

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.8>

УДК: 535.36, 621.396.11

## МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ТАЮЩЕГО СНЕЖНОГО ПОКРОВА В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

В.А. Голунов

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

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2024 г.

**Аннотация.** В данной работе выполнено исследование формирования теплового излучения тающего зернистого снега на частотах 22.2 ГГц, 37.5 и 140 ГГц в условиях солнечной погоды на равнине. Результаты измерения влажности верхнего слоя снежного покрова показали ее линейное по времени нарастание в течение первого часа таяния снега. Предложена и обоснована модель тающего слоя снега в виде поглощающей среды с пренебрежимо слабым объемным рассеянием вследствие объемного увлажнения частиц льда. Возрастание радиояркостной температуры тающего снега обусловлено увеличением вклада собственного излучения тающего слоя и экспоненциальным ослаблением в тающем слое вклада излучения нижележащего сухого снега. Восстановление толщины тающего слоя на основе разработанной модели показало, что предельное значение тающего крупнозернистого снежного покрова, близкое к 273 К, достигается при толщине слоя 1 см на частоте 140 ГГц и 5...7 см на частоте 37.5 ГГц.

**Ключевые слова:** микроволны, тающий снег, радиояркостная температура, моделирование, рассеяние, поглощение, калориметр, толщина тающего слоя.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

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

## Введение

В настоящее время большое практическое значение имеют и продолжают развиваться методы дистанционного зондирования снежного покрова из космоса. К основным задачам относятся картирование распределения водного эквивалента и толщины снежного покрова, а также картирование границ снеготаяния. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что таяние снега существенно изменяет его излучательные свойства в микроволновом диапазоне, а именно, если сухой снег является средой с сильным объемным рассеянием на частицах льда, то сильно увлажненный снег – это только поглощающая среда. В связи с этим при решении задач восстановления водного эквивалента и толщины снежного покрова, возможном только в случае сухого снега, важно обнаружить процессы таяния.

К настоящему времени исследования влияния таяния снега на его радиояркостные характеристики в микроволновом диапазоне ограничивались только наблюдениями за суточными изменениями радиояркостной температуры [1-8]. Исключением являются экспериментальные данные на частоте 37 ГГц при горизонтальной поляризации и угле наблюдения  $50^\circ$  от надира [9], показавшие, что переход радиояркостной температуры от значения 150 К для сухого снега к предельному значению 250 К для тающего снега осуществляется при объемной влажности  $\cong 3\%$ . Известны модели комплексной диэлектрической проницаемости влажного снега, основой которых являются представления снега в виде трехфазных смесей из частиц сухого льда, воды и воздуха или из частиц сухого льда, покрытых пленкой воды, включений жидкой фазы воды и воздуха [1,2,4,7,12]. Однако, до сих пор не разработана модель излучения тающего снега, позволяющая восстановить по экспериментальным значениям

радиояркостной температуры толщину тающего слоя или включающая учет этой толщины.

Цель данной работы – разработка модели излучения тающего снежного покрова в условиях весенней солнечной погоды, типичной для интенсивного таяния снега. Разработка модели основана на синхронных экспериментальных зависимостях радиояркостной температуры тающего зернистого снежного покрова на частотах 37.5 и 140 ГГц, 37.5 и 22.2 ГГц при контроле влажности верхнего слоя покрова. Влажность снега измерялась калориметром при использовании разработанной методики и высокоточных термометров.

## **1. Радиометрический комплекс**

Использовался радиометрический комплекс в составе 3-х радиометров на частотах 22.2 ГГц, 37.5 и 140 ГГц, параболического зеркала диаметром 0.6 м, плоского контррефлектора. Кроме того, на расстоянии 20 м от зеркала размещался на высоте 3 м от поверхности земли плоский отражатель с размерами 2x3 м<sup>2</sup>, направляющий диаграмму направленности к земной поверхности под углом 15°. К облучателю зеркальной антенны подключались попарно радиометры на частотах 22.2 и 37.5 ГГц или 37.5 и 140 ГГц. Абсолютная калибровка радиометров производилась по двум черным телам, одно из которых имело термодинамическую температуру приземного слоя атмосферы, а другое охлаждалось жидким азотом до прекращения его кипения. Оба черных тела имели размеры 1x1 м<sup>2</sup> и размещались на земной поверхности рядом с исследуемым участком снега. Погрешность измерения радиояркостной температуры снега оценена как не хуже 2 К.

## **2. Методика измерения влажности снега**

Для измерения влажности снега был использован калориметрический метод. Калориметр представлял собой стеклянный термос с пенопластовой оболочкой. В термос наливалась вода при комнатной температуре  $t_1$ , после чего в воде плавился исследуемый образец тающего снега и измерялась

температура смеси  $t_2$ . Использовалось следующее уравнение теплового баланса в калориметре:

$$C_0(t_1 - t_2) = c_в m_{сн} t_2 + c_л (m_{сн} - m_в), \quad (1)$$

где  $C_0$  (кал/град) – теплоемкость калориметра, наполненного водой,  $m$  – масса в г, индексы «сн» и «в» относятся к тающему снегу и жидкой воде в снеге,  $c_в$  – удельная теплоемкость воды, равная 1 кал/(г град)  $c_л$  – теплота плавления льда, равная 79,6 кал/г. Из (1) для весового содержания  $\delta$  воды в снеге следует:

$$\delta = \frac{m_в}{m_{сн}} = 1 - \frac{C_0(t_1 - t_2) - m_{сн} t_2}{c_л m_{сн}}.$$

Точность измерения  $\delta$  калориметрическим методом существенно определяется точностью измерения теплоемкости  $C_0$ . Наше предварительное исследование показало, что точность измерения  $C_0$  можно существенно повысить, если при использовании описанного выше термостата выполнить следующие требования к процедуре измерений:

- разность температур калориметра и окружающей среды должна быть стабильно близкой к нулю;

- вес исследуемых образцов снега должен быть существенно меньше веса воды в термостате, чтобы плавление снега приводило к слабому изменению разности  $(t_1 - t_2)$ ;

- обеспечить точность измерения температуры  $t_2$  не хуже 0.1 °С, а точность измерения разности  $(t_1 - t_2)$  не хуже 0.02 °С.

В соответствии с этими требованиями измерения влажности снега выполнялись в комнатных условиях, при этом после каждого измерения вода в калориметре объемом 0.4 л замещалась новой такой же порцией, взятой из резервуара объемом 10 л, находящегося в одном и том же помещении с калориметром. Измерения температуры  $t_2$  выполнялись термометром с ценой деления 0.1 °С, а разность  $(t_1 - t_2)$  измерялась термометром Бекмана с ценой деления 0.01 °С. Калибровка калориметра осуществлялась с использованием

образцов льда при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ . Вес используемых образцов снега и льда составлял 15...16 г при точности измерения 0.1 г.

В результате калибровки установлено, что теплоемкость калориметра  $C_0 = 437.5 \pm 5 \text{ кал/град}$ . Окончательно точность измерения  $\delta$  оценена по результатам серийного измерения «влажности» снега при его температуре ( $-1^{\circ}\text{C}$ ). Из-за отрицательной температуры снега измерялись отрицательные значения  $\delta$ . При среднем значении  $\delta = -1.4 \%$  среднеквадратическая погрешность составила 0.9 %. При объемной плотности снега 0.3 погрешность измерения объемной плотности воды  $m_V$  будет соответственно составлять 0.027.

### 3. Результаты измерения радиояркостной температуры тающего снега

Ниже рассматриваются экспериментальные данные по синхронным зависимостям радиояркостной температуры тающего снежного покрова в условиях солнечной погоды на частотах 37.5 и 140 ГГц, полученным в течение каждого дня 17-19 марта, и на частотах 22.2 и 37.5 ГГц, полученным в течение одного дня в марте предыдущего сезона.

На рисунке 1 показаны экспериментальные синхронные зависимости радиояркостной температуры тающего снежного покрова на частотах 37.5 и 140 ГГц, полученные 17-19 марта. Толщина покрова составляла 0.34 м, объемная плотность снега 0.3, размеры частиц льда в снеге 2...3 мм. На поверхности покрова в результате циклов таяние-замораживание формировалась крупнозернистая корка. На рис. 1 показаны также результаты измерения объемной влажности верхнего слоя покрова. Наблюдаемый разброс значений влажности обусловлен, с одной стороны, неравномерностью таяния снега в пределах исследуемого участка снега вследствие примесей, с другой стороны, малыми (можно сказать, точечными в сравнении с размерами участка) пробами снега, использованные при измерениях в калориметре.

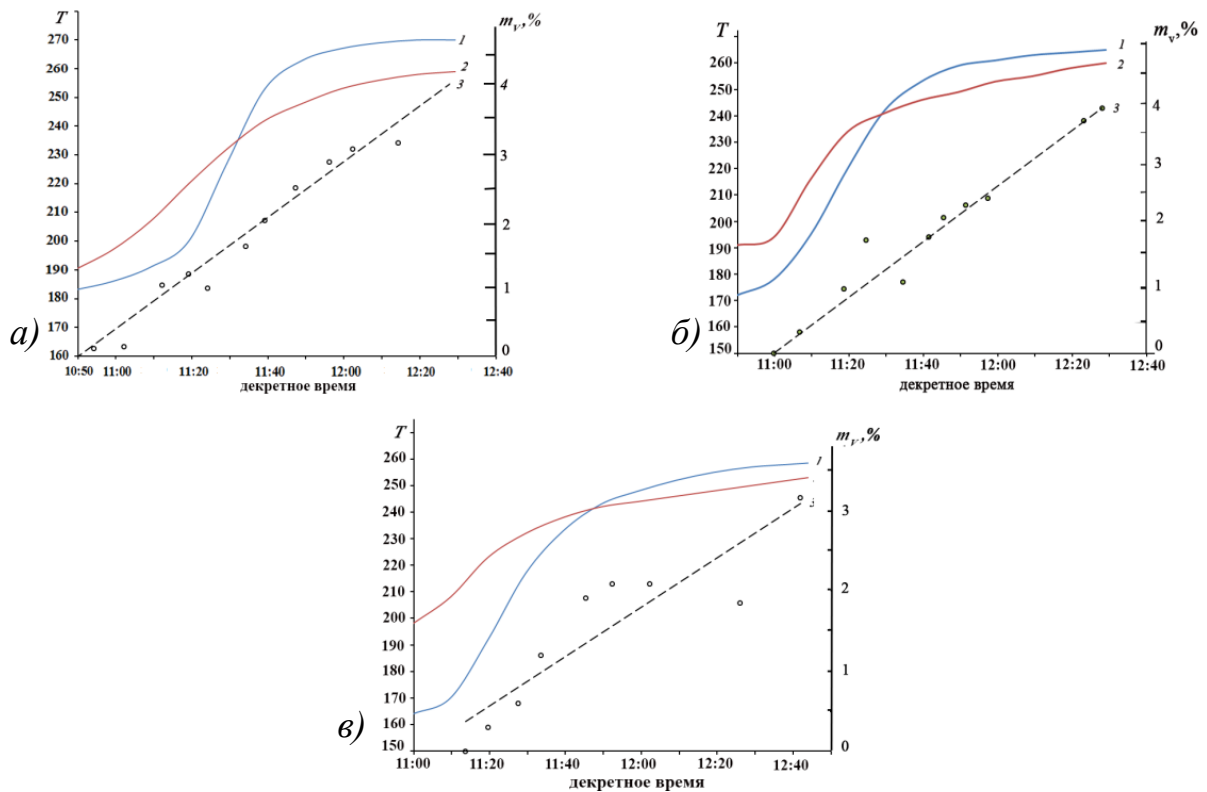


Рис. 1. Экспериментальные временные зависимости радиояркой температуры тающего снега на частотах 37.5 ГГц (1) и 140 ГГц (2) 17 марта (а), 18 марта (б) и 19 марта (в).

Дискретные символы – экспериментальные значения объемной влажности снега, пунктирные линии 3 – линии тренда.

На рис. 2 приведены все измеренные за три дня результаты измерений объемной влажности и соответствующие им линии тренда. Видно, что в первые два дня снег таял почти одинаковым образом, но в третий день таяние сместилось по времени. Во всех трех случаях наблюдается линейное по времени нарастание объемной влажности.

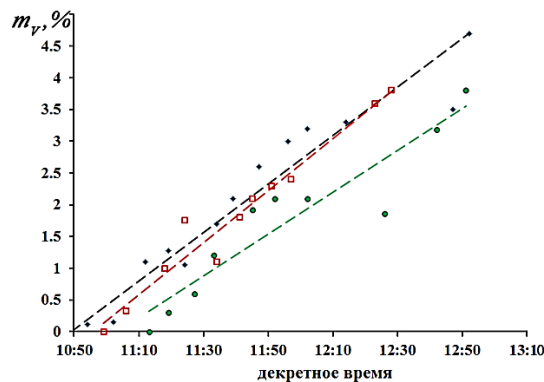


Рис. 2. Графики временной зависимости объемной влажности поверхностного слоя тающего снега: черный цвет – 17.03.82 г., красный – 18.03.82 г., зеленый – 19.03.82 г. Пунктир – линии тренда.

На рис. 3 показаны синхронные временные зависимости радиояркостной температуры на частотах 22.2 и 37.5 ГГц. Толщина покрова 0.4 м, размеры частиц льда 1.5...2 мм. Измерения объемной влажности снега не проводились. Из сравнения графиков на рис. 1 и рис. 2 следует, что крутизна нарастания радиояркостной температуры на частоте 37.5 ГГц выше, чем на частотах 140 ГГц и 22.2 ГГц. Этот факт уже отмечался в [4,13].

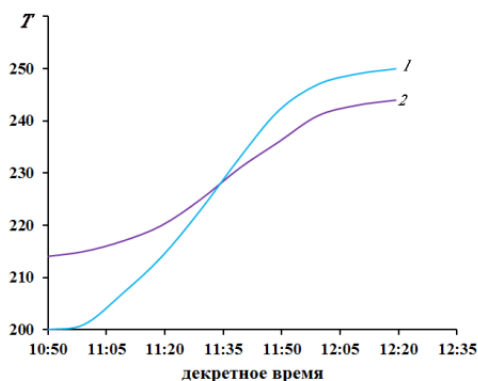


Рис. 3. Экспериментальные временные зависимости радиояркостной температуры тающего снега на частотах 37.5 ГГц (1) и 22.2 ГГц (2).

#### 4. Моделирование излучения тающего снега

Таяние снежного покрова начинается в приповерхностном слое за счет проникающей радиации и (или) за счет турбулентного теплообмена при температуре воздуха выше  $0^\circ$ . Представим тающий снежный покров в виде двухслойной среды при суммарной толщине  $h$ , в которой верхний слой толщиной  $h_0$  является тающим, а нижний толщиной  $(h - h_0)$  — сухим снегом. Используем допущение, что влияние границ между слоями и поверхностью подстилающей среды пренебрежимо мало, что допустимо при углах наблюдения от надира  $\theta \cong 0^\circ$  [14]. Тогда коэффициент отражения  $R$  снежного покрова запишется в виде:

$$R(h_0) = R_{mc}(h_0) + R_{cc}(h - h_0)\exp(-2\alpha_{mc}h_0), \quad (2)$$

где  $R_{mc}$  — коэффициент отражения тающего слоя вследствие объемного рассеяния,  $\alpha_{mc} = k_{амс} + b_{мс}$ ,  $k_{амс}$  и  $b_{мс}$  — коэффициенты ослабления, поглощения и обратного

рассеяния в тающем слое соответственно, индекс « $cc$ » относится к сухому снегу. Однако, попытки учесть первое слагаемое в (2) при обработке экспериментальных данных на всех частотах приводили к необходимости вводить аномально сильные тепловые потери в тающем слое, получая при этом значения толщины  $h_0 \ll 1$  см. Единственным приемлемым подходом оказалось принятие предположения, что эффект объемного рассеяния в тающем слое пренебрежимо мал (обоснование приводится ниже):

$$R_{mc}(h_0) \ll R_{cc}(h-h_0)\exp(-2\alpha_{mc}h_0). \quad (3)$$

В соответствии с (3) при обработке экспериментальных данных вместо (2) далее используется следующее соотношение:

$$R(h_0) = R_{cc}(h-h_0)\exp(-2k_{amc}h_0), \quad (4)$$

включающее замену коэффициента  $\alpha_{amc}$  в (2) на коэффициент  $k_{amc}$  ( $k_{amc} \gg b_{mc}$ ).

Радиояркая температура снежного покрова с однородным профилем термодинамической температуры и толщиной  $h$ , сформировавшегося на поверхности почвы, при  $\theta \cong 0^\circ$  записывается в виде:

$$T(h) = [1 - R(h)]T_n + R(h)T_a^* = T_n - R(h)(T_n - T_a^*), \quad (5)$$

где  $T_n$  – термодинамическая температура снега,  $T_a^*$  – радиояркая температура подсвечивающего излучения атмосферы [13]. Из (5) следует, что для извлечения информации о собственном излучении снега из результатов измерения радиояркой температуры  $T(h)$  необходимо дополнительно измерить температуру  $T_a^*$ . Особенностью этой радиояркой температуры является ее зависимость от индикатрисы рассеяния снега [14], что ограничивает возможность ее точного измерения.

Одним из способов исключить или ограничить влияние излучения атмосферы при извлечении информации о собственном излучении покрова является формирование при обработке экспериментальных данных



инвариантных параметров. Так, например, нетрудно убедиться, используя (5), что параметр в виде:

$$p(h_0) = \frac{[T_n - T_{cc}(h)] - [T_n - T(h_0)]}{T_n - T_{cc}(h)} = \frac{R(h_0) - R_{cc}(h)}{R_{cc}(h)} + \frac{R(h_0)\Delta T_a^*}{R_{cc}(h)(T_n - T_a^*)}, \quad (6)$$

является инвариантным к излучению атмосферы с точностью до второго слагаемого, где  $\Delta T_a^*$  – разность радиоярких температур подсвечивающего излучения атмосферы для сухого и тающего снега, которая равна нулю, если форма индикатрисы рассеяния при таянии снега сохраняется. В общем случае в условиях чистой атмосферы при таянии снега за счет сужения индикатрисы рассеяния покрова величина  $\Delta T_a^*$  возрастает от 0 до значения, равного примерно радиояркой температуре атмосферы в зенитном направлении. Однако, вместе с этим коэффициент отражения  $R(h_0)$  за счет таяния уменьшается от  $R_{cc}(h)$  до 0. Оценки показали, что при радиояркой температуре атмосферы в зените на частоте 37.5 ГГц  $T_a = 20$  К и на частоте 140 ГГц  $T_a = 50$  К второе слагаемое в (6) имеет максимальное значение не более 0.025. Далее при обработке экспериментальных данных используется параметр в виде:

$$p(h_0) = \frac{R_{cc}(h) - R(h_0)}{R_{cc}(h)}. \quad (7)$$

Подставляя (4) в (7), получим следующее выражение параметра  $p(h_0)$ :

$$p(h_0) = 1 - \exp(-2k_{амс}h_0). \quad (8)$$

Из (8) следует формула для толщины тающего слоя:

$$h_0 = -\frac{\ln[1 - p(h_0)]}{2k_{амс}}. \quad (9)$$

Коэффициент поглощения тающего снега  $k_{амс}$  возрастает за счет образования жидкой фазы воды, поэтому определяется по формуле:

$$k_{амс} = k_{acc} + \beta(f)m_v, \quad (10)$$

где значения коэффициента поглощения сухого снега  $k_{acc}$  и коэффициента пропорциональности  $\beta(f)$ , рассчитанные по теории Ми для смеси лед-вода-воздух со сферическими частицами диаметром 10мкм при ее показателе преломления 1.27 и объемной плотности 0.3, приведены в Таблице 1 для частот 22,2; 37,5; 150 ГГц.

Таблица 1. Коэффициенты пропорциональности  $\beta(f)$  зависимости коэффициента поглощения водных включений от их объемной плотности в составе смеси лед-вода-воздух с суммарной объемной плотностью 0.3.

	Частота, ГГц		
	22.2	37.5	150
$k_{acc}, \text{см}^{-1}$	0.002	0.006	0.06
$\beta, \text{см}^{-1}$	2.39	6.39	28.88

Отметим, что, как следует из данных, представленных в Таблице 1, обе величины,  $k_{acc}$  и  $\beta$ , сильно возрастают при повышении частоты.

## 5. Результаты обработки экспериментальных данных

На рис. 4 показаны графики значений эффективной толщины тающего слоя снега на частотах 37.5 и 140 ГГц, восстановленных по экспериментальным данным от 17...19 марта при использовании соотношений (7)-(9) и значений  $k_{acc}$ ,  $\beta$ , перечисленных в Таблице 1. Сравнивая друг с другом графики на частотах 37.5 и 140 ГГц, видим сходство их форм временной зависимости для каждой даты измерений. При этом видим, что графики от 18 и 19 марта слабо отличаются между собой, но сильно расходятся с графиками от 17 марта. Это расхождение обусловлено, по-видимому, тем, что распространение процесса таяния снега

в толще покрова 17 марта было медленнее, чем в последующие дни. При этом восстановленные значения максимальной эффективной толщины на каждой частоте имеют ожидаемые и близкие значения при всех трех датах измерений: на частоте 37.5 ГГц максимальные значения  $h_0 = 5...7$  см, а на частоте 140 ГГц –  $h_0 < 1$  см.

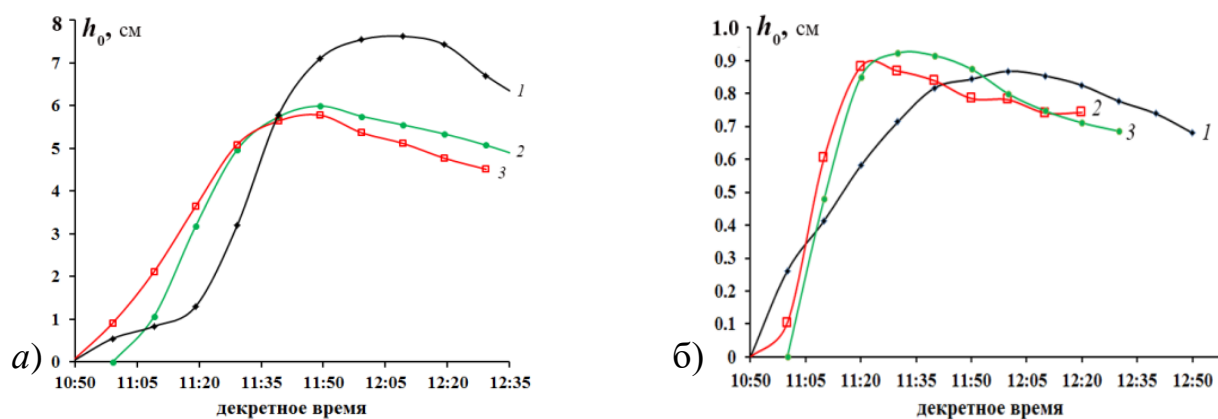


Рис. 4. Графики эффективной толщины тающего слоя снега на частотах: (а) – 37.5 ГГц и (б) – 140 ГГц, - восстановленные по экспериментальным данным от 17 марта – (кривая 1), – 18 марта (2) и 19 марта (3).

Кроме того, выполнен расчет временной зависимости радиоярких температур тающего снега по следующей формуле:

$$T(h_0) = [1 - R(h_0)]T_n + R(h_0)T_a^*, \quad (11)$$

где  $R(h_0)$  вычисляется по формулам (8)-(9) при значениях параметров  $R_{cc}$  и  $T_a^*$ , указанных в Таблице 2. Результаты расчетов практически точно совпали с исходными экспериментальными данными на рис. 1. Выбор значений радиояркой температуры подсвечивающего излучения чистой атмосферы на частоте 37.5 ГГц  $T_a^* = 40$  К и на частоте 140 ГГц  $T_a^* = 100$  К основан на типичных для ранней весны значениях радиояркой температуры атмосферы на этих частотах в зенитном направлении соответственно 20 К и 50 К при учете широкой индикатрисы рассеяния объемного рассеяния в сухом снеге [14].

Таблица 2. Восстановленные значения коэффициента отражения  $R_{cc}$  сухого снега при значениях радиояркой температуры  $T_a^*$  подсвечивающего излучения чистой атмосферы.

Дата	Параметры	Частота, ГГц	
		37.5	140
17.03.1982	$R_{cc}$	0.39	0.475
	$T_a^*, K$	40	100
18.03.1982	$R_{cc}$	0.434	0.47
	$T_a^*, K$	40	100
19.03.1982	$R_{cc}$	0.465	0.43
	$T_a^*, K$	40	100

Восстановленные таким образом значения коэффициента отражения сухого снега  $R_{cc}$  на обеих частотах оказались почти предельными для сухого снега, что может быть обусловлено крупнозернистой коркой на поверхности исследуемого покрова. Формированию корки способствовало интенсивное таяние снега. Из данных в Таблице 2 следует, что вследствие метаморфизма корки коэффициент  $R_{cc}$  на частоте 37.5 ГГц увеличивается, в то время как на частоте 140 ГГц уменьшается. В соответствии с теорией Ми это происходит вследствие увеличения эффективного размера рассеивателей [15].

На рис. 5 показаны графики восстановленных по экспериментальным данным значений эффективной толщины тающего слоя снега на частотах 22.2 и 37.5 ГГц, при использовании соотношений (8)-(10), линейной временной зависимости влажности верхнего слоя и значений  $k_{acc}$ ,  $\beta$ , перечисленных в Таблице 1.

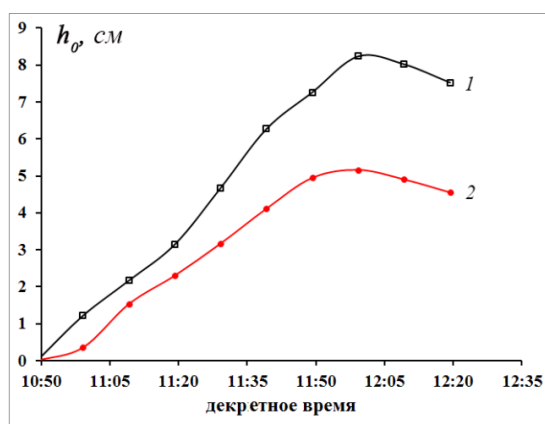


Рис. 5. Графики эффективной толщины тающего слоя снега на частотах 37.5 ГГц (кривая 1) и 22.2 ГГц (2), восстановленные по экспериментальным данным на рис. 3.

Поскольку при малых значениях объемной плотности воды ее коэффициент поглощения на частоте 22.2 ГГц ниже, чем на частоте 37.5 ГГц [16], эффективная толщина  $h_0$  тающего слоя снега ожидаемо больше именно на частоте 22.2 ГГц, при этом наблюдается тот же эффект высокой коррелированности (синхронности) временных зависимостей  $h_0$  на обеих частотах, что на частотах 37.5 и 140 ГГц. Отметим также, что максимальное значение  $h_0 = 5$  см на частоте 37.5 ГГц совпадает с оценками, полученными выше (см. рис. 4).

Экспериментальные временные зависимости радияркостной температуры тающего снега, показанные на рис. 3, также достаточно точно описываются формулами (8)-(10), но при значениях  $R_{cc}$  и  $T_a^*$ , перечисленных в Таблице 3.

Таблица 3. Восстановленные значения коэффициента отражения  $R_{cc}$  сухого снега при значениях радиояркостной температуры  $T_a^*$  подсвечивающего излучения чистой атмосферы.

	Частота, ГГц	
	22.2	37.5
$R_{cc}$	0.263	0.314
$T_a^*, K$	50	40

Из сравнения данных в Таблице 2 и Таблице 3 для частоты 37.5 ГГц следует, что коэффициент отражения сухого снега с более мелкой структурой в данном рассматриваемом случае меньше, чем для снега с коркой в предыдущем случае. Этот результат согласуется с экспериментальными данными [17].

Таким образом, результаты обработки экспериментальных данных, представляющих собой временные зависимости радиояркостной температуры тающего снега на частотах 22.2 ГГц, 37.5 и 140 ГГц, показали, что модель тающего слоя снега в виде поглощающей среды без тепловых потерь на объемное рассеяние позволяет достаточно точно воспроизводить исходные экспериментальные данные и получать оценки эффективной толщины тающего слоя на частотах 22...140 ГГц.

## 6. Радиофизическая модель тающего слоя

Выше отмечено, что попытки учесть первое слагаемое  $R_{mc}(h_0)$  в (2), при обработке экспериментальных данных на всех частотах приводили к необходимости вводить аномально сильные тепловые потери в тающем слое, получая при этом значения толщины  $h_0 \ll 1$  см. Объемное рассеяние в тающем слое может быть пренебрежимо малым в сравнении с поглощением при условии, что рассеяние на частицах льда каким-то образом оказывается крайне слабым. Одной из причин этому может быть полное заполнение пор в снеге водой, в результате чего дисперсия диэлектрической проницаемости в среде существенно уменьшается. Однако, этот вариант на начальном этапе таяния физически исключается. В ряде работ [1,2,4-7] рассматривается вариант, в котором вода присутствует в снеге наряду с жидкими включениями в виде оболочек частиц льда. Оценки, полученные для влажного снега [4], показали их слабое влияние на радиояркостную температуру и, соответственно, на интенсивность объемного рассеяния на частотах выше 7 ГГц. С другой стороны, в [10] утверждается, что модель частиц льда с оболочкой воды в снеге физически не состоятельна. Остается рассмотреть влияние влаги, которая наравне с накоплением воды в порах появляется внутри частиц льда.

Рассмотрим этот случай подробнее. Для описания экспериментального микроволнового спектра поглощения пресноводного льда в [14] использована модель смеси «сухой» лед-переохлажденная вода. Суть модели в том, что на интервале значений температуры льда 250...272 К образуются дефекты в кристаллической структуре с появлением в ней так называемых «свободных» молекул воды [18]. Оценки показали, что при температуре 272К объемная концентрация «свободных» молекул составляет 0.3 %. В соответствии с этой моделью следует ожидать, что плавление льда при температуре 273 К сопровождается не только появлением жидкой фазы воды, но и увеличением объемной концентрации «свободных» молекул  $H_2O$  (связанной воды).

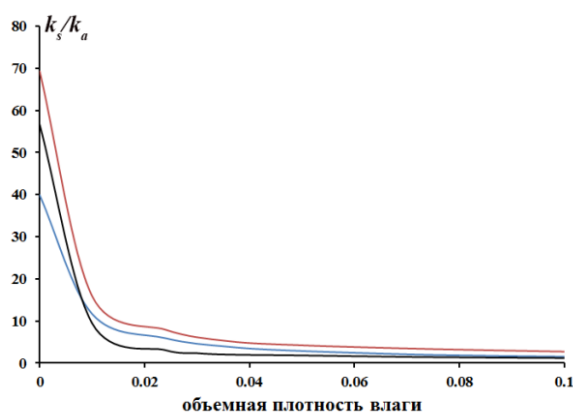


Рис. 6. Графики зависимости отношения коэффициента рассеяния  $k_s$  к коэффициенту поглощения  $k_a$  смеси «влажный лед-воздух» от объемной плотности влаги во льду на частотах 22.2 ГГц (черный), 37.5 ГГц (красный) и 150 ГГц (синий цвет). Объемная плотность влажного льда в смеси с воздухом 0.3.

На рис. 6 показаны графики зависимости отношения коэффициента рассеяния  $k_s$  к коэффициенту поглощения  $k_a$  смеси влажный лед-воздух от объемной плотности влаги во льду, рассчитанные по теории Ми на частотах 22.2 ГГц, 37.5 и 150 ГГц при диаметре частиц влажного льда 3 мм и их объемной плотности 0.3. Диэлектрические параметры влажного льда и его смеси только с воздухом (то есть без жидкой фазы воды) рассчитывались по формуле Максвелла-Гарнетта [12]. Из рис. 6 следует, что увлажнение частиц льда в снеге может приводить к существенному ослаблению эффекта объемного рассеяния, начиная с объемной плотности влаги 5 %.

Таким образом, результаты расчетов по теории Ми служат обоснованием модели тающего слоя снега в виде поглощающей среды с пренебрежимо слабым объемным рассеянием. Дополнительный учет влаги в слое за счет жидкой фазы воды усиливает обоснованность этой модели. С другой стороны, учет увлажнения частиц льда в снеге может изменить восстановленные значения толщины тающего слоя. Проблема учета – в неопределенности методики отдельного измерения влажности частиц и жидкой фазы воды в снеге, включая отсутствие данных по удельной теплоте плавления влажного льда.

## Обсуждение

В данной статье рассматривается таяние снега на начальном этапе весеннего снеготаяния в Московском регионе в условиях солнечной погоды. Это важно отметить, поскольку на снеготаяние оказывает влияние множество факторов [19,20]. Известно, что таяние снежного покрова начинается с поверхности, когда тепло поступает от атмосферного воздуха, от конденсирующегося на поверхности водяного пара, и, конечно, от солнечной радиации, которая в конце первого дня может прогреть верхний слой снега толщиной до 25 см и имеет избирательный характер из-за неравномерного распределения примесей, сильно поглощающих лучистую энергию [21]. Поток солнечной радиации, наряду с температурой воздуха, является основным фактором, определяющим характеристики снеготаяния.

Результаты выполненного в данной работе исследования дополнительно показали, что в течение первого часа таяния снега в условиях солнечной погоды, во-первых, объемная плотность жидкой фазы воды возрастает со временем линейным образом, во-вторых, толщина тающего слоя достигает значения не менее 5...7 см. Заметим, что эффективная толщина излучения влажного снега на частотах 10...36 ГГц, приведенная в [22], составляет менее 10 см, что согласуется с полученными здесь результатами.

До настоящего времени исследования зависимости радиояркостной температуры тающего снега от объемной плотности жидкой фазы воды



в микроволновом диапазоне не проводились. Известен лишь ряд работ [1-8], в которых приводятся экспериментальные зависимости радиояркой температуры снега от температуры приземного слоя атмосферы, свидетельствующие, что при положительных температурах воздуха радиояркая температура снега возрастает почти до 273 К. Особый интерес представляют экспериментальные данные на длине волны 0.87 мм [3], полученные в условиях высокогорья. Наблюдение в весенние дни за изменением уровня излучения снега показало слабое изменение его альбедо (не более 25 %) при переходе от замороженного состояния к тающему. К сожалению, измерения влажности снега не проводились, также как неизвестны параметры структуры снега.

В качестве интерпретации этому явлению может служить «парниковый эффект», возникающий в солнечную погоду при температуре воздуха ниже нуля [23]. Таяние начинается не сверху, а в глубине снежного покрова под поверхностной прозрачной ледяной пленкой. Не исключено также, что этому явлению способствовало интенсивное испарение снега в высокогорье вследствие значительной солнечной радиации, высокого дефицита влажности, низкого атмосферного давления и сравнительно высокой температуры воздуха [20].

## **Заключение**

В данной работе в условиях солнечной погоды на равнине выполнено исследование формирования теплового излучения тающего зернистого снега на частотах 22.2 ГГц, 37.5 и 140 ГГц. Результаты измерения влажности верхнего слоя снежного покрова показали ее линейное по времени нарастание в течение первого часа таяния снега. Предложена и обоснована модель тающего слоя снега в виде поглощающей среды с пренебрежимо слабым объемным рассеянием вследствие объемного увлажнения частиц льда. Возрастание радиояркой температуры тающего снега обусловлено увеличением вклада собственного излучения тающего слоя и экспоненциальным ослаблением в тающем слое

вклада излучения нижележащего сухого снега. Восстановление толщины тающего слоя на основе разработанной модели показало, что предельное значение радиояркостной температуры тающего крупнозернистого снежного покрова, близкое к 273 К, достигается при толщине слоя 1 см на частоте 140 ГГц, 5...7 см на частоте 37.5 ГГц и 8 см на частоте 22.2 ГГц.

Для полноты описания влияния таяния снега на радиояркостную температуру снежного покрова необходимо разработать методику отдельного измерения объемных плотностей жидкой фазы воды и влажности частиц льда (связанной воды).

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

### Литература

1. Boyarskii D. A. et al. Inclusion of scattering losses in the models of the effective permittivity of dielectric mixtures and applications to wet snow //Journal of electromagnetic waves and applications. – 1994. – Т. 8. – №. 11. – С. 1395-1410. <http://doi.org/10.1163/156939394X00281>
2. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V. Microwave effective permittivity model of media of dielectric particles and applications to dry and wet snow //Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 1994. – Т. 4. – С. 2065-2067. <http://doi.org/10.1109/IGARSS.1994.399652>
3. Kuznetsov I. V., Fedoseev L. I., Shvetsov A. A. Snow cover radiometry in the near millimeter wavelength range //Radiophysics and quantum electronics. – 1997. – Т. 40. – №. 9. – С. 745-752. <https://doi.org/10.1007/BF02676525>
4. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V. Modeling VHF emissivity of snow cover with account of its stratigraphy //Radiophysics and Quantum Electronics. – 1999. – Т. 42. – №. 9. – С. 742-752. <http://doi.org/10.1007/BF02676860>
5. Cagnati A. et al. Study of the snow melt–freeze cycle using multi-sensor data and snow modeling //Journal of Glaciology. – 2004. – Т. 50. – №. 170. – С. 419-426. <https://doi.org/10.3189/172756504781830006>

6. Macelloni G. et al. Monitoring of melting refreezing cycles of snow with microwave radiometers: The Microwave Alpine Snow Melting Experiment (MASME<sub>x</sub> 2002-2003) //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – Т. 43. – №. 11. – С. 2431-2442. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2005.855070>
7. Tedesco M. et al. Brightness temperatures of snow melting/refreezing cycles: Observations and modeling using a multilayer dense medium theory-based model //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2006. – Т. 44. – №. 12. – С. 3563-3573. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2006.881759>
8. Pan J., Jiang L., Zhang L. Wet snow detection in the south of China by passive microwave remote sensing //2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Ieee, 2012. – С. 4863-4866. <http://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352523>
9. Ulaby F. T., Stiles W. H. Microwave response of snow //Advances in Space Research. – 1981. – Т. 1. – №. 10. – С. 131-149. <https://doi.org/10.1029/JC085iC02p01037>
10. Colbeck S.C. The geometry and permittivity of snow at high frequencies //Journal of Applied Physics. – 1982. – Т. 53. – №. 6. – С. 4495-4500. <http://doi.org/10.1063/1.331186>
11. Ulaby F., Moore R., Fung A. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, vol. 3, Artech House //Inc., Norwood, Massachusetts. – 1986.
12. Sihvola A.H. Electromagnetic mixing formulas and applications. – Iet, 1999. – №. 47.
13. Голунов В.А. Спектральные особенности теплового излучения тающего снежного покрова // XIV Всес. конф. по распр. р/волн. Тезисы докладов, часть 2. - Ленинград, 1982. - С. 193-195.
14. 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.
15. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – Мир, 1981. – Т. 1. – С. 280.

16. Wiesmann A., Mätzler C. Microwave emission model of layered snowpacks //Remote sensing of environment. – 1999. – Т. 70. – №. 3. – С. 307-316. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00046-2](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00046-2)
17. Голунов В.А. Спектральная зависимость коэффициента поглощения микроволнового излучения в тающем снеге // Журнал радиоэлектроники. - 2024 (в печати).
18. Самойлов О.Я. Об исследованиях структуры воды //Ж. струк. Химии. – 1963. - №4. - С. 499-501.
19. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. – Гидрометеиздат, 1961.
20. Долов М.А., Халкечев В.А. Физика снега и динамика снежных лавин //Л.: Гидрометеиздат. – 1972.
21. Кузьмин П.П. Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов. – Гидрометеиздат, 1960.
22. Elachi C., Van Zyl J.J. Introduction to the physics and techniques of remote sensing. – John Wiley & Sons, 2021.
23. Дюнин А.К. В царстве снега. / Отв. ред. П. И. Мельников. — Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1983.

**Для цитирования:**

Голунов В.А. Модель излучения тающего снежного покрова в микроволновом диапазоне. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. –№ 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.8>