

Характеристики микроволнового теплового излучения плотного сухого снега

В. А. Голунов

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия
E-mail: golsnow@mail.ru*

Выполнено экспериментальное исследование характеристик излучения свежеснежного и зернистого снега при их объёмной плотности свыше 0,4 на частотах 22,2; 37,5; 60 и 94 ГГц. Описано устройство измерительного радиометрического комплекса и методика измерений. В соответствии с теорией Ми рассчитаны коэффициенты поглощения, обратного рассеяния и ослабления единичного объёма смеси сферических частиц льда и воздуха с учётом возрастания эффективного показателя преломления смеси и линейного уменьшения эффективного размера рассеивателей при увеличении объёмной плотности среды. Показано, что теория Ми применима для расчёта перечисленных выше характеристик единичного объёма свежеснежного снега на интервале значений объёмной плотности 0,4–0,6 в диапазоне температуры снега 253–271 К. Зернистый снег с размерами частиц 1–2 мм на интервале объёмной плотности 0,4–0,6 сохраняет свойство сильного объёмного рассеяния, незначительно ослабленного в сравнении с менее плотным снегом. При этом теория Ми применима для расчёта коэффициента ослабления микроволнового теплового излучения зернистого снега при известных значениях объёмной плотности снега и характерных размеров частиц льда. Подтверждено, что при уплотнении снега уменьшается эффективный размер рассеивателей.

Ключевые слова: снег, микроволны, тепловое излучение, объёмная плотность, теория Ми

Одобрена к печати: 01.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-293-305

Введение

Характеристики теплового микроволнового излучения снежного покрова, как важной части криосферы, широко востребованы при решении различных практических задач методами дистанционного зондирования. Такими задачами представляются, например, определение из космоса границ протяжённости и восстановление пространственного распределения водного эквивалента и толщины покрова, необходимые для контроля изменения климата, а также в целях прогноза погоды, паводков, схода снежных лавин (Боярский и др., 2020; Тихонов и др., 2021; Barnett et al., 2005; Cohen, Rind, 1991; Hall et al., 2002; Nolin, 2010).

Радиофизической основой дистанционного метода становится спектральная зависимость интенсивности теплового излучения сухого снежного покрова от его структуры, плотности и толщины. Эта зависимость обусловлена эффектом объёмного рассеяния микроволнового излучения на частицах льда снежного покрова. Интенсивность рассеяния единичного объёма снега существенно обусловлена соотношением длины волны и размерами частиц льда, а также объёмной плотностью рассеивателей. Как правило, объёмная плотность снега ρ_v , задаваемая как отношение суммарного объёма частиц льда к общему объёму снега, имеет значения на интервале 0,2–0,4, при этом нижняя граница плотности снега определяется размером частиц: чем крупнее частицы, тем выше нижняя граница плотности (Кузьмин, 1960).

К настоящему времени пока не разработана строгая теория, позволяющая рассчитывать характеристики рассеяния и излучения при произвольных параметрах случайных сред, к которым относится сухой снег. Основным способом исследования характеристик излучения однородного снега выступает измерение интенсивности теплового излучения однородного слоя как функции его толщины. Слой с заданной толщиной формируется из образцов однородного снега, аккуратно изъятых из востребованного слоя снежного покрова с самосформировавшейся структурой. Образцы снега при этом могут помещаться последовательно

на плоский металл и поверхность чёрного тела в полевых условиях (Боярский и др., 2020; Wiesmann et al., 1998) или в цилиндрические контейнеры для последующих измерений в охлаждённом помещении (Голунов, 2018). К настоящему времени экспериментально исследовались снежные структуры, в основном с широко распространённой объёмной плотностью 0,2–0,4. Более плотный снег формируется по мере его старения в многолетних отложениях как промежуточная стадия между снегом и льдом, а также в результате промерзания сильно талого снега и схода снежных лавин.

Цель настоящей статьи — анализ спектральных характеристик излучения сухого свежевыпавшего и зернистого снега с объёмной плотностью свыше 0,4 на основе результатов экспериментального исследования на частотах 22,2 и 37,5 ГГц, 60 и 94 ГГц. Описание экспериментальных данных основано на использовании полуэмпирической модели FIRE (Голунов, 2019) и теории Ми.

Модели излучения и ослабления в слое плотного снега

При уплотнении снега, как и любой диэлектрической среды, показатель преломления возрастает. В результате анализа применимости различных теоретических формул к описанию экспериментальных значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(\rho_v)$ в работе (Matzler, 1996) было показано, что экспериментальная зависимость $\varepsilon'(\rho_v)$ снега наилучшим образом описывается формулой Полдера – ван Сантена, которая для смеси сферических частиц и воздуха в приближении пренебрежимо малого поглощения записывается в виде:

$$\frac{\varepsilon' - 1}{3\varepsilon'} = \rho_v \frac{\varepsilon'_l - 1}{\varepsilon'_l + 2\varepsilon'}, \quad (1)$$

где ε'_l — действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости льда. Формула (1), как показано экспериментально на частоте 37,5 ГГц (Голунов, 2022), справедлива при размерах частиц, соизмеримых с длиной волны. Удовлетворительной аппроксимацией зависимости показателя преломления $n(\rho_v)$ является формула (Голунов, 2022):

$$n = 1 + 0,74\rho_v. \quad (2)$$

Для описания показателя поглощения m микроволнового излучения в плотном снеге в дальнейшем используются теория Ми и эмпирическая зависимость показателя поглощения пресноводного льда m_l от частоты f и его термодинамической температуры (Голунов и др., 1990).

Экспериментальные зависимости интегральных коэффициентов отражения и пропускания сухого снега удовлетворительно описываются полуэмпирическими моделями двухпоточковой теории Кубелки – Мунка (Wiesmann, Mätzler, 1999) и FIRE (Голунов, 2019), которые без учёта границ позволяют получать для единичного объёма близкие аппроксимационные значения коэффициентов поглощения k_a и обратного рассеяния b единичного объёма. Основные соотношения модели FIRE следующие:

$$R(h) = (1 - A)B \left[1 - e^{-(k_e + \alpha)h} \right] + \frac{Ab}{2\alpha} \left[1 - e^{-2\alpha h} \right], \quad (3)$$

$$t(h) = e^{-k_e h} + A(e^{-\alpha h} - e^{-k_e h}), \quad (4)$$

где R и t — интегральные коэффициенты отражения и пропускания соответственно; $B = b/(k_e + \alpha)$; $A = a/(k_e - \alpha)$; k_e — коэффициент экстинкции, $k_e = k_a + a + b$, a — коэффициент рассеяния единичного объёма в переднюю полусферу, $\alpha = \sqrt{k_a(k_a + 2b)}$ — коэффициент ослабления некогерентного (диффузного) излучения; h — толщина рассеивающего слоя.

При слабом рассеянии, когда в соотношениях (3) и (4) коэффициент A равен 1, применимы более простые соотношения (Голунов, 2019):

$$R(h) = R_0 \left[1 - e^{-2(k_a + b)h} \right], \quad (5)$$

$$R_0 = \frac{b}{2(k_a + b)}, \quad (6)$$

$$t(h) = \exp[-(k_a + b)h], \quad (7)$$

$$\alpha = k_a + b. \quad (8)$$

Применительно к плотному снегу в модель FIRE необходимо ввести учёт влияния границ слоя. В общем случае при моделировании характеристик отражения и пропускания плотного объёмно-рассеивающего слоя отдельно учитываются многократные переотражения падающей (пространственно-когерентной) интенсивности и возбуждаемого ею потока некогерентного (рассеянного) излучения. При сильном рассеянии описание влияния поверхности усложняется неопределённостью учёта многократных отражений некогерентного потока вследствие, как правило, неизвестной индикатрисы рассеяния внутри слоя. В то же время если излучение принимается в перпендикулярном к слою направлении, влияние поверхности на отражение и пропускание когерентной интенсивности за счёт достаточно низких значений показателя преломления сухого снега мало в сравнении с интегральными коэффициентами отражения и пропускания некогерентного потока, поэтому применимы соотношения (3)–(8). Однако при слабом рассеянии влияние поверхности на отражение и пропускание когерентной интенсивности в сравнении с некогерентным потоком усиливается, вследствие чего возникает необходимость учёта этого влияния даже при угле приёма 0° от надира. В первом приближении учёта многократных отражений когерентной интенсивности при угле приёма 0° от надира для результирующих коэффициентов отражения R_r и пропускания t_r слоя с плоскими поверхностями несложно получить следующие соотношения:

$$R_r(h) = R_F^2 + \left(1 - R_F^2 \right)^2 R(h), \quad (9)$$

$$t_r(h) = \left(1 - R_F^2 \right)^2 \exp(-\alpha h), \quad (10)$$

где R_F — коэффициент отражения Френеля. В рассматриваемом случае

$$R_F^2 = 1 - \frac{4n}{(n+1)^2 + m^2}, \quad (11)$$

где m — показатель поглощения сухого снега.

Заметим, что при слабом рассеянии в сравнении с поглощением ($b \ll k_a$) из соотношений (5), (6) и (9) следует $R_r \approx R_F^2$.

Аппаратура и методика измерений

Подробное описание методики и реализующей её радиометрического стенда приведено в работе (Голунов, 2018). Здесь отметим, что измерения интегральных коэффициентов отражения и пропускания слоя снега осуществлялись в охлаждённом лабораторном помещении. Образцы снега загружались в металлические цилиндры диаметром 0,2 м и высотой от 0,01 до 1 м. Основания цилиндров закрывались пенопластовыми пластинами толщиной 0,005 м, а боковые поверхности имели теплоизоляционные оболочки. Для коллимации приёмного пучка использовалась диэлектрическая линза диаметром 0,2 м при фокусном расстоянии 0,4 м. При измерениях образцы устанавливались вплотную к линзе. С другой стороны линзы имелась металлическая замкнутая камера, в основании которой помещалось охлаждаемое жидким азотом чёрное тело, необходимое для создания «холодной» яркостной подсветки образцов. При измерениях интегральных коэффициентов отражения и пропускания

использовались ещё два чёрных эталона с температурой жидкого азота и снега, которые сначала попеременно устанавливались вплотную к линзе (т. е. при отсутствии образцов), а затем вплотную к исследуемым образцам.

Этот метод обеспечивает более надёжные результаты измерений коэффициента пропускания в сравнении с измерениями, в которых используются монохроматические генераторы (см., например, (Hallikainen et al., 1987)), поскольку в нём реализуется одновременно частотное (за счёт широкой полосы радиометров) и пространственное (за счёт углового размера теплового источника) усреднение когерентного поля.

В настоящей работе приводятся результаты измерений на частотах 22,2; 37,5; 60 и 94 ГГц. Систематически проводимая калибровка радиометров с установкой эталонов вплотную к линзе и разработанный алгоритм относительных измерений обеспечили надёжный учёт изменений радиояркостного фона и радиояркостной температуры эталонов. Технические параметры радиометров приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Технические параметры радиометров

Параметры	Центральная частота, ГГц			
	22,2	37,5	60	94
Ширина полосы частот, ГГц	0,8	1,6	4,0	4,0
Чувствительность при постоянной времени 1 с, К	0,5	0,2	0,025	0,1

Характеристики излучения плотного свежеснегавшего снега

Свежеснегавший снег вследствие своей структуры наиболее сильно подвержен уплотнению вследствие механических воздействий и в результате процессов таяния и метаморфизма. Однако, как показал опыт исследования, уплотнение слоя свежеснегавшего снега толщиной в несколько десятков сантиметров до значений $\rho_v = 0,5...0,6$ требует немалых усилий. Если рассеивающие свойства свежеснегавшего снега при $\rho_v = 0,15...0,2$ определяются влиянием кластеров из снежинок (Голунов и др., 2018), то на интервале $\rho_v = 0,5...0,6$ следует ожидать пренебрежимо слабое рассеяние в сравнении с поглощением. Свойства такого снега можно рассматривать как свойства пресноводного льда с уменьшенной плотностью (Cumming, 1952).

Исследованию диэлектрических свойств пресноводного льда к настоящему времени посвящено множество работ (например, (Evans, 1965; Jiang, Wu, 2004; Matzler, Wegmuller, 1987)). Известно, что действительная часть его диэлектрической проницаемости не зависит от частоты и практически не зависит от температуры. Для расчёта в микроволновом диапазоне применяются, как правило, различные аппроксимационные зависимости экспериментальных данных. Далее для нахождения диэлектрических параметров снега будет использоваться двухструктурная модель льда, разработанная для вычисления мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости льда в широком диапазоне волн, включая микроволны (Голунов и др., 1990). Задействованные ниже при расчётах с применением теории Ми значения мнимой части m показателя преломления льда приведены в *табл. 2* при показателе преломления $n = 1,775$.

Таблица 2. Мнимая часть m показателя преломления пресноводного льда

T_0 , К	Частота, ГГц			
	22,2	37,5	60	94
271	0,0010	0,0013	0,0020	0,0028
253	0,0005	0,0008	0,0013	0,0021

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости интегральных коэффициентов отражения и пропускания от толщины слоя свежесыпавшего снега. Кроме того, показаны значения объёмной плотности исследованных образцов.

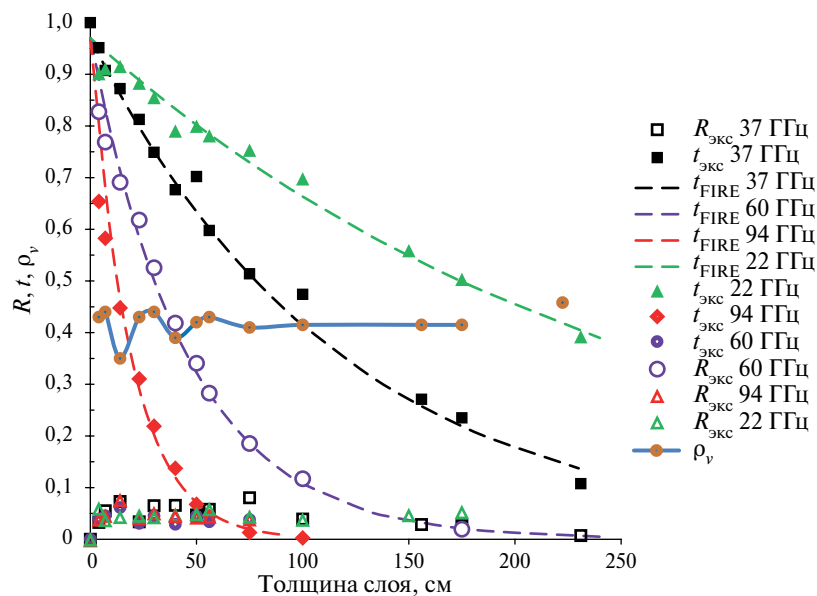


Рис. 1. Экспериментальные (маркеры) и аппроксимационные (штриховые линии) зависимости интегральных коэффициентов отражения R и пропускания t от толщины слоя свежесыпавшего снега на частотах 22,2 ГГц (зелёный цвет), 37,5 ГГц (чёрный цвет), 60 ГГц (фиолетовый цвет) и 94 ГГц (красный цвет). График экспериментальных значений объёмной плотности образцов снега показан в виде сплошной линии голубого цвета с маркерами

Из рис. 1 следует, что на всех указанных частотах почти все значения коэффициентов отражения плотного свежесыпавшего снега ниже 0,05. В соответствии с выражениями (2) и (11) при объёмной плотности рассматриваемого снега $\rho_v = 0,4$ коэффициент отражения границы $R_F^2 = 0,02$, следовательно, коэффициент отражения, обусловленный объёмным рассеянием, в соответствии с соотношением (9) составляет всего лишь 0,03. Для оценки соотношения между поглощением и рассеянием излучения в зависимости от плотности свежесыпавшего снега были выполнены расчёты с применением теории Ми для дискретной среды со сферическими рассеивателями и с диэлектрическими свойствами сухого снега. При этом учитывалось возрастание показателя преломления среды с увеличением объёмной плотности в соответствии с уравнением (2) и уменьшение размера l эффективных рассеивателей (радиуса корреляции) (Stogryn, 1984) в соответствии с

$$l = d(1 - \rho_v), \quad (12)$$

где d — диаметр частиц льда.

Экспериментальные и расчётные зависимости коэффициентов поглощения и ослабления от объёмной плотности снега на частотах 22,2; 37,5; 60 и 94 ГГц показаны на рис. 2. Расчёты выполнены при температуре снега 271 К, а экспериментальные данные получены при температуре исследованного снега от -3 до -20 °С.

Из рис. 2 (см. с. 298) следует, что влияние рассеяния на ослабление излучения при возрастании объёмной плотности снега стремится к нулю на всех частотах. При этом на частотах 22,2 и 37,5 ГГц рассеяние пренебрежимо мало почти на всем интервале $\rho_v = 0,4 \dots 0,6$, а на частотах 60 и 94 ГГц — при $\rho_v > 0,5$.

Определённый научный интерес представляет зависимость свежесыпавшего снега с объёмной плотностью 0,6 от его термодинамической температуры, поскольку такой снег можно рассматривать как лёд с уменьшенной плотностью.

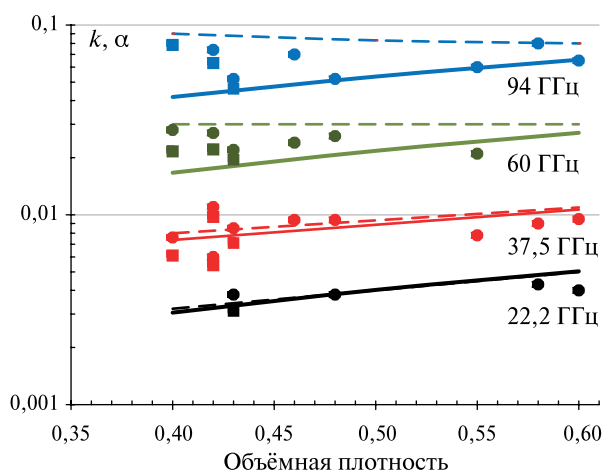
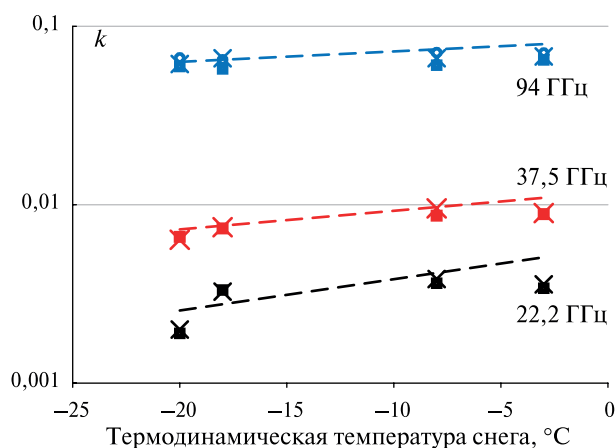


Рис. 2. Экспериментальные (маркеры) и расчётные зависимости коэффициентов поглощения (сплошные линии) и ослабления (пунктирные линии) единичного объёма от объёмной плотности свежевыпавшего снега на частотах 22,2 и 37,5 ГГц, 60 и 94 ГГц. Квадратные маркеры относятся к экспериментальным значениям коэффициента поглощения, круглые — коэффициенту ослабления

при наблюдении излучения трёх образцов снега толщиной 14, 31 и 56 см, которые хранились в теплоизоляционном контейнере в течение одной недели в уличных условиях. На протяжении этого срока температура воздуха в контейнере при измерениях изменялась следующим образом: 21 января — минус 8 °С, 22 января — минус 18 °С, 24 января — минус 20 °С и 29 января — минус 3 °С. Расчёты коэффициента поглощения выполнены по теории Ми для частиц диаметром 0,55 мм с использованием данных табл. 2.

Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента поглощения свежевыпавшего снега с объёмной плотностью 0,6 на частотах 22,2 ГГц (чёрный цвет), 37,5 ГГц (красный цвет) и 94 ГГц (синий цвет). Пунктирные линии — расчёт, маркеры — экспериментальные данные для образцов толщиной 14 см (кружки), 31 см (кресты), 56 см (квадраты)



Из рис. 3 следует, что экспериментальные данные в целом удовлетворительно согласуются с результатами расчётов. Однако на фоне отклонений экспериментальных значений от расчётных можно предположить, что коэффициент поглощения снега, по крайней мере, слабо зависит от его температуры. Наиболее сильные расхождения между экспериментальными и расчётными значениями наблюдаются на частоте 22,2 ГГц. Возможно, что это обусловлено сочетанием крайне слабого собственного излучения снега и недостаточно высокой чувствительности радиометра.

Характеристики излучения плотного зернистого снега

Интенсивность рассеяния микроволнового излучения в зернистом снеге независимо от его плотности на каждой частоте тем выше, чем крупнее зерно. Рассмотрим, как изменяются характеристики излучения при уплотнении зернистого снега.

На рис. 4 и 5 (см. с. 299) приведены экспериментальные и модельные зависимости коэффициентов отражения и пропускания от толщины слоя зернистого снега с частицами размером 1–2 мм на частотах 37,5 и 94 ГГц при двух значениях объёмной плотности: 0,27 и 0,47. Из представленных графиков следует, что уплотнение снега приводит к снижению коэффи-

циента отражения на обеих частотах. При этом видно, что если на частоте 37,5 ГГц коэффициент пропускания возрастает, то на частоте 94 ГГц практически не изменяется. Модельные зависимости рассчитаны по соотношениям (3) и (4) при $A = 1$ на частоте 37,5 ГГц и $A = 0,8$ на частоте 94 ГГц. Модельные значения параметров излучения перечислены в табл. 3 и 5. Для сравнения в табл. 4 и 6 приведены параметры излучения, рассчитанные по теории Ми при трёх значениях диаметра частиц льда: 1,0; 1,5 и 2,0 мм, поскольку исследованный снег состоял из частиц с размерами 1–2 мм. Расчётное значение коэффициента рассеяния b определялось как $b = k_s/2$, где k_s — сумма коэффициентов рассеяния единицы объёма в заднюю и переднюю полусферы, а коэффициент ослабления вычислялся по формуле:

$$\alpha = \sqrt{k_a(k_a + 2b)}. \quad (13)$$

Рис. 4. Экспериментальные (круглые и треугольные маркеры) и модельные зависимости коэффициентов отражения (сплошные линии) и пропускания (пунктирные линии) от толщины слоя зернистого снега ($d = 1 \dots 2$ мм) при двух значениях объёмной плотности: 0,27 (красный цвет) и 0,47 (чёрный цвет). Частота излучения 37,5 ГГц

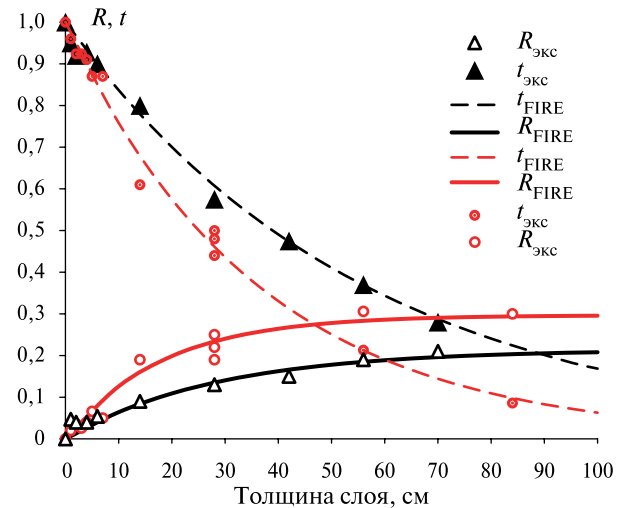
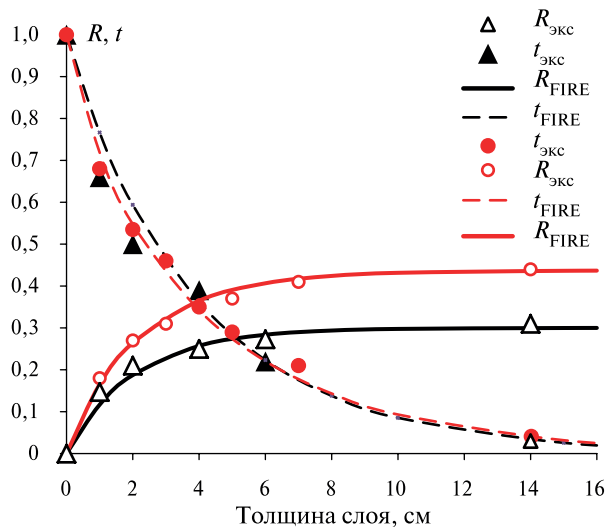


Рис. 5. Экспериментальные (круглые и треугольные маркеры) и модельные зависимости коэффициентов отражения (сплошные линии) и пропускания (пунктирные линии) от толщины слоя зернистого снега ($d = 1 \dots 2$ мм) при двух значениях объёмной плотности: 0,27 (красный цвет) и 0,47 (чёрный цвет). Частота излучения 94 ГГц

Таблица 3. Модельные значения параметров излучения на частоте 37,5 ГГц, соответствующие графикам на рис. 4

	Объёмная плотность	
	0,27	0,47
R_0	0,300	0,214
$k_a, \text{см}^{-1}$	0,0164	0,0117
$b, \text{см}^{-1}$	0,0174	0,0076
$\alpha, \text{см}^{-1}$	0,0290	0,0178

Таблица 4. Параметры излучения на частоте 37,5 ГГц, рассчитанные по теории Ми для частиц диаметром 1,0; 1,5 и 2,0 мм при значениях объёмной плотности 0,27 и 0,47

	Объёмная плотность					
	0,27			0,47		
d , мм	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
k_a , см^{-1}	0,0040	0,0044	0,0050	0,0086	0,0091	0,0096
b , см^{-1}	0,009	0,062	0,073	0,010	0,036	0,080
α , см^{-1}	0,010	0,017	0,027	0,016	0,027	0,040

Таблица 5. Модельные значения параметров излучения на частоте 94 ГГц, соответствующие графикам на рис. 5

	Объёмная плотность	
	0,27	0,47
R_0	0,437	0,300
k_a , см^{-1}	0,089	0,130
b , см^{-1}	0,216	0,016
α , см^{-1}	0,215	0,240

Таблица 6. Параметры излучения на частоте 94 ГГц, рассчитанные по теории Ми для частиц диаметром 1,0; 1,5 и 2,0 мм при значениях объёмной плотности 0,27 и 0,47

	Объёмная плотность					
	0,27			0,47		
d , мм	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
k_a , см^{-1}	0,0290	0,0365	0,0510	0,0550	0,0610	0,0700
b , см^{-1}	0,350	1,010	1,830	0,360	0,850	1,380
α , см^{-1}	0,146	0,274	0,437	0,210	0,330	0,440

По-видимому, в результате этих мер среди значений коэффициентов ослабления α , рассчитанных с применением теории Ми (см. табл. 4 и 6), обнаружили такие, которые слабо отличаются от значений, полученных по экспериментальным данным с применением модельных функций (3) и (4).

Из сравнения модельных и расчётных значений параметров излучения на каждой частоте следует, что если расчётные значения коэффициента поглощения k_a значительно ниже, чем модельные, то расчётные значения коэффициента рассеяния b значительно превосходят модельные. Причина расхождений в том, что теория Ми, разработанная для расчёта поглощения и рассеяния на единичных сферических частицах, во-первых, не включает учёт многократного рассеяния, увеличивающего тепловые потери, во-вторых, не учитывает коррелированность ансамбля рассеивателей, что ослабляет интенсивность рассеяния b единичного объёма (Tsang et al., 1985). Кроме того, при увеличении размеров частиц изменяется форма индикатрисы рассеяния с усилением рассеяния в переднюю полусферу, что особенно сильно увеличивает величину b , определяемую как $b = k_s/2$. При расчётах были использованы меры, частично компенсирующие влияние вышеперечисленных факторов, а именно: учитывались зависимости эффективного показателя среды и эффективного диаметра частиц l от объёмной плотности в соответствии с выражениями (2) и (12).

Модельные и рассчитанные с применением теории Ми значения коэффициента ослабления, выбранные из табл. 3–6 по критерию их наименьшей разности, представлены в табл. 7.

Таблица 7. Модельные и рассчитанные с применением теории Ми значения коэффициента ослабления, выбранные из табл. 3–6 по критерию их наименьшей разности

f , ГГц	37,5		94	
ρ_v	0,27	0,47	0,27	0,47
d , мм	2,0	1,0	1,5	1,0
α , см ⁻¹ , модель	0,029	0,0178	0,215	0,24
α , см ⁻¹ , теория Ми	0,027	0,016	0,274	0,21

Из анализа этих данных следует, что, во-первых, на частоте 37,5 ГГц разность пренебрежимо мала при обоих значениях объёмной плотности снега, а на частоте 94 ГГц заметная разность проявляется только в случае снега с объёмной плотностью 0,27.

Во-вторых, отметим, что при увеличении плотности снега наблюдается уменьшение диаметра частиц (от 2 до 1 мм на частоте 37,5 ГГц и от 1,5 до 1,0 мм на частоте 94 ГГц), которому соответствуют минимальная разность коэффициентов ослабления. Это явление подтверждает справедливость использованного предположения, что при уплотнении снега уменьшается эффективный размер рассеивателей (см. выражение (12)).

Поскольку структура исследованного снега была оценена грубо, можно предположить, что диаметры частиц, указанные в табл. 7, являются характерными размерами рассеивателей. Это предположение обосновано, поскольку в отличие от модельных значений коэффициентов поглощения и рассеяния, восстановленных именно благодаря применению модели FIRE, коэффициент ослабления α восстанавливается непосредственно из прямых измерений коэффициента пропускания, являющегося экспоненциальной функцией от толщины слоя или близкой к ней. Расчётное значение коэффициента ослабления α определялось по формуле (13), в которой фигурирует произведение расчётных значений k_a и b , а эти величины оказываются соответственно заниженными и завышенными в сравнении с модельными значениями. В связи с этим, несмотря на сильные расхождения модельных и расчётных значений k_a и b , расчётные значения α оказались в рассматриваемом случае близкими к модельным.

Таким образом, при уплотнении зернистого снега до объёмной плотности 0,47 без разрушения зерна сохраняется свойство сильного объёмного рассеяния, но ослабленного в сравнении с менее плотным снегом. При увеличении значений ρ_v от 0,47 до 0,6 ослабление интенсивности рассеяния усиливается, поскольку эффективные размеры рассеивателей уменьшаются в соответствии с соотношением (12). При известных значениях объёмной плотности снега и характерных размеров частиц льда, по крайней мере, до 2 мм теория Ми в сочетании с применением формулы (1) для расчёта эффективного показателя преломления и формулы (12) для определения эффективного размера рассеивателей позволяет получать достаточно приемлемые оценки коэффициента ослабления микроволнового теплового излучения зернистого снега.

Обсуждение

Широко используемые экспериментальные данные (Wiesmann et al., 1998) относятся к снегу с объёмной плотностью 0,2–0,4. Этот интервал объёмной плотности становится наиболее вероятным для самосформировавшегося снежного покрова.

В работе (Tsang et al., 1985) при использовании функции парной корреляции частиц льда с малыми размерами в сравнении с длиной волны теоретически строго показано, что максимально сильное рассеяние возникает при объёмной плотности 0,15–0,2. Полученные выше результаты продемонстрировали на примере свежеснежного покрова, что при объёмной плотности свыше 0,5 объёмное рассеяние в средах с малыми размерами частиц льда практически отсутствует и для расчёта коэффициента поглощения достаточно использовать теорию Ми

при учёте эффективного показателя преломления среды и изменения эффективных размеров частиц (радиуса корреляции).

В приближении теории сильных флуктуаций установлено (Голунов, 2015), что коэффициент экстинкции достигает максимума и практически не зависит от объёмной плотности на интервале её значений 0,2–0,4. Этот вывод подтверждён экспериментально на примере искусственных дискретных сред в виде смесей гранулированных полиэтилена и полистирола с пенопластовой крошкой. Выше в настоящей работе показано на примере зернистого снега, что на интервале объёмной плотности 0,4–0,6 интенсивность объёмного рассеяния действительно снижается, но зернистый снег сохраняет достаточно высокие значения интегрального коэффициента отражения слоя и коэффициента ослабления единичного объёма.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты расширяют базу характеристик и свойств микроволнового излучения сухого снега.

Заключение

Выполнено экспериментальное исследование характеристик излучения свежеснегавшего и зернистого снега при их объёмной плотности свыше 0,4 на частотах 22,2; 37,5; 60 и 94 ГГц. В соответствии с теорией Ми произведены расчёты коэффициентов поглощения, обратного рассеяния и ослабления единичного объёма смеси сферических частиц льда и воздуха с учётом возрастания эффективного показателя преломления смеси и линейного уменьшения эффективного размера рассеивателей при увеличении объёмной плотности среды. Показано, что теория Ми применима для расчёта перечисленных выше характеристик единичного объёма свежеснегавшего снега на интервале значений объёмной плотности 0,4–0,6 в диапазоне температуры снега 253–271 К.

Зернистый снег с размерами частиц до 2 мм на интервале объёмной плотности 0,4–0,6 сохраняет свойство сильного объёмного рассеяния, но ослабленного в сравнении с менее плотным снегом. При этом теория Ми применима для расчёта коэффициента ослабления микроволнового теплового излучения зернистого снега при известных значениях объёмной плотности снега и характерных размеров частиц льда.

Автор глубоко благодарен Гордееву К. В. и Рыкову К. Н. за помощь в проведении экспериментальных работ. Работа выполнена по госзаданию Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН.

Литература

1. Боярский Д. А., Дмитриев В. В., Тихонов В. В. Прогнозирование лавинной опасности методами микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 269–278. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-269-278.
2. 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. DOI: 10.7868/S0033849415010052.
3. Голунов В. А. Лабораторная методика экспериментального исследования закономерностей микроволнового теплового излучения сухого снежного покрова // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 10. 13 с. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.10.15.
4. Голунов В. А. Рассеяние теплового микроволнового излучения на неоднородностях плотности свежеснегавшего и мелкозернистого снега // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 10. С. 953–961. DOI: 10.1134/S0033849419090092.
5. Голунов В. А. Экспериментальное исследование диэлектрических свойств сухого снега с крупными частицами на частоте 37,5 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 19–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-19-27.
6. 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. Т. 41. М.: ВИНТИ, 1990. С. 68–136.

7. Голунов В. А., Маречек С. В., Хохлов Г. И. Особенности рассеяния микроволнового излучения в сухом пушистом снеге // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 6. 16 с. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.6.2.
8. Кузьмин П. П. Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 171 с.
9. Тихонов В. В., Соколова Ю. В., Боярский Д. А., Комарова Н. Ю. О возможности восстановления снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 47–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-47-64.
10. Barnett T. P., Adam J. C., Lettenmaier D. P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // Nature. 2005. V. 438. P. 303–309. DOI: 10.1038/nature04141.
11. Cohen J., Rind D. The effect of snow cover on the climate // J. Climate. 1991. V. 4. Iss. 7. P. 689–706. DOI: 10.1175/1520-0442(1991)004<0689:TEOSCO>2.0.CO;2.
12. Cumming W. A. The dielectric properties of ice and snow at 3.2 centimeters // J. Applied Physics. 1952. V. 23. P. 768–773. DOI: 10.1063/1.1702299.
13. Evans S. Dielectric properties of ice and snow — a review // J. Glaciology. 1965. No. 5. P. 773–792. DOI: 10.3189/S0022143000018840.
14. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Van Deventer T. E. Extinction behavior of dry snow in the 18- to 90-GHz range // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1987. V. GE-25. No. 6. P. 737–745. DOI: 10.1109/TGRS.1987.289743.
15. Hall D. K., Kelly R. E. J., Riggs G. A. et al. Assessment of the relative accuracy of hemispheric-scale snow-cover maps // Annals of Glaciology. 2002. V. 34. P. 24–30. DOI: 10.3189/172756402781817770.
16. Jiang J. H., Wu D. L. Ice and water permittivities for millimeter and sub-millimeter remote sensing applications // Atmospheric Science Letters. 2004. V. 5. Iss. 7. P. 146–151. DOI: 10.1002/asl.77.
17. Matzler C. Microwave permittivity of dry snow // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1996. V. 34. No. 2. P. 573–581. DOI: 10.1109/36.485133.
18. Matzler C., Wegmüller U. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies // J. Physics D: Applied Physics. 1987. V. 20. P. 1623–1630. DOI: 10.1088/0022-3727/20/12/013.
19. Nolin A. W. Recent advances in remote sensing of seasonal snow // J. Glaciology. 2010. V. 56. No. 200. P. 1141–1150. DOI: 10.3189/002214311796406077.
20. Stogryn A. Correlation functions for random granular media in strong fluctuation theory // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1984. V. GE-22. No. 2. P. 150–154. DOI: 10.1109/TGRS.1984.350607.
21. Tsang L., Kong J. A., Shin R. Theory of microwave remote sensing. N. Y.: Wiley-Interscience, 1985. 632 p.
22. Wiesmann A., Mätzler C. Microwave emission model of layered snowpacks // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 70. P. 307–316. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00046-2.
23. Wiesmann A., Mätzler C., Weise T. Radiometric and structural measurements of snow samples // Radio Science. 1998. V. 33. P. 273–289. DOI: 10.1029/97RS02746.

Microwave thermal radiation characteristics of compact dry snow

V. A. Golunov

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia
E-mail: golsnow@mail.ru*

An experimental study of radiation characteristics of freshly fallen and granular snow with a bulk density exceeding 0.4 at frequencies of 22.2, 37.5, 60 and 94 GHz is performed. The design of the measuring radiometric complex and the measurement technique are described. In accordance with the Mie theory, the absorption, backscattering and attenuation coefficients of a unit volume of a mixture of spherical ice and air particles are calculated taking into account an increase in the effective refractive index of the mixture and a linear decrease in the effective size of scatterers with an increase in the bulk density of the medium. It is shown that the Mie theory is applicable to calculating the above characteristics of a unit volume of freshly fallen snow in the bulk density range of 0.4–0.6 in the snow temperature range of 253–271 K. Granular snow with particle sizes 1–2 mm in the bulk density range of 0.4–0.6 retains the property of strong volume scattering, slightly weakened in comparison with less

dense snow. In this case, the Mie theory is applicable to calculating the coefficient of attenuation of microwave thermal radiation of granular snow with known values of bulk density of snow and characteristic sizes of ice particles. It is confirmed that the effective size of the scatterers decreases with compaction of snow.

Keywords: snow, microwaves, thermal radiation, bulk density, Mie theory

Accepted: 01.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-293-305

References

1. Boyarskii D. A., Dmitriev V. V., Tikhonov V. V., Avalanche hazard prediction using microwave radiometry methods, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 5, pp. 269–278 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-47-64.
2. Golunov V. A., Coherent attenuation of electromagnetic waves by weakly absorbing dense random discrete (snow-like) media, *J. Communications Technology and Electronics*, 2015, V. 60, No. 1, pp. 29–34, DOI: 10.1134/S1064226915010052.
3. Golunov V. A., Technique of experimental investigation of regularities of microwave thermal radiation of dry snow cover indoor, *J. Radio Electronics*, 2018, No. 10, 13 p. (in Russian), DOI: 10.30898/1684-1719.2018.10.15.
4. Golunov V. A., Scattering of thermal microwave radiation by density irregularities of freshly fallen and fine-grained snow, *J. Communications Technology and Electronics*, 2019, V. 64, No. 10, pp. 1065–1072, DOI: 10.1134/S1064226919090092.
5. Golunov V. A., Experimental study of the dielectric properties of dry snow with large particles at the frequency of 37.5 GHz, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 19–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-19-27.
6. Golunov V. A., Korotkov V. A., Sukhonin E. V., Scattering effects upon millimeter waves emission from atmosphere and snow cover, In: *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Radiotekhnika* (Results of Science and Technology. Series: Radio Engineering), V. 41, Moscow: VINITI, 1990, pp. 68–136.
7. Golunov V. A., Marechek S. V., Kchokchlov G. I., Features of the microwave radiation scattering in dry fluffy snow, *J. Radio Electronics*, 2018, No. 6, 16 p. (in Russian), DOI: 10.30898/1684-1719.2018.6.2.
8. Kuz'min P. P., *Formirovanie snezhnogo pokrova i metody opredeleniya snegozapasov* (Formation of snow cover and methods for determining snow supplies), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1960, 171 p. (in Russian).
9. Tikhonov V. V., Sokolova Yu. V., Boyarskii D. A., Komarova N. Yu., On the possibility of retrieving snow water equivalent from satellite microwave radiometry data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 5, pp. 47–64 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-47-64.
10. Barnett T. P., Adam J. C., Lettenmaier D. P., Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, 2005, V. 438, pp. 303–309, DOI: 10.1038/nature04141.
11. Cohen J., Rind D., The effect of snow cover on the climate, *J. Climate*, 1991, V. 4, Iss. 7, pp. 689–706, DOI: 10.1175/1520-0442(1991)004<0689:TEOSCO>2.0.CO;2.
12. Cumming W. A., The dielectric properties of ice and snow at 3.2 centimeters, *J. Applied Physics*, 1952, V. 23, pp. 768–773, DOI: 10.1063/1.1702299.
13. Evans S., Dielectric properties of ice and snow — a review, *J. Glaciology*, 1965, No. 5, pp. 773–792, DOI: 10.3189/S0022143000018840.
14. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Deventer T. E., Extinction behavior of dry snow in the 18- to 90-GHz range, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1987, V. GE-25, No. 6, pp. 737–745, DOI: 10.1109/TGRS.1987.289743.
15. Hall D. K., Kelly R. E. J., Riggs G. A. et al., Assessment of the relative accuracy of hemispheric-scale snow-cover maps, *Annals of Glaciology*, 2002, V. 34, pp. 24–30, DOI: 10.3189/172756402781817770.
16. Jiang J. H., Wu D. L., Ice and water permittivities for millimeter and sub-millimeter remote sensing applications, *Atmospheres Science Letters*, 2004, V. 5, Iss. 7, pp. 146–151, DOI: 10.1002/asl.77.
17. Matzler C., Microwave permittivity of dry snow, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1996, V. 34, No. 2, pp. 573–581, DOI: 10.1109/36.485133.
18. Matzler C., Wegmuller U., Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies, *J. Physics D: Applied Physics*, 1987, V. 20, pp. 1623–1630, DOI: 10.1088/0022-3727/20/12/013.
19. Nolin A. W., Recent advances in remote sensing of seasonal snow, *J. Glaciology*, 2010, V. 56, No. 200, pp. 1141–1150, DOI: 10.3189/002214311796406077.

20. Stogryn A., Correlation functions for random granular media in strong fluctuation theory, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1984, V. GE-22, No. 2, pp. 150–154, DOI: 10.1109/TGRS.1984.350607.
21. Tsang L., Kong J. A., Shin R., *Theory of microwave remote sensing*, New York: Wiley-Interscience, 1985, 632 p.
22. Wiesmann A., Mätzler C., Microwave emission model of layered snowpacks, *Remote Sensing of Environment*, 1999, V. 70, pp. 307–316, DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00046-2.
23. Wiesmann A., Mätzler C., Weise T., Radiometric and structural measurements of snow samples, *Radio Science*, 1998, V. 33, pp. 273–289, DOI: 10.1029/97RS02746.