости показателя частотной зависимости  $\eta$  коэффициента рассеяния  $S$  от интервалов частот внутри диапазона 22.2...94 ГГц для 5-ти образцов снега, исследованных в течение одного сезона в период с 15 февраля до 5 апреля 1918 г. В этот период практически отсутствовали сильные и затяжные оттепели, суточный ход температуры составлял интервал (-1°C...-10°C).

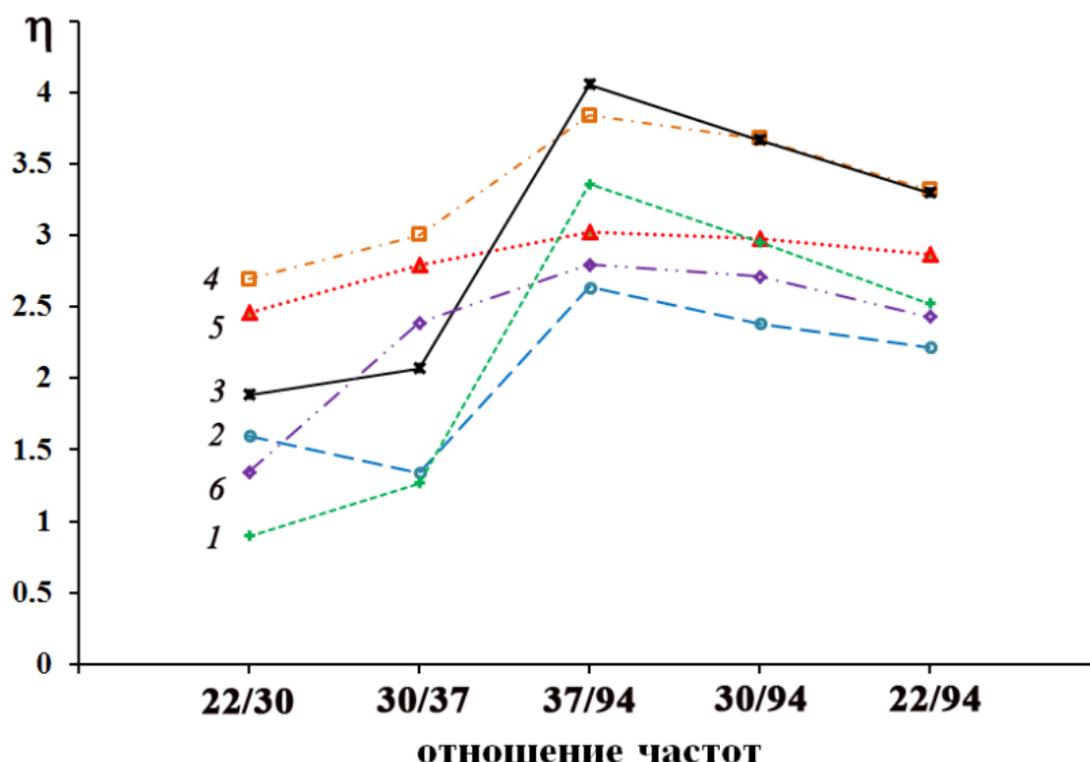


Рис. 4. Частотный показатель степени на различных интервалах частот для коэффициента обратного рассеяния  $S$  образцов мелкозернистого снега.

Вследствие этого структура снега изменялась медленно и настолько слабо, что в течение марта и к 5 апреля оставалась мелкозернистой. На рис. 5 образец под номером 1 исследовался 15.02.18 г., 2 – 01.03.18 г., 3 – 07.03.18 г., 4 – 29.03.18 г., 5 – 05.04.18 г. Исключением являлся образец под номером 6, который представлял собой корку и исследовался 29.03.18 г. Значения объемной плотности образцов приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Объемная плотность образцов мелкозернистого снега

номер образца на рис. 5	1	2	3	4	5	6
$\rho_v$	0.27	0.3	0.3	0.29	0.4	0.36

Из анализа графиков 1...4 на рис. 4 следует, что, во-первых, по мере эволюции структуры мелкозернистого снега показатель частотной зависимости возрастал на всех интервалах частот, при этом в ММ диапазоне вплоть до значения  $\eta = 4$ , которое соответствует релеевскому рассеянию. Как и в случае свежеснегавшего снега, рассмотренного выше, наиболее слабая частотная зависимость наблюдается на интервале низких частот 22.2...37.5 Гц. На рис. 5 показаны графики частотной зависимости коэффициента отражения  $R_0$  рассматриваемых образцов снега. Анализируя графики на рис. 5, видим, что по мере эволюции структуры снега коэффициенты отражения возрастают на всех частотах, но особенно сильно на частоте 94 ГГц.

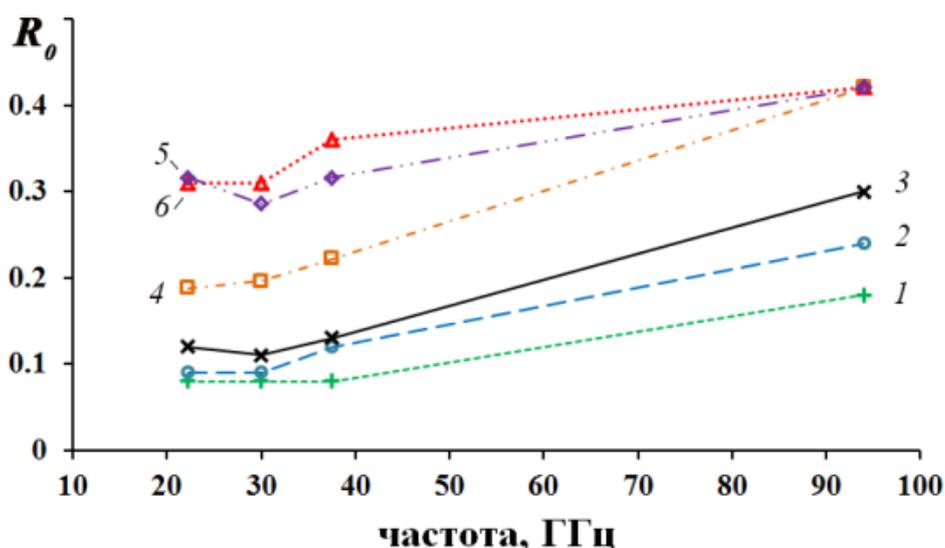


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициентов отражения образцов мелкозернистого снега.

Кроме того, видим, что на низких частотах коэффициенты отражения имеют близкие значения, т.е. слабо зависят от частоты. Поскольку объемная плотность образцов изменяется в узком интервале значений 0.29...0.4, то резонно предположить, что коэффициенты отражения возрастают вслед за ростом размеров частиц льда и их конгломератов.

### 3.3. Средне- и крупнозернистый снег

Размеры частиц средне- и крупнозернистого снега составляют более 1 мм. Здесь рассматриваются результаты исследования 6-ти образцов снега, представленные на рис. 6-8 и в Таблице 3. К сожалению, основные измерения выполнены только в ММ диапазоне волн, и лишь одно измерение выполнено на частотах 22.2, 37.5 и 94 ГГц.

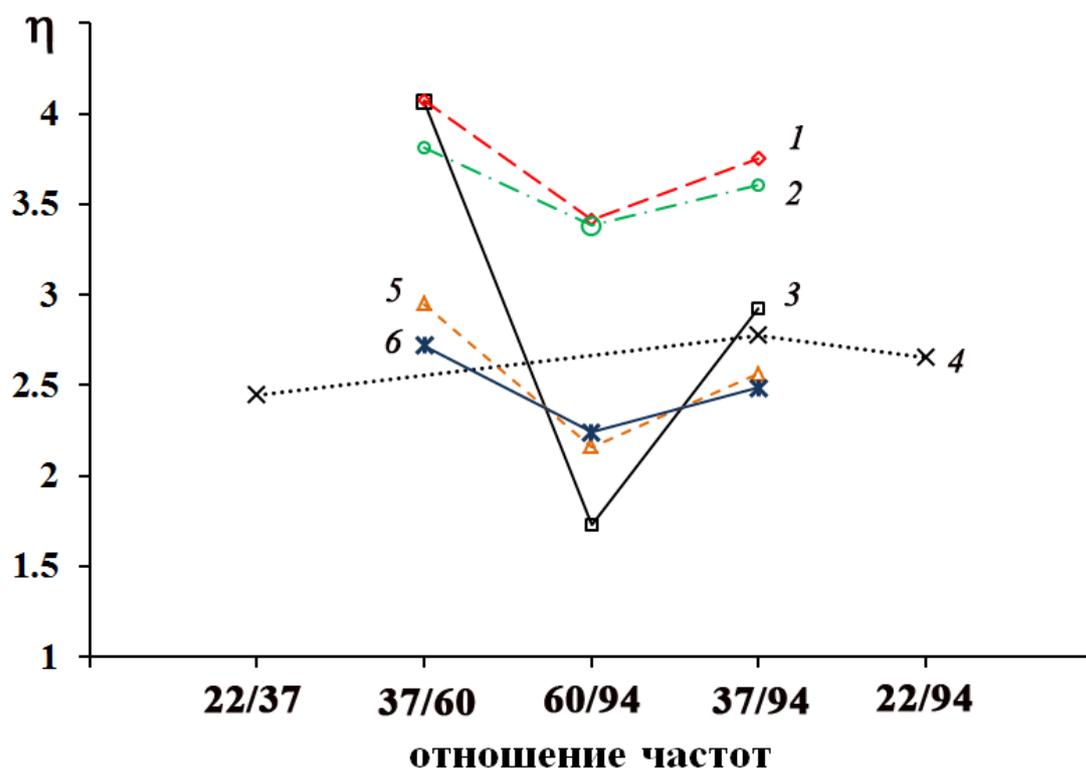


Рис. 6. Частотный показатель степени на различных интервалах частот для коэффициента обратного рассеяния  $S$  средне- и крупнозернистого снега.

Образцы снега с номерами 1, 2 и 3 получены из крупнозернистой корки, сформировавшейся в результате аномальной трехнедельной оттепели. Этот снег протирался сначала на сетке с ячейками 4 мм, затем просеивался на сетке.

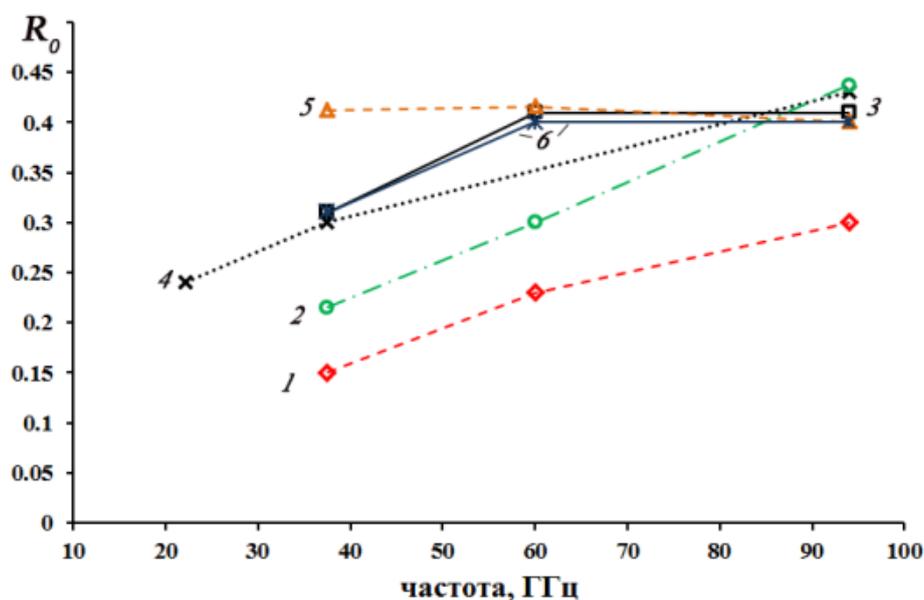


Рис.7. Частотная зависимость коэффициентов отражения образцов средне- и крупнозернистого снега.

Таблица 3. Объемная плотность образцов средне- и крупнозернистого снега.

номер образца на рис. 7	1	2	3	4	5	6
$\rho_V$	0.5	0.46	0.47	0.27	0.33	0.35
$d$ , мм	1	1-2	2-4	1-2	2-4	1

Образцы снега с номерами 1, 2 и 3 получены из крупнозернистой корки, сформировавшейся в результате аномальной трехнедельной оттепели. Этот снег протирался сначала на сетке с ячейками 4 мм, затем просеивался на сетке с ячейками 2 мм. В результате выделялся снег размером меньше 2 мм, который затем просеивался через сетку с ячейками 1 мм.

Из рис. 6 следует, что, в отличие от случаев свежесвыпавшего и мелкозернистого снега, самые низкие значения показателя частотной зависимости  $\eta$  имеют место на интервале частот 60...94 ГГц, а не на интервалах более низких частот. Самое низкое значение  $\eta = 1.73$  наблюдается в случае образца снега 3, объемная плотность которого  $\rho_V = 0.47$ , а размеры частиц составляют 2-4 мм (см. таблицу 3). В то же время образец снега 5 с такими же размерами частиц, но с меньшей плотностью  $\rho_V = 0.33$ , на том же интервале частот имеет большее значение  $\eta = 2.16$ , хотя на других интервалах частот его  $\eta$  меньше, чем у образца 3. Это означает, что в случае крупнозернистого снега

уплотнение снега не приводит к уменьшению  $\eta$  только на высоких частотах. Далее, сравнивая частотные характеристики образцов 1 и 6 с частицами размером 1 мм и образцов 4, 6 с частицами размером 1-2 мм, видим, что их уплотнение приводит к увеличению показателя  $\eta$  на всех рассматриваемых частотах.

Анализируя графики частотной зависимости коэффициентов отражения на рис. 7 и сопоставляя их с графиками частотной зависимости коэффициента рассеяния на рис. 6, видим, что выделяются две группы образцов: с одной стороны образцы 1, 2, с другой стороны, образцы 3 – 5.

Коэффициенты отражения образцов 1, 2 отличаются самым широким диапазоном изменения значений в полосе частот 37.5...94 ГГц при самых высоких значениях  $\eta$ , близких к релеевскому рассеянию. Отметим, что снег в образцах 1, 2 среднезернистый ( $d < 2$  мм) и сильно уплотнен ( $\rho_v = 0.46...0.5$ ).

Ко второй группе относятся образцы с высокой (образец 3) и средней (образцы 4, 5 и 6) плотностями, с размерами частиц до 2 мм (образцы 4, 6) и размерами 2...4 мм (образцы 3, 5). На низких частотах их коэффициенты отражения выше, чем у образцов первой группы, вследствие чего сужается диапазон изменения  $R_0$ . В этой группе выделяются образцы 3 и 6, имеющие почти совпадающие частотные зависимости  $R_0(f)$  (к ним можно отнести также образец 4), но имеющие сильно отличающиеся характеристики  $\eta(f)$  (графики 3 и 6 на рис. 6). Следовательно, частотные характеристики коэффициентов рассеяния и отражения крупнозернистого снега связаны неоднозначно.

Причина неоднозначности заключается в том, что, как следует из (3), коэффициент отражения  $R_0$  определяется не только коэффициентом рассеяния  $S$ , но и коэффициентом поглощения  $K$ . На рис. 8 показаны графики частотных зависимостей коэффициентов  $K$  и  $S$  для рассматриваемых образцов снега. Видим, что образцы 3 и 5 с наибольшими размерами частиц имеют наибольшие значения как коэффициента поглощения, так и коэффициента рассеяния, особенно на частотах 60 и 94 ГГц, на которых при этом они имеют почти наибольшие значения  $R_0$ . Образец 2 с частицами размером 1-2 мм на частоте

94 ГГц имеет даже чуть большее значение  $R_0$ , чем у образцов 3 и 5, но при меньших значениях  $K$  и  $S$  и существенно отличающейся частотной характеристике коэффициента рассеяния.

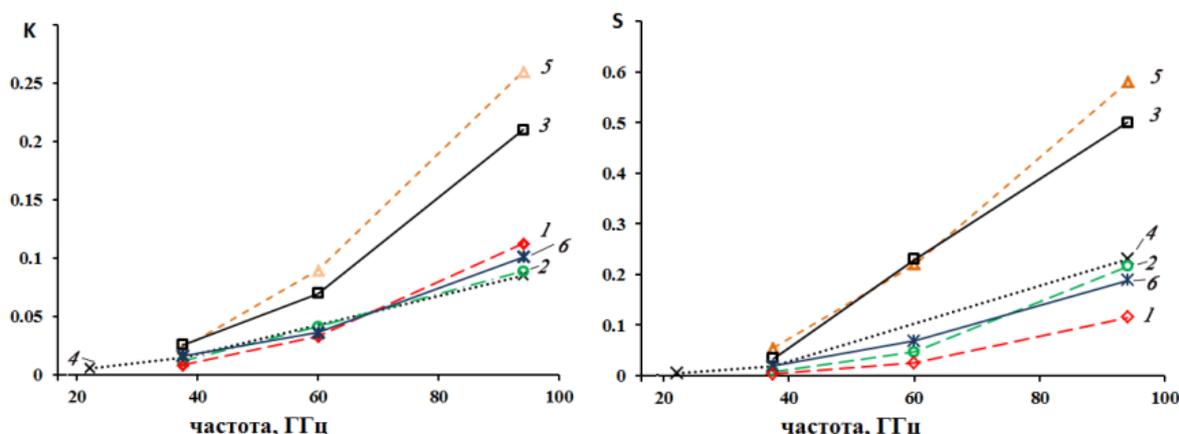


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициентов поглощения  $K$  и  $S$  образцов средне- и крупнозернистого снега.

Аналогичные сопоставления отражательных, рассеивающих и поглощательных характеристик всех других образцов показывают, что частотные характеристики средне- и крупнозернистого снега являются многообразными вследствие многообразия тонкой структуры снега. Такой вывод относится также к свежеснеговому и мелкозернистому снегу.

#### 4. Расчеты поглощения и рассеяния микроволнового излучения в снегоподобной среде на основе теории Ми

Для интерпретации излучательных и рассеивающих свойств сухого снега и снегопадов часто используют теорию Ми, представляя рассеивающие частицы в шарообразном виде. Теория Ми не позволяет в полной мере описать все закономерности теплового излучения снега, поскольку не учитывает эффект многократного рассеяния, а частицы снега липкие, неоднородны как по форме своей поверхности, так и по размерам. Тем не менее, ее применение полезно при интерпретации изменения частотной зависимости интенсивности рассеяния, вызванного увеличением размеров частиц и их уплотнением.

При крайне низких значениях объемной плотности рассеивающих частиц местоположение частиц в пространстве является некоррелированным. В этом

случае при расчетах ослабления пространственно-когерентной интенсивности используется приближение независимого рассеяния, при котором коэффициент экстинкции прямо пропорционален произведению объемной плотности частиц и их полному сечению рассеяния. Однако, при уплотнении среды, с одной стороны, возрастает среднее значение ее показателя преломления  $n_{эфф}$ , вследствие чего уменьшается дисперсия ее флуктуаций, с другой стороны, местоположение частиц упорядочивается, и возникающая при этом коррелированность приводит к уменьшению радиуса корреляции [9], т.е., фактически, к уменьшению размера рассеивателей.

Рассмотрим результаты расчетов поглощения  $k_a$  и рассеяния  $k_s$  микроволнового излучения на основе теории Ми для плотной среды с диэлектрическими свойствами, соответствующими сухому снегу. Расчеты выполнены с помощью калькулятора Mie Scattering Calculator by Scott Prahl [10]. Заметим, что в теории Ми коэффициент рассеяния  $k_s$  определяется как сумма коэффициентов рассеяния в заднюю и переднюю полусферы. Комплексная диэлектрическая проницаемость бинарной смеси воздух-лед рассчитывалась по формуле теории сильных флуктуаций (формуле Оделевского) [11], при этом действительная часть диэлектрической проницаемости льда полагалась равной  $\epsilon'_l = 3.15$ , а значения мнимой части  $\epsilon''_l$  при температуре льда  $-1^\circ\text{C}$  приведены в Таблице 4 [12].

Таблица 4. Мнимая часть диэлектрической проницаемости пресноводного льда при температуре  $-1^\circ\text{C}$ .

$f$ , ГГц	22.2	30	37.5	60	94
$\epsilon''_l$	0.0037	0.0045	0.0055	0.007	0.01

На рис. 9 показаны графики зависимостей коэффициента рассеяния от объемной плотности, рассчитанные в приближениях уплотнения без изменения диэлектрической проницаемости среды и размеров рассеивателей (прямая 1), с возрастающей диэлектрической проницаемостью при постоянном размере рассеивателей  $d$  (кривая 4), и с возрастающей диэлектрической проницаемостью, но при уменьшающемся размере рассеивателей (кривые 2,3) в соответствии с (5).

$$l = d(1 - \rho_V), \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр шаровых частиц льда.

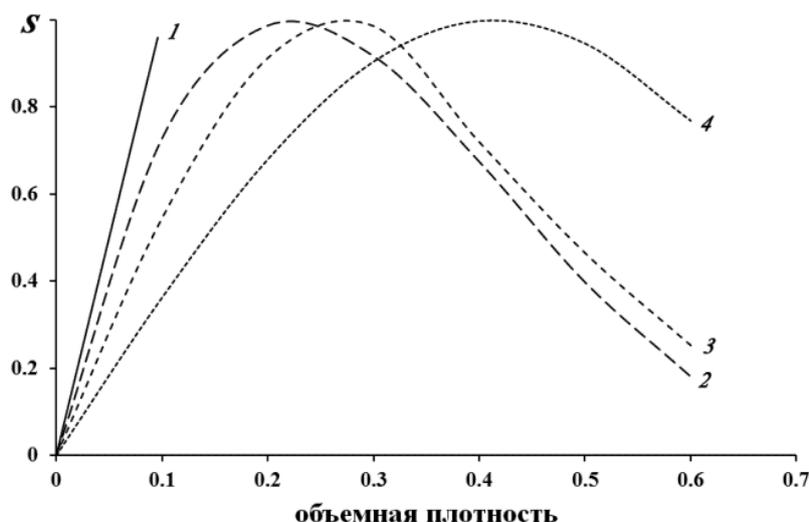


Рис. 9. Графики нормированных зависимостей коэффициента рассеяния шаровых частиц льда от объемной плотности, рассчитанные в приближении независимого рассеяния при следующих значениях эффективного показателя преломления смеси лед-воздух: кривая 1 –  $n_{эфф} = 1$ , 2-4 –  $n_{эфф} = n_{эфф}(\rho_V)$ , 2, 3 – при линейной зависимости размера рассеивателей  $l$  от объемной плотности (2 –  $d < 2$  мм при  $f = 22.2 \dots 100$  ГГц, 3 –  $d = 3$  мм при  $f = 100$  ГГц); 4 –  $d(\rho_V) = constant = 3$  мм.

Из графиков следует, что форма зависимости коэффициента рассеяния существенно определяется исходными условиями для расчета. Особо отметим сильные смещения экстремума функции  $k_s(\rho_V)$  на оси объемной плотности: от 0.2 до 0.4. Для сравнения укажем, что в соответствии с моделью Тверского парно-коррелированных рассеивателей [13], много меньших длины волны, максимум  $k_s(\rho_V)$  достигается при  $\rho_V = 0.15$ , а на рис. 9 (график 2) в этом случае  $\rho_V = 0.2$ . В соответствии с теорией сильных флуктуаций экстремум расположен при  $\rho_V = 0.3$  [14], что практически совпадает с графиком 3 на рис. 9, рассчитанным для частиц с размером  $d = 3$  мм при уменьшении размеров коррелированных рассеивателей в соответствии с (5). График 4 с экстремумом  $k_s(\rho_V)$  при  $\rho_V = 0.4$  не имеет ни теоретического, ни экспериментального подтверждения.

Таким образом, модель среды с возрастающей диэлектрической проницаемостью при уменьшающемся размере рассеивателей в соответствии с

(5) является наиболее оптимальной для расчетов эффектов поглощения и рассеяния в снежоподобной среде.

На рис. 10 показаны графики зависимостей коэффициентов рассеяния и поглощения от параметра  $d/\lambda$ , рассчитанные при  $\lambda = 3$  мм и объемной плотности коррелированных рассеивателей  $\rho_V = 0.1$ . Графики иллюстрируют известный факт, что при увеличении размера частиц на каждой длине волны вышеуказанные коэффициенты достигают некоторого предельного значения, что необходимо учитывать при интерпретации их частотных зависимостей.

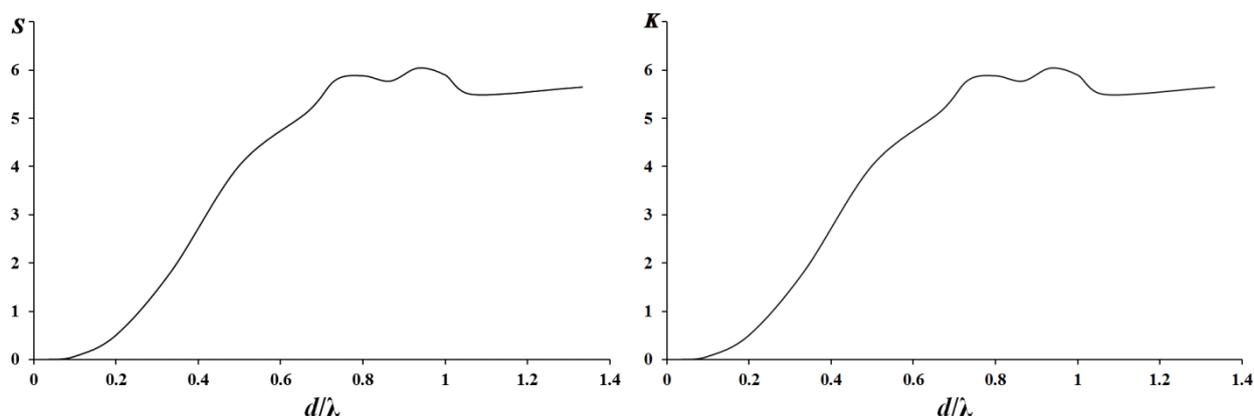


Рис. 10. Графики зависимостей коэффициентов рассеяния  $S$  и поглощения  $K$  от отношения диаметра частиц к длине волны  $\lambda = 3$  мм при  $\rho_V = 0.1$ .

На рис. 11а,б показаны графики зависимостей показателя степени частотной зависимости коэффициента рассеяния от соотношения частот и объемной плотности частиц с размерами  $d = 1$  мм и 3 мм. При размере частиц  $d < 1$  мм показатель частотной зависимости коэффициента рассеяния оказался равным  $\eta = 4$  во всем рассматриваемом частотном диапазоне 22...100 ГГц и при значениях  $\rho_V = 0.1...0.6$ , т.е. имеет место рассеяние Релея. С этим результатом согласуется оценка условия применимости теории сильных флуктуаций (ТСФ): в [14] показано, что ТСФ применима к описанию рассеяния в сухом снеге на длине волны 8 мм только при  $d < 1$  мм. Графики на рис. 11 а,б показывают отклонения от рассеяния Релея и тем сильнее, чем больше размер частиц и меньше объемная плотность. Наиболее слабые отклонения проявляются на интервале частот 22...37.5 ГГц, а наиболее сильные – на интервале частот 60...94 ГГц. Однако, следует учесть, что, как отмечено выше, коэффициенты

рассеяния в теории Ми являются суммой коэффициентов рассеяния в заднюю и переднюю полусферы. При увеличении размера частиц, как известно [1], начинает доминировать рассеяние в переднюю полусферу, что, конечно, увеличивает показатель частотной зависимости  $\eta$ , в то время как рассеяние в переднюю полусферу не оказывает существенного влияния на интенсивность теплового излучения [15].

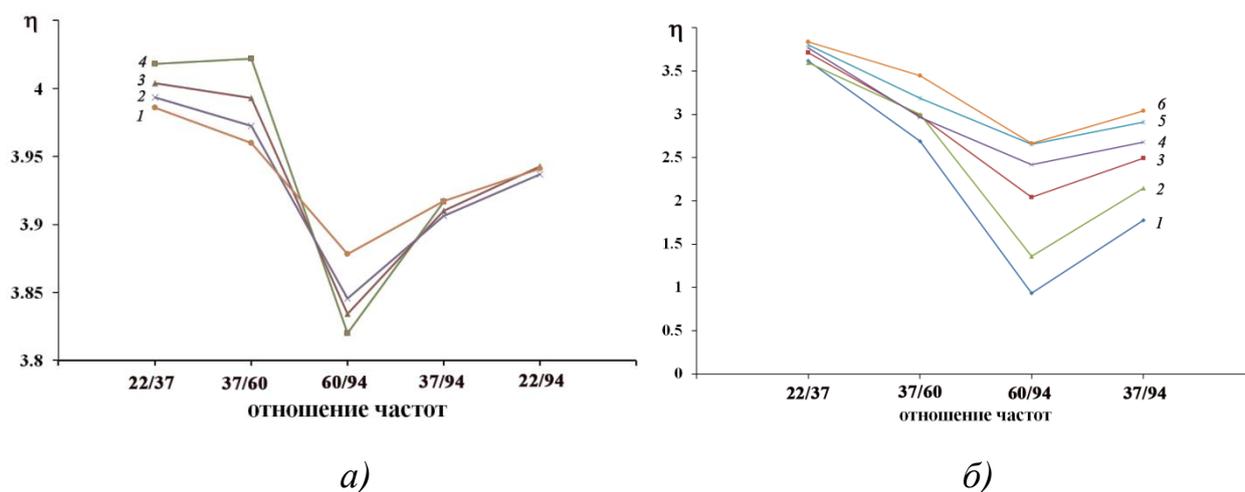


Рис.11. Графики зависимостей показателя частотной зависимости коэффициента рассеяния от соотношения частот и объемной плотности частиц при температуре 272К. Диаметр частиц: а)  $d = 1$  мм, 1 –  $\rho_v = 0.6$ , 2,3,4 –  $\rho_v = 0.4$ ; 0.3 и 0.2 соответственно, б)  $d = 3$  мм, кривые 1,2,3,4,5,6 –  $\rho_v = 0.1$ ; 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 и 0.6 соответственно.

## 5. Оценка относительных размеров кластеров

Сопоставление экспериментальных частотных характеристик рассеяния в снеге с рассчитанными на основе теории Ми показывает существенные расхождения между ними, особенно, на интервале низких частот в случае свежеснеговывающего и мелкозернистого снега, где экспериментальные значения  $\eta$  кажутся явно заниженными.

Действительно, если размеры частиц льда  $d \ll \lambda$ , то сечение рассеяния  $\sigma_s$  определяется уравнением Релея [1]

$$\frac{\sigma_s}{\pi a^2} = \frac{8(ka)^4}{3} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right|^2, \quad (6)$$

где  $a = d/2$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_n$ . Из (6) следует

$$k_s = \sigma_s / V_0 = 2k^4 a^3 \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right|^2. \quad (7)$$

Из соотношения (7) следует известный факт, что коэффициент рассеяния  $k_s \sim f^4$ , и, следовательно,  $\eta = 4$ .

Далее используем соотношение (7) для интерпретации экспериментальных частотных характеристик. Допустим, что на частотах  $f_1$  и  $f_2$  рассеиватели имеют отличающиеся размеры  $a_1$  и  $a_2$  соответственно. Тогда, применяя (7), получим

$$\frac{k_{s1}}{k_{s2}} = \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^3 \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^4,$$

откуда следует

$$\frac{a_1}{a_2} = \sqrt[3]{\frac{k_{s1}}{k_{s2}} \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^4}. \quad (8)$$

Таким образом, формула (8) определяет соотношение размеров рассеивателей по результатам измерений коэффициентов рассеяния на двух частотах при условии применимости уравнения Релея (6). Это условие выполняется в случае свежесвыпавшего и мелкозернистого снега.

Получим оценки относительных размеров рассеивателей в свежесвыпавшем снеге, используя экспериментальные данные и графики на рис. 2. Наибольший интерес вызывает метелевый снег, представленный на рис. 2 графиком 4 и который показывает максимальное изменение  $\eta$  при переходе с интервала частот 22.2...37.5 ГГц ( $\eta = 0$ ) в интервал частот 60...94 ГГц ( $\eta = 2.9$ ). Также для сравнения оценены относительные размеры рассеивателей в уплотненном снеге (график 1 на рис. 2). Полученные оценки представлены в Таблице 5.

Таблица 5. Оценки относительных размеров рассеивателей в свежесыпавшем снеге.

номер графиков на рис. 2		частоты $f_1/f_2$					
		60/94	37/94	22/94	22/60	22/37	37/60
1	$a_1/a_2$	1.09	1.52	2.36	2.17	1.55	1.42
4	$a_1/a_2$	1.18	1.68	3.37	2.87	2.0	1.43

В Таблице 6 представлены аналогичные оценки для образцов 1, 3 и 5 мелкозернистого снега.

Таблица 6. Оценки относительных размеров рассеивателей в мелкозернистом снеге.

номер графиков на рис. 4		частоты $f_1/f_2$					
		37/94	30/94	22/94	22/37	22/30	30/37
1	$a_1/a_2$	1.22	1.49	2.03	1.67	1.36	1.22
3	$a_1/a_2$	1.0	1.13	1.4	1.42	1.23	1.15
5	$a_1/a_2$	1.35	1.48	1.72	1.28	1.17	1.09

Из таблиц 5, 6 следует, что размеры рассеивателей максимально (более чем в 2...3 раза в случае свежесыпавшего снега и в 1,5...2 раза в случае мелкозернистого снега) отличаются на крайних частотах 22.22 и 94 ГГц, а минимально – на частотах 60 и 94 ГГц и 37.5 и 94 ГГц, при этом чем ниже частота, тем больше размер рассеивателей. Это означает, что излучение на каждой частоте рассеивается на своих резонансных элементах структуры снега, например, на отдельных частицах или объемных неоднородностях в виде конгломератов частиц или локальных уплотнений снега. Свойства рассеяния на объемных неоднородностях определяется соотношением длины волны и их размерами: крупномасштабные неоднородности рассеивают преимущественно в переднюю полусферу [16], в то время как интенсивность теплового излучения снега определяется мелкомасштабными, т.е. соизмеримыми с длиной волны, неоднородностями [15], называемыми, как правило, кластерами. Отсюда, в свою очередь, следует, что частицы в кластере должны иметь размеры меньше длины волны.

В бинарной дискретной среде уплотнение частиц в одном месте непременно приводит к разреженности в другом месте, что приводит к формированию среды с флуктуирующей объемной плотностью. Следовательно, в такой среде рассеяние необходимо рассматривать в тесной взаимосвязи уплотненных и разреженных неоднородностей. Поскольку от плотности частиц зависит диэлектрическая проницаемость, то кластеры – это неоднородности с повышенной диэлектрической проницаемостью.

## **6. Модель формирования кластеров в среде с кубической упаковкой шаров**

Частицы льда, из которых формируется структура снега, вследствие своей контактности (или липкости), образуют каркасную систему, которая обеспечивает определенную жесткость структуры. Очевидно, что возникновение кластеров определенным образом связано с особенностями строения снежного каркаса. Для выявления этих особенностей каркаса рассмотрим возможные варианты его перемычек в зависимости от объемной плотности зернистого снега.

В качестве исходной структуры зернистого снега примем простую кубическую упаковку идентичных шаровых частиц, в которой каждый слой состоит из шаров, расположенных в виде квадратной решетки. Поверх каждого слоя горизонтально накладываем следующий слой так, что каждый его шар располагается строго над шаром предыдущего слоя. Нетрудно убедиться, что в этом случае объемная плотность частиц

$$\rho_v = \frac{\pi}{6} = 0.524.$$

Далее будем последовательно удалять по одному шару из каждой ячейки, состоящей из 8-ми соседних шаров. Нетрудно убедиться, что удаление одного шара приводит к уменьшению объемной плотности на  $\pi/48$ . В Таблице 7 приведены результаты расчета зависимости объемной плотности кубической упаковки шаров в зависимости от количества удаленных шаров.

Таблица 7. Объемная плотность кубической упаковки шаров в зависимости от количества удаленных шаров в каждой ячейке.

количество удаленных шаров, шт.	0	1	2	3	4	5	6
объемная плотность	0,524	0,458	0,393	0,327	0,262	0,196	0,131

Как следует из таблицы 7, при  $\rho_v = 0,196$  в каждой группе из 8 шаров остаются 3 шара (заметим, что минимально возможная плотность мелкозернистого снега  $\rho \approx 0,2 \text{ г/см}^3$ ). Очевидно, что минимальная жесткость каркаса в этом случае может обеспечиваться или ажурной сетью из непрерывных цепочек липких одинарных частиц, или, что наиболее вероятно, цепочечными перемычками между группами из 2...3-х слипшихся частиц. Если принять во внимание, что в рассматриваемом случае размеры пустот между частицами значительно превосходят размеры частиц, то элементы такого неоднородного каркаса можно рассматривать как классические кластеры слипшихся частиц. Объемная плотность кластеров в несколько раз меньше средней объемной плотности  $\rho_v$  снега. Это означает, что при  $\rho_v = 0,2$  кластеры образуют достаточно разреженную среду и рассеивают падающее излучение почти независимо друг от друга, т.е. максимальным образом. При этом усилению рассеяния на кластерах способствует также наибольшая разность эффективных значений показателей преломления кластеров и окружающей среды.

При уплотнении среды размеры частиц и пустот между ними выравниваются, вследствие чего кластеры, как независимые группы слипшихся частиц, исчезают. Таким образом, ожидаемо, что влияние кластеров слипшихся частиц на обратное рассеяние электромагнитных волн тем слабее, чем выше плотность снега, что согласуется с рассмотренными выше экспериментальными данными.

Вышеприведенное рассмотрение выполнено для шаров с произвольным диаметром. Это означает, что оно применимо как к мелкозернистому, так и крупнозернистому снегу. Однако, следует иметь в виду, что чем крупнее снег, тем выше значение его минимальной плотности. Следовательно, чем крупнее

снег, тем слабее влияние кластеров, даже если размеры частиц много меньше длины волны.

## 7. Обсуждение

Проблема частотной зависимости ослабления электромагнитных волн в сухом снежном покрове до сих пор актуальна, поскольку пока еще не создана модель снега, оптимальная для решения задачи дистанционного восстановления физических параметров снежного покрова. Эта проблема изучалась теоретически [1] и экспериментально [17-20]. В теоретическом плане перспективным является применение теории переноса излучения в плотных средах (DMRT), основанной на квазикристаллинном приближении (QCA) и учитывающей липкость частиц [21].

В приведенных примерах расчета коэффициента экстинкции убедительно обнаруживается влияние кластеров. Однако, пока не определена связь параметра липкости частиц со структурой снега.

В экспериментальном плане исследования были направлены на поиск эмпирической связи коэффициента рассеяния с частотой излучения. К настоящему времени считается установленным, что в интервале частот 10...100 ГГц частотная зависимость коэффициентов экстинкции  $k_e$  и рассеяния  $k_s$  для зернистого снега заметно слабее, чем в случае рассеяния Релея. Для описания теплового излучения снега широко применяются две эмпирические модели: HUT (Helsinki University of Technology) [18] и MEMLS (Microwave Emission Model of Layered Snowpacks) [19]. Модель HUT разработана для сред, в которых интенсивность рассеяния вперед существенно превосходит интенсивность обратного рассеяния. Некорректность этой модели отмечалась в [4]. Модель MEMLS разработана для расчета яркостной температуры слоистого снежного покрова, но в случае однослойного покрова она сводится к двухпоточковой теории Кубелки-Мунка.

Поскольку эти модели отличаются существенно, то также существенно отличаются используемые ими эмпирические связи интенсивности рассеяния с частотой излучения. В модели HUT применяется соотношение:

$$k_e = 0.0018 f^{2.8} d^2, \quad (9)$$

где  $k_e$  – коэффициент ‘экстинкции (дБ/м),  $f = 1 \dots 60$  ГГц – частота в ГГц,  $d < 1.6$  мм – диаметр снежных зерен в мм [20], а в модели MMLS для частот  $5 \dots 100$  ГГц:

$$k_{sv} = \left( 9.2 \frac{p}{1\text{мм}} - 1.23 \frac{\rho}{1\text{г/см}^3} + 0.54 \right)^{2.5} (f / 50\text{GHz})^{2.5}, \quad (10)$$

где  $p$  – радиус корреляции при значениях  $0.05 \dots 0.3$  мм,  $\rho$  – плотность снега ( $0.1 \dots 0.4$  г/см<sup>3</sup>) [19].

Оба соотношения (9) и (10) объединяет то, что размеры рассеивателей не зависят от частоты. В результате показатель степени частотной характеристики  $\eta$  постоянен на любом интервале частот, при этом полностью исключается релеевское рассеяние на каком-либо интервале частот при какой-либо структуре снега. Это является существенным расхождением с результатами данной работы, поскольку, как показано выше, показатель степени зависит не только от размеров частиц и плотности снега, но также от сравниваемых частот  $f_1, f_2$ . Другими словами, соотношения (9) и (10) не учитывают влияния кластеров на рассеяние теплового излучения.

## Заключение

В данной работе в полосе частот  $22.2 \dots 94$  ГГц выполнено исследование частотных характеристик коэффициента рассеяния теплового излучения в свежавыпавшем, мелкозернистом и крупнозернистом сухом снеге. Экспериментальные результаты показали, что показатель частотной зависимости коэффициента рассеяния сильно зависит от интервала рассматриваемых частот. Выполнены расчеты коэффициентов рассеяния снегоподобной среды на основе теории Ми при учете возрастания комплексной диэлектрической проницаемости среды и уменьшения корреляционного размера

частиц при ее уплотнении. Сравнение экспериментальных данных для свежеснежавшего и мелкозернистого снега с результатами расчетов на основе теории Ми показало, что на интервале частот 22.2...37.5 ГГц показатель степени частотной зависимости коэффициента рассеяния аномально низкое, а на частоте 94 ГГц излучение рассеивается в соответствии с уравнением Релея. Используя уравнение Релея, установлено, что аномальное рассеяние на частотах 22.2...37.5 ГГц обусловлено кластерами с масштабами, которые могут превышать размеры рассеивателей на частоте 94 ГГц в свежеснежавшем снеге более чем в 3 раза, а в мелкозернистом снеге – более чем в 2 раза. При уплотнении снега влияние кластеров ослабляется.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

### Литература

1. Tsang L. et al. Scattering of Electromagnetic Waves, vol. 2. Hoboken. – 2001. 700p.
2. Matzl M., Schneebeli M. Measuring specific surface area of snow by near-infrared photography. *J. Glaciology*. 2006. V. 52, No. 179. P. 558-564. <http://doi.org/10.3189/172756506781828412>
3. Gallet, J.-C., Domine, F., Zender, C.S., Picard, G. Measurement of the specific surface area of snow using infrared reflectance in an integrating sphere at 1310 and 1550 nm. *Cryosphere*. 2009. V. 3 № 2. P.167–182. <http://doi.org/10.5194/tc-3-167-2009>
4. Голунов В.А., Кузьмин А.В., Скулачев Д.П., Хохлов Г.И. Результаты экспериментального исследования частотной зависимости ослабления, рассеяния и поглощения миллиметровых волн в сухом снежном покрове // Радиотехника и электроника. 2017. Т.62. №9. С. 857-865. <https://doi.org/10.7868/S003384941709008X>

5. Голунов В. А., Хохлов Г. И. Показатель степени частотной зависимости интенсивности обратного рассеяния микроволнового излучения в сухом снеге и искусственных снегоподобных средах // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 9. Дата обращения 07.11.2023. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/6/text.pdf>
6. Голунов В. А., Маречек С. В., Хохлов Г. И. Особенности рассеяния микроволнового излучения в сухом пушистом снеге // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 6. Дата обращения 07.11.2023. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun18/2/text.pdf>
7. Голунов В. А. Лабораторная методика экспериментального исследования закономерностей микроволнового теплового излучения сухого снежного покрова // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 10. Дата обращения 07.11.2023. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/15/text.pdf>
8. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – Мир, 1981. – Т. 1. – С. 280.
9. Stogryn A. Correlation functions for random granular media in strong fluctuation theory. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1984. V. GE-22. № 2. P.150-154. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.1984.350607>
10. Prah S. et al. Mie scattering calculator. – 2007. Дата обращения 07.11.2023. URL: [https://omlc.org/calc/mie\\_calc.html](https://omlc.org/calc/mie_calc.html)
11. Tsang L., Kong J. A. Scattering of electromagnetic waves from random media with strong permittivity fluctuations // *Radio Science*. – 1981. – Т. 16. – №. 3. – С. 303-320. <https://doi.org/10.1029/RS016i003p00303>
12. Голунов В. А., Коротков В. А., Сухонин Е. В. Эффекты рассеяния при излучении миллиметровых волн атмосферой и снежным покровом. *Итоги науки и техники, сер // Радиотехника*. – 1990. – Т. 41. – С. 68-136.
13. Ishiniaru A., Kuga Y. Attenuation constant of a coherent field in a dense distribution of particles // *JOSA*. – 1982. – Т. 72. – №. 10. – С. 1317-1320. <https://doi.org/10.1364/JOSA.72.001317>

14. Голунов В. А. Когерентное ослабление электромагнитных волн в слабо поглощающих плотных случайных дискретных (снегоподобных) средах //Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60. – №. 1. – С. 31-37. <https://doi.org/10.7868/S0033849415010052>
15. Голунов В. А. . Рассеяние теплового микроволнового излучения на неоднородностях плотности свежеснежного и мелкозернистого снега. Радиотехника и электроника //Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – №. 10. – С. 953-961. <https://doi.org/10.1134/S0033849419090092>
16. Рытов С. М. и др. Введение в статистическую радиофизику. Случайные поля. – 1978.
17. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Van Deventer T. E. Extinction behavior of dry snow in the 18-to 90-GHz range //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1987. – №. 6. – P. 737-745. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143757>
18. Pulliainen J. T., Grandell J., Hallikainen M. T. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1999. – Т. 37. – №. 3. – С. 1378-1390. <https://doi.org/10.1109/36.763302>
19. Wiesmann A., Mätzler C. Microwave emission model of layered snowpacks //Remote sensing of environment. – 1999. – Т. 70. – №. 3. – С. 307-316. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00046-2)
20. Gunn G. E. et al. Evaluation of the HUT modified snow emission model over lake ice using airborne passive microwave measurements //Remote sensing of environment. – 2011. – Т. 115. – №. 1. – С. 233-244. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.001>
21. Tsang L. et al. Dense media radiative transfer theory based on quasicrystalline approximation with applications to passive microwave remote sensing of snow //Radio Science. – 2000. – Т. 35. – №. 3. – С. 731-749. <https://doi.org/10.1029/1999RS002270>

**Для цитирования:**

Голунов В.А. Влияние кластеров на рассеяние микроволнового излучения в сухом снеге. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.26>