

ВВЕДЕНИЕ

Развитие и внедрение геоинформационных технологий открывает большие перспективы достоверного и оперативного анализа состояния окружающей среды. Мониторинг снежного покрова с применением соответствующих методов интерпретации данных имеет большое практическое значение. Определение пространственно-временных особенностей распределения снежного покрова во взаимосвязи с климатическими, гидрологическими и орографическими элементами природной среды позволяет, например, прогнозировать развитие паводковой обстановки, оценивать состояние лавинной опасности. Гляциологические методы наблюдения не всегда позволяют решить эту задачу, кроме того, во многих районах эти наблюдения связаны с огромными техническими трудностями и являются небезопасными, например, в местах формирования лавин. Наиболее применимыми методами мониторинга являются дистанционные методы исследования состояния снежного покрова. Среди них — исследования снежного покрова в СВЧ-диапазоне с целью восстановления физических характеристик снежной среды по ее радиофизическим параметрам [1].

Радиояркость температура снежного покрова сильно зависит от его физических параметров: плотности, толщины, влажности, размера ледяных зерен и дисперсии их размеров. Характер этой зависимости определяется стратиграфией снежной толщи [2, 3].

Снижение радиояркости температуры системы почва — снег — атмосфера на частоте $f = 19,5$ ГГц и особенно для $f = 37,5$ ГГц в течение одной зимы вследствие роста среднего размера кристаллов льда в течение сезона, сглаживание зависимости радиояркости температуры на частоте $f = 3,95$ ГГц от угла визирования в результате появления слоя глубинной изморози, различный вид частотных зависимостей радиояркости температуры снега при различной структуре снежного покрова [4, 5] — это только несколько примеров, показывающих, какое значительное влияние стратиграфия снежного покрова оказывает на его микроволновый сигнал.

Таким образом, для надежной интерпретации данных дистанционного зондирования необходим учет слоистости и структуры снега. Количественное восстановление физических параметров снежного покрова по данным дистанционного зондирования требует создания электродинамической модели снежного покрова, позволяющей описать его излучательную способность с учетом стратиграфии.

С электродинамической точки зрения снег представляет собой сильно рассеивающую среду, состоящую из дискретных плотноупакованных рассеивателей — зерен льда. Микроволновое излучение, проходящее сквозь снежную толщу, поглощается и рассеивается снежными кристаллами. Однако в настоящее время отсутствует общая теория взаимодействия электромагнитного излучения со средой из плотноупакованных рассеивателей [6].

Излучательная способность снежного покрова чаще всего определяется путем решения уравнения переноса излучения. Существует два подхода к способам представления неоднородной среды, которой является снежный покров, и, следовательно, к методам расчета коэффициентов уравнения переноса излучения. В одном случае рассеивающая среда рассматривается как непрерывное объемно-неоднородное пространство [см., например, 7], в другом — состоит из дискретных некоррелированных и когерентно невзаимодействующих рассеивателей. В качестве рассеивателей принимают: для сухого снега — зерна льда [4, 8, 9], для влажного снега — зерна льда, покрытые пленкой воды [10, 11, 12], или смесь зерен льда и водяных капель различного радиуса [12].

Отметим, что, несмотря на отсутствие общей теории, некоторые модели излучательной способности сухого снежного покрова показывают соответствие экспериментальным результатам [13, 14]. Однако данные модели не исчерпывают многообразия состояний снежной среды. Появление влаги во время таяния приводит к значительному изменению ее физических и, следовательно, радиофизических характеристик.

Одной из причин расхождения экспериментальных и теоретических результатов [см., например, 12] является, на наш взгляд, усреднение реальной стратиграфии снежного покрова, когда она заменяется одним или двумя слоями путем усреднения параметров слоев. Это заключение совпадает с результатами работы [15], где на

конкретных примерах показано, что большинство физических свойств снежного покрова прямо зависит от его слоистой структуры, наличия отчетливых горизонтов в толще. Использование усредненных по всей толще характеристик снега, как отмечается в [15], может привести к неверной интерпретации данных дистанционного зондирования. В этом смысле более строгими являются электродинамические модели сухого снежного покрова, предложенные в работах [9, 13, 14], учитывающие структурные и стратиграфические особенности снежного покрова. В работах [9, 14] исследовалось влияние распределения зерен льда по размерам на излучательные характеристики снежного покрова. Анализ результатов данных работ показывает, что яркостная температура снега сильно зависит от его статистических характеристик — среднего размера и дисперсии размеров ледяных зерен. Авторы [9, 14] отмечают, что излучательная способность снежного покрова, рассчитанная с учетом распределения зерен по размерам, существенно отличается от случая, когда распределение не учитывалось. Значительный рост радиояркостной температуры в коротковолновой части СВЧ-диапазона, вызываемый распределением размеров частиц, отражает, по мнению авторов [9, 14], тот факт, что по мере роста дисперсии вклад в поглощение за счет мелких частиц возрастает, в то время как влияние крупных зерен не приводит к заметному эффекту, поскольку их альбедо стремится к своему предельному значению.

Главной задачей настоящей работы являлось построение структурно-зависимой модели излучательной способности снежного покрова на почве. Восходящее и нисходящее излучение внутри снежного слоя предполагалось диффузным и использовалась двухпоточковая теория Кубелки и Мунка [18]. Снежный покров представлялся средой состоящей из льда и воздуха — в случае сухого снега и льда, воздуха и воды — в случае влажного снега. Включения льда и воды предполагались сферической формы с логарифмически-нормальным распределением по размерам. Мы моделировали влажный снег двумя способами: модель I — воздушная среда, содержащая ледяные зерна и капли воды, модель II — воздушная среда, содержащая ледяные зерна, покрытые пленкой воды, и капли воды. Каждому случаю пространственного распределения водной компоненты соответствуют свои эффективные коэффициенты поглощения и рассеяния.

Расчеты радиояростной температуры снежного покрова на почве проведены с использованием данных гляциологических измерений его стратиграфии и структуры. Результаты расчетов сопоставлены с результатами измерений $T_{\text{Я}}$ снежного покрова, которые проводились при одновременном контроле за физическими параметрами снега.

1. МОДЕЛЬ

Микроволновое излучение снежного покрова, лежащего на поверхности земли, определяется, в основном, вкладом двух компонент: излучением слоя снега и излучением подстилающей поверхности. Оба вклада подвергаются влиянию границ раздела воздух – снег и снег – земля, а также поглощению и рассеянию снежной толщей. Преобладание эффектов рассеяния или поглощения электромагнитного излучения в снежном покрове определяется длиной волны излучения и размерами ледяных кристаллов, образующих снежный покров. Экспериментальные исследования и расчеты по теории Ми [18] показывают, что эффекты рассеяния излучения преобладают над потерями на частотах выше 10 ГГц (при размерах зерен льда 1 мм) [16, 17]. В этой ситуации, когда рассеяние доминирует над поглощением, естественно описывать формирование и распространение излучения в среде с помощью уравнения переноса излучения [см., например, 18].

Рассмотрим модель излучательной способности $\kappa = T_{\text{Я}}/T_0$ на основе теории переноса излучения. В двухпоточковом приближении теории переноса излучения получено [18]:

$$\begin{aligned}dT_+ / d\tau &= -(K + S)T_+ + ST_- + KT_0, \\dT_- / d\tau &= (K + S)T_- - ST_+ - KT_0, \\K &= 2(1 - \omega_0) = 2\sigma_a / \sigma_t, \quad S = (\omega_0 - \omega_1 / 4),\end{aligned}\tag{1}$$

где T_- и T_+ — радиояростные температуры, соответствующие потокам энергии, распространяющейся вверх и вниз; T_0 — физическая температура снежного покрова; $d\tau = n\sigma_t ds$ — оптическая толщина; n — число частиц в единице объема; K и S — безразмерные

эффективные коэффициенты поглощения и рассеяния; σ_a и σ_t — сечения поглощения и экстинкции, соответственно; ω_0 — альbedo рассеивателя; ω_1 — первый коэффициент разложения фазовой функции рассеивателя в двойной ряд по полиномам Лежандра. Сечения поглощения и экстинкции отдельного рассеивателя вычисляются по теории Ми. Считая, что среда плоскопараллельна, запишем граничные условия для слоя снега на поверхности земли:

$$\begin{aligned}T_+(0) &= (1 - R_1)T_H + T_-(0)R_1, \\T_-(\tau_0) &= R_2T_+(\tau_0) + (1 - R_2)T_{\text{П}},\end{aligned}$$

где R_1, R_2 — коэффициенты отражения на границах воздух – снег, снег – земля, соответственно; T_H — яркостная температура неба; $T_{\text{П}}$ — яркостная температура почвы. Распределение размеров (r) ледяных зерен учитывается при определении переменных K, S, σ_t :

$$K = \int_0^{\infty} K(r)\phi(r)dr, \quad S = \int_0^{\infty} S(r)\phi(r)dr, \quad \sigma_t = \int_0^{\infty} \sigma_t(r)\phi(r)dr,$$

где $\phi(r)$ — плотность вероятности логарифмически-нормального распределения.

Появление влаги в снежном покрове во время таяния приводит к значительному изменению ее физических и, следовательно, радиофизических характеристик. Для правильного описания взаимодействия электромагнитного излучения с влажной снежной средой необходимо знать пространственное распределение водной компоненты. Однако этот вопрос в настоящее время изучен недостаточно хорошо. Известно, что вода собирается в снежных порах и образует мениски между ледяными зернами [19]. Исходя из этого, мы предложили две модели влажного снега: модель I — воздушная среда, в которой расположены сферические ледяные зерна и капли воды, модель II — воздушная среда, в которой расположены сферические ледяные зерна, покрытые оболочкой воды, а также сферические капли воды. Вопросы распределения воды в виде оболочек и по воздушным порам, нахождения концентрации, размеров и дисперсии размеров водяных капель обсуждались нами в работах [20, 21], поэтому мы не будем на них останавливаться.

произвольного угла зондирования зависимость интегрального поглощения ξ от зенитного угла θ в плоскостом приближении аппроксимируется соотношением [25]

$$\xi = \begin{cases} \xi \sec \theta, & 0 \leq \theta < 0,4\pi, \\ \xi \sec(0,4\pi), & 0,4\pi \leq \theta < \pi/2. \end{cases}$$

Радиояркостная температура почвы определялась из следующего выражения:

$$T_{II} = (1 - R)T_{\phi},$$

где R — коэффициент отражения по мощности на границе снег — земля; T_{ϕ} — физическая температура почвы.

2. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для решения вопроса о применимости предложенных моделей и изучения связи физических характеристик снежного покрова с его радиояркостной температурой нами был проведен комплексный наземный эксперимент, в ходе которого одновременно определялись физические и радиофизические характеристики снежного покрова. Радиометры, работающие на частотах 3,95; 19,5; 37,5 и 150 ГГц, использовались для измерения радиояркостной температуры. Детальное исследование структуры снежного покрова, его влажности, размеров ледяных зерен проводилось стандартными гляциологическими методами.

Используя данные измерений физических параметров и микроструктуры снежного покрова, мы провели расчет радиояркостной температуры сухого и влажного снега по нашей модели излучательной способности и сопоставили результаты расчетов с результатами радиометрических измерений. Для сравнительного анализа были выбраны дни, когда проводились послойные измерения как плотности и температуры, так и параметров структуры снежного покрова. Физические параметры снега определялись как функция высоты от уровня почвы в середине каждого слоя снежной толщи. Для каждого слоя снега определялась гистограмма рас-

пределения размеров зерен льда. При расчетах эти данные аппроксимировались логарифмически-нормальным распределением со статистическими характеристиками (средний размер и дисперсия размеров), полученными для гистограмм.

А. Расчет радиояркостной температуры сухого снежного покрова

Радиояркостную температуру сухого снежного покрова, лежащего на почве, мы рассчитывали путем решения системы $2n$ линейных уравнений (3) для структуры, содержащей n слоев. Для сухой снежной среды эффективные коэффициенты поглощения и рассеяния и выражаются через сечения поглощения, экстинкции и альbedo ледяных зерен соответствующего слоя.

Нами проведено сравнение экспериментальных и рассчитанных по двухпоточковой модели радиояркостных температур сухого снежного покрова за два сезона измерений 1987–1988 и 1989 гг. Характеристики снежного покрова, а также температура воздуха для выбранных 12 дней измерений представлены в табл. 1. Для каждого слоя толщиной h даны его физическая температура T_0 , плотность ρ , средний радиус ледяных зерен r и дисперсия σ . Расположение строк в каждой ячейке соответствует расположению слоев снежного покрова.

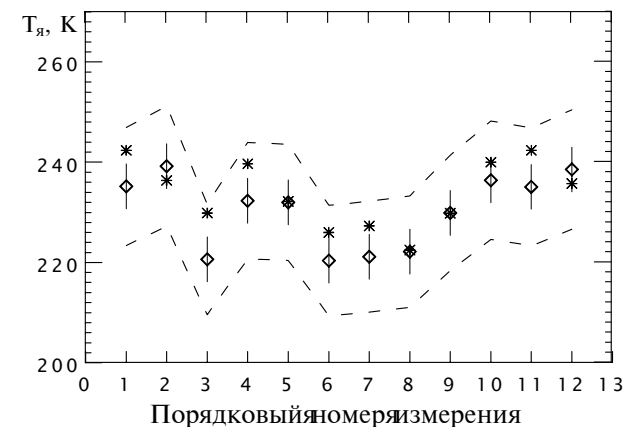


Рис. 1. Рассчитанные по модели (*) и экспериментальные значения (\diamond) радиояркостной температуры сухого снежного покрова

Табл. 1. Характеристики сухого снежного покрова

№ п/п	Дата / $t_{\text{возд.}}$, °C	h_n , см	T_0 , К	ρ , г/см ³	r , см	σ , %
1	03.12.87 / -0,6	14	268	0,299	0,036	34
		10	267	0,370	0,080	27
		27	269	0,320	0,038	33
2	07.01.88 / -5,3	43	266	0,144	0,016	32
		40	268	0,170	0,019	28
		25	270	0,350	0,040	30
3	17.01.88 / -9,0	45	264	0,210	0,019	30
		35	269	0,283	0,027	26
		24	271	0,320	0,044	28
		32	272	0,370	0,045	28
4	26.01.88 / -11,2	31	271	0,081	0,005	37
		49	269	0,255	0,016	31
		50	267	0,342	0,022	29
		23	271	0,328	0,030	27
		22	272	0,393	0,047	31
5	17.02.88 / -10,8	26	264	0,200	0,007	27
		16	267	0,414	0,017	35
		32	269	0,310	0,039	34
		40	270	0,340	0,031	30
		42	272	0,397	0,056	29
6	24.02.88 / -8,0	66	270	0,144	0,007	32
		18	270	0,227	0,009	29
		12	270	0,331	0,022	24
		70	271	0,381	0,036	30
		42	272	0,376	0,051	31
7	03.03.88 / -8,0	40	270	0,087	0,002	35
		35	270	0,191	0,016	36
		39	271	0,327	0,021	32
		63	271	0,374	0,039	36
		43	272	0,356	0,075	35
8	16.03.88 / -5,7	23	272	0,220	0,008	33
		42	270	0,260	0,016	30
		65	270	0,370	0,029	27
		40	271	0,430	0,041	28
		35	272	0,360	0,072	33
9	10.01.89 / -8,8	9	262	0,050	0,005	35
		10	265	0,280	0,008	33
		55	266	0,300	0,023	29
		64	269	0,400	0,034	29
10	24.01.89 / -9,6	50	264	0,330	0,022	34
		50	269	0,436	0,031	33
		20	271	0,500	0,039	30
11	29.01.89 / -11,2	50	264	0,337	0,020	32
		70	270	0,466	0,043	30
12	14.02.89 / -13,8	53	261	0,290	0,015	27
		51	265	0,400	0,042	30
		16	269	0,300	0,062	33

На рис. 1 представлены рассчитанные по нашей модели и экспериментальные значения радиояростной температуры снежного покрова для частоты $f = 19,5$ ГГц. Вертикальными линиями показана погрешность измерения. Пунктирные линии соответствуют 5%-му отклонению от экспериментальных значений. Как видно из рис. 1, различия между экспериментальными и модельными значениями радиояростной температуры не превышают 5 %.

Б. Расчет радиояростной температуры влажного снежного покрова

Радиояростная температура влажного снега определялась также путем решения системы уравнений (3) при условии, что эффективные коэффициенты поглощения и рассеяния K_n и S_n определяются выражениями (2), которые соответствуют либо среде, состоящей из ледяных зерен и водяных капель, либо среде из ледяных зерен с оболочкой воды и водяных капель. Входными параметрами моделей, как и в случае сухого снега, являлись данные гляциологических измерений физических характеристик и микроструктуры слоев снежного покрова. Реальная гистограмма распределения размеров ледяных зерен аппроксимировалась логарифмически-нормальным распределением. В качестве примера на рис. 2 приведены гистограмма распределения ледяных зерен одного из слоев толщи снежного покрова, а также логарифмически-нормальная функция с параметрами, полученными из гистограммы (средний диаметр ледяных зерен $d_{cp} = 1,06$ мм, дисперсия размеров ледяных зерен $\sigma = 29,11$ %).

Для сравнения экспериментальных данных с результатами расчетов мы выбрали те из измеренных нами временных зависимостей радиояростной температуры снежного покрова на почве, которые были получены при одновременном контроле за состоянием снежной толщи в различные моменты времени выбранного ряда наблюдений. Один из таких рядов наблюдений, проведенный на частотах $f = 3,95; 19,5; 37,5; 150$ ГГц с 17:00 21.03.89 до 8:00 22.03.89, приведен на рис. 3. За время наблюдений температура воздуха понизилась от 0 до $-5,5$ °C (рис. 4), что привело к вымораживанию верхних слоев снежного покрова и значительному падению их влажности. За изменением влажности верхних слоев снега, в период проведения наблюдений, можно проследить по табл. 2, в которой приведены

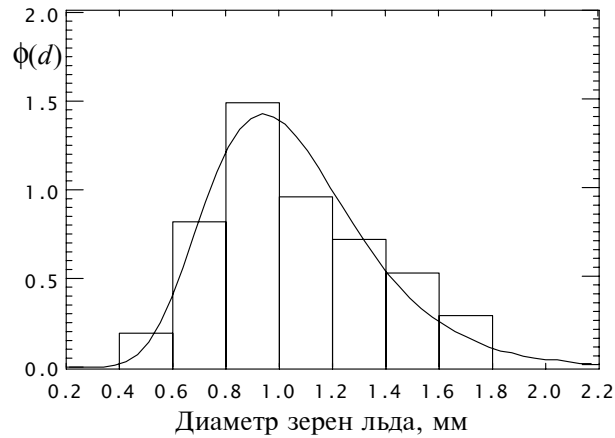


Рис. 2. Гистограмма и логарифмически-нормальная функция распределения размеров ледяных зерен в одном из слоев снежной толщи

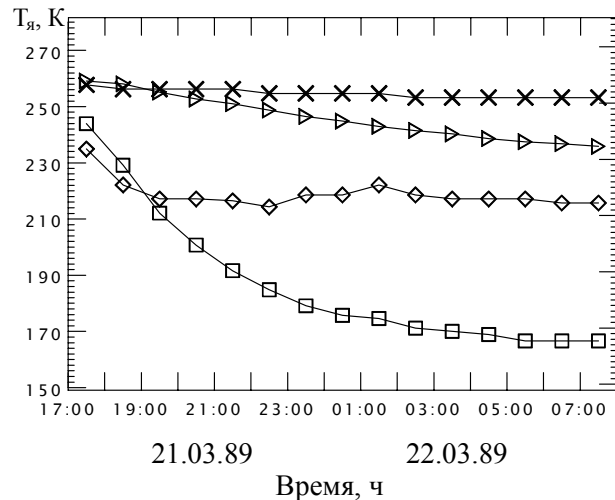


Рис. 3. Экспериментальные зависимости радиояркой температуры влажного снежного покрова от времени при уменьшении влажности верхних слоев снега на частотах (ГГц): 3,95 — (×); 19,5 — (▷); 37,5 — (◻); 150 — (◊)

физические параметры снежного покрова, определявшиеся в 18:00, 21:00 21.03.89 и в 7:00 22.03.89, где влажность есть объемная влажность снежного слоя, ρ — его плотность и r — средний радиус ледяных зерен. Температура почвы равнялась 0°C за все время проведения данного ряда измерений. Уменьшение влажности верхних слоев снежной толщи вызвало падение радиояркой температуры на частотах 19,5; 37,5 и 150 ГГц и практически не отразилось на $T_{я}$ на частоте 3,95 ГГц (см. рис. 3). Отметим, что радиометрическая чувствительность к изменению влажности снежного покрова значительно выше на частоте $f = 3,95$ ГГц, чем на частотах 3,95; 19,5 и 150 ГГц.

Табл. 2. Физические параметры влажного снега 21-22.03.89

Номер слоя	Толщина слоя, см	Влажность, %			Температура, $^\circ\text{C}$			ρ , г/см ³	r , см
		18:00	21:00	7:00	18:00	21:00	7:00		
1	13	5,3	3,9	0,0	0,0	-0,5	-3,5	0,364	0,13
2	40	7,1	6,4	6,1	0,0	-0,3	-1,0	0,430	0,05
3	30	6,7	6,7	6,7	0,0	0,0	0,0	0,430	0,04
4	30	2,8	2,8	2,8	0,0	0,0	0,0	0,430	0,04

На рис. 5 (а–в) приведены частотные зависимости $T_{я}$, полученные экспериментально (◊) и рассчитанные по моделям I и II на три момента проведения измерений: (а) — 18:00 21.03.89; (б) — 21:00 21.03.89; (в) — 7:00 22.03.89 с учетом и без учета отражения излучения на границах слоев. Их сравнение показывает хорошее согласие между экспериментальными и теоретическими значениями радиояркой температуры на всех частотах измерений. Как видно из графиков, зависимости, полученные по моделям I и II, практически совпадают между собой на частотах выше 7 ГГц и существенно отличаются на более низких частотах. Эти различия, на наш взгляд, связаны с особенностями структурного представления снежной среды в предложенных моделях. Поскольку диэлектрическая проницаемость воды гораздо выше диэлектрической проницаемости

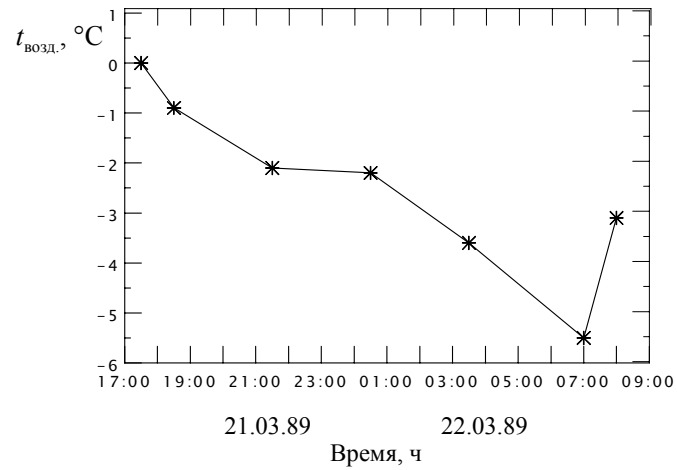


Рис. 4. Изменение температуры воздуха в период проведения эксперимента

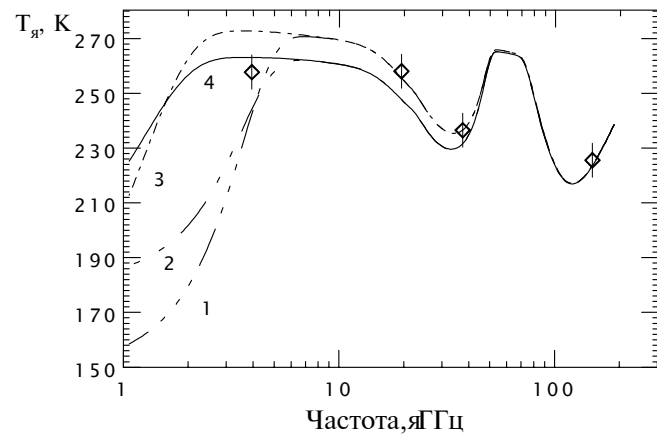


Рис. 5а. Экспериментальные (\diamond) и рассчитанные по моделям I и II зависимости радиояростной температуры влажного снежного покрова: 1 и 2 — расчет по модели I без учета и с учетом отражения излучения на границах слоев, соответственно; 3 и 4 — расчет по модели II без учета и с учетом отражения излучения на границах слоев; 18:00 21.03.89

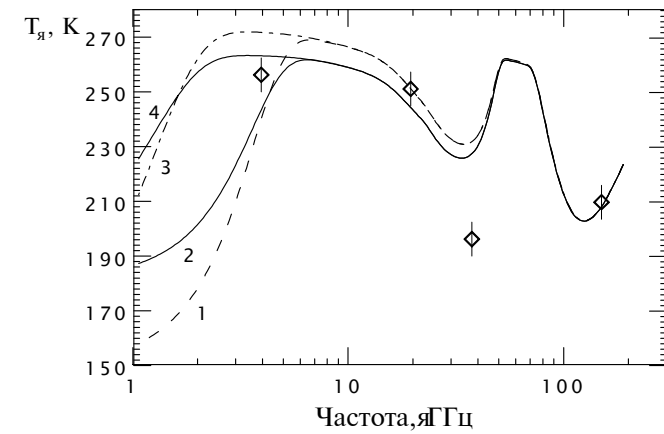


Рис. 5б. То же, что на рис. 5а; 21:00 21.03.89

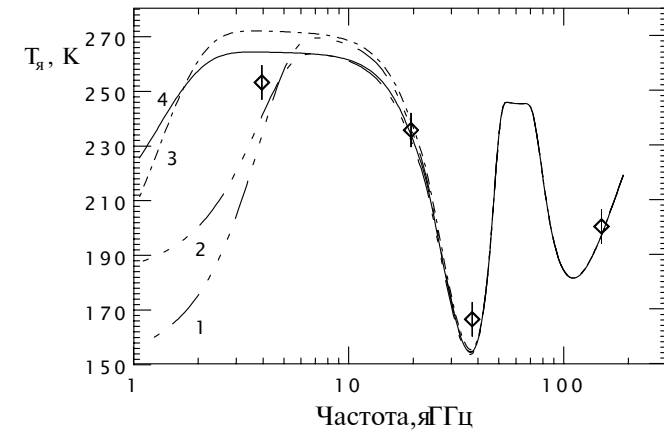


Рис. 5в. То же, что на рис. 5а; 07:00 22.03.89

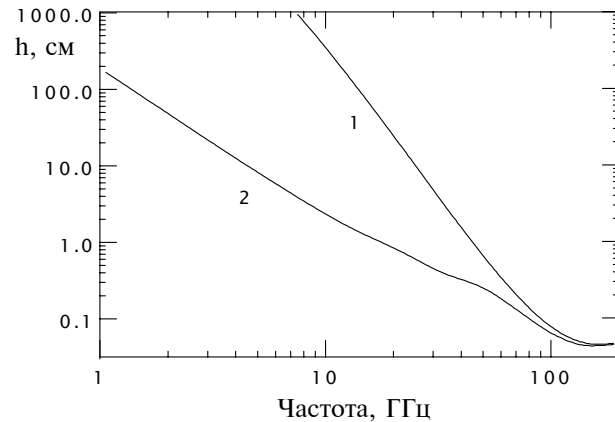


Рис. 6. Зависимость глубины формирования излучения от частоты для сухого (1) и влажного (2) снежных покровов

льда во всем рассматриваемом интервале частот, то ее объемное содержание и пространственное распределение в снегу в первую очередь и определяет величину радиояркостной температуры снежного покрова. На высоких частотах глубина формирования излучения составляет доли сантиметра (рис. 6), и пространственное распределение влаги (капли, оболочки и их размеры) не дает существенного вклада в $T_{я}$ снежного покрова, а все определяется только объемным содержанием воды в снегу. Напротив, на частотах ниже 7 ГГц глубина формирования излучения составляет единицы и десятки сантиметров (см. рис. 6), и здесь значительный вклад в радиояркостную температуру снежного покрова вносит пространственное распределение воды в снегу. Как видно из графиков (см. рис. 5), зависимость, полученная по модели II, где снежная среда представляется в виде частиц льда с оболочкой воды и капель воды, лежит значительно выше зависимости, полученной по модели I, в которой снег представляется в виде частиц льда и капель воды, поскольку частицы льда с оболочкой вносят больший вклад в поглощение излучения чем просто частицы льда. Таким образом, по экспериментальным значениям $T_{я}$ на частотах 2–6 ГГц, на основе предложенных моделей, можно судить не только об объемном содержании влаги в снежном покрове, но и сделать вывод о ее распределении

в виде капель или оболочек зерен льда. Несовпадение $T_{я}$ на частоте $f = 37,5$ ГГц в 21:00 21.03.89 связано, на наш взгляд, с погрешностями определения параметров снежного покрова на данный момент времени, что при быстром падении радиояркостной температуры (см. рис. 3) в момент вымораживания верхних слоев снега привело к несовпадению экспериментального и рассчитанного значения $T_{я}$. Пик на теоретической зависимости в области 60 ГГц обязан линии поглощения кислорода.

На рис. 7а, б представлены экспериментальные значения и частотные зависимости $T_{я}$, рассчитанные по модели II на два момента проведения измерений: в 18:00 21.03.89 (а) и в 7:00 22.03.89 (б), (пунктирная линия). Здесь же приведены теоретические зависимости $T_{я}$, рассчитанные по модели II (сплошная линия), при условии, что слоистая структура снежного покрова игнорируется, и снежная толща представляется одним слоем со средними характеристиками:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i},$$

где \bar{x} — усредняемый параметр, n — число слоев, h_i — толщина слоя. Приведенные на рис. 7 два момента измерений выбраны неслучайно: в 18:00 21.03.89 влажность верхнего слоя снега составляла 5,3 %, а в 7:00 22.03.89 из-за падения температуры воздуха произошло вымораживание верхнего слоя и его влажность равнялась нулю (см. табл. 2). В случае ненулевой влажности верхнего слоя, замена реальной структуры снежного покрова на один слой со средними физическими параметрами не приводит к существенному изменению $T_{я}$. Напротив, при вымораживании верхнего слоя снега глубина формирования излучения превышает его толщину почти во всем диапазоне частот и различия $T_{я}$ для слоистой и усредненной структуры значительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты показали, что совпадение экспериментальных и теоретических зависимостей $T_{я}$ сухого и влажного снега

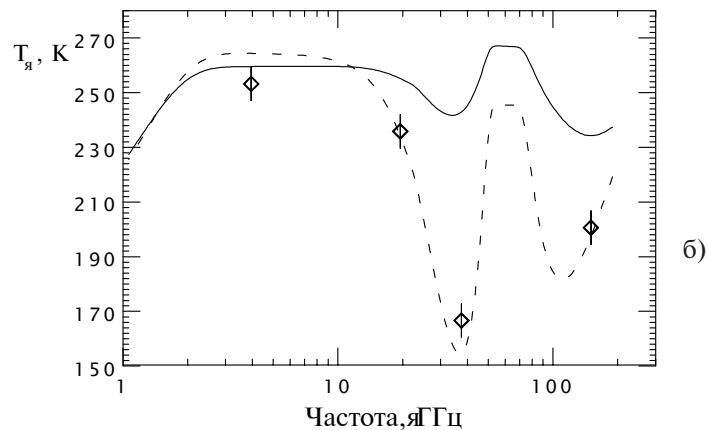
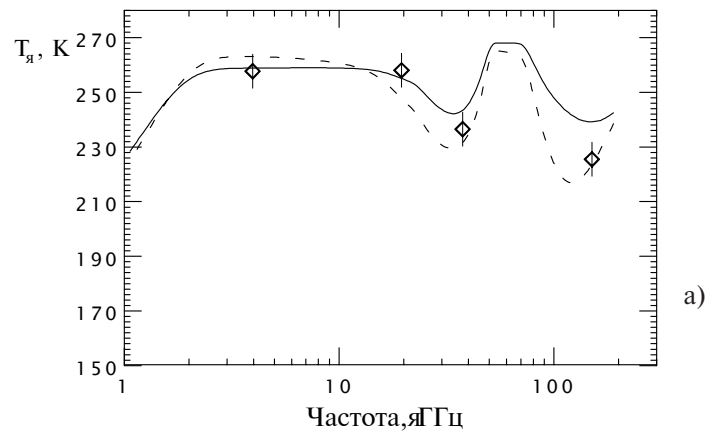


Рис. 7. Экспериментальные (\diamond) и рассчитанные по модели II зависимости радиояростной температуры влажного снежного покрова с усредненными (сплошная линия) и не усредненными (пунктирная линия) структурными параметрами снега: а) — 18:00 21.03.89; б) — 7:00 22.03.89

от частоты достигается при учете микроструктуры и слоистости снежного покрова. Радиояростная температура сухого снежного покрова, определенная по двухпотоковой модели, совпадает с точностью до 5 % с экспериментальными данными. Анализ результатов расчетов радиояростной температуры влажного снежного покрова показывает, что согласие с экспериментальными результатами определения $T_{я}$ при всех влажностях, наблюдаемых в проведенных экспериментах, достигается при использовании как модели I, так и модели II, вплоть до частоты 7 ГГц. На более низких частотах зависимости, полученные по моделям I и II существенно отличаются друг от друга и правильность той или иной модели необходимо проверить экспериментально.

Таким образом, в двухпотоковом приближении теории переноса излучения [18] созданы модели излучательной способности влажного снежного покрова. При учете влияния пространственного распределения водной компоненты модели позволяют:

- описать количественно экспериментальные зависимости радиояростной температуры снега от его влажности, структуры и стратиграфии до частот $f = 150$ ГГц;
- согласовать результаты контактных гляциологических измерений параметров реального снега с результатами радиометрических измерений частотного спектра собственного излучения.

Решение части прямой задачи дистанционного зондирования снежного покрова на основе предложенных моделей позволяет приступить к созданию обоснованных методик решения ряда обратных задач дистанционного зондирования снежного покрова, например, определения влагозапаса и влажности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кренке А.Н., Китаев Л.М., Качалин А.Б., Вегенер Т.Н. Геоинформационные технологии в исследованиях сопряженности полей параметров снежного покрова, климата и гидрологических процессов // Матер. гляциологич. исслед. 2000. Вып. 88. С. 60.
2. Masahito S., Tadashi S.M. Snow observations by MSR // Proc. NIPR Symp. Polar Meteorology and Glaciology. 1991. N. 4. P. 132.
3. Matzler C., Huppi R. Review of signature studies for microwave remote sensing of snowpacks // Advances Space Research. 1989. V. 9. N. 1. P. 253.

4. *Boyarskii D.A., Dmitriev V.V., Etkin V.S.* et al. Theoretical and Experimental Studies of Snow Covers Microwave Emissivity // *J. of Electromagnetic Waves and Appl.* 1993. V. 7. N. 7. P. 959.
5. *Боярский Д.А.* Микроволновая радиометрия снежного покрова и мерзлой почвы на частоте 3,95 ГГц // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1997. Т. XL. № 8. С. 1050.
6. *Ishimaru A.* Wave propagation and scattering in random media and rough surfaces // *Proc. IEEE.* 1991. V. 79. N. 10. P. 1359.
7. *Stogrin A.* Study of the Microwave Brightness Temperature of Snow from the Point of View of Strong Fluctuation Theory // *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing.* 1986. V. GE-24. N. 2. P. 220.
8. *Tsang L., Kong J.A., Shue J.C., Shing R.* Theory and experiment for passive microwave remote sensing of snowpacks // *J. Geophysical Research.* 1979. V. 84. N. B10. P. 5669.
9. *Дмитриев В.В., Клиорин Н.И., Мировский В.Г., Эткин В.С.* // *ДАН.* 1987. Т. 297. № 6. С. 1363.
10. *Tiuri M.E.* Theoretical and experimental studies of microwave emission signatures of snow // *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing.* 1982. V. 20. N. 1. P. 51.
11. *Tiuri M.E., Schultz H.* Theoretical and experimental studies of microwave radiation from a natural snow field // *NASA Workshop on the Microwave Remote Sensing of Snowpack Prop. Ft. Collins. Colorado, 20–22 May, 1980.* P. 225.
12. *Davis R.E., Dozier J., Chang A.T.C.* Snow property measurement correlative to microwave emission at 35 GHz // *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing.* 1987. V. 25. N. 6. P. 751.
13. *West R.D., Winebrenner D.P., Tsang L.* The Influence of Lauering and Grain Size on Microwave Emission From Polar Firn // *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'94). Pasadena, California, USA, 1994.* V. III. P. 1297.
14. *Дмитриев В.В., Клиорин Н.И., Мировский В.Г., Эткин В.С.* Расчет излучательной способности снежного покрова квазистатическим методом и методом уравнения переноса излучения // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1990. Т. 33. № 9. С. 1020.
15. *Colbeck S.C.* The layered character of snow covers // *Rev. Geophys.* 1991. V. 21. N. 1. P. 81.
16. *Hallikainen M.T.* Measurement of the Microwave Scattering Loss of Dry Snow // *Intern. Geosciences Remote Sensing Symp. (IGARSS'85)ю N.Y., 1985.* V. 2. P. 848.
17. *Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* *Microwave Remote Sensing: Active and Passive.* V. 1, 3. Dedham. MA: Artech House, 1985.

18. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. 597 с.
19. *Colbeck S.C.* Snow metamorphism and classification // *Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology. NATO ASI Series,* 1987. P. 1.
20. *Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Kleeorin N.I., Mirovskii V.G.* Inclusion of scattering losses in the model of the effective permittivity of dielectric mixtures and applications to wet snow // *J. of Electromagnetic Waves and Applications.* 1994. V. 8. N. 11. P. 1395.
21. *Боярский Д.А., Мировский В.Г., Тихонов В.В.* Частотно-зависимая модель эффективной диэлектрической проницаемости влажного снега // *Радиотехника и электроника.* 1994. Т. 39. № 10. С. 1479.
22. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
23. *Цейтлин Н.М.* Применение методов радиоастрономии в антенной технике. М.: Сов. радио, 1966. 213 с.
24. *Жеванин С.А., Троицкий В.С.* // *Радиотехника и электроника.* 1959. Т. 4. № 1. С. 21.
25. *Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 189 с.

Авторы искренне признательны *Н.Ю. Комаровой* за помощь при оформлении работы.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 16.12.2004 г.

Заказ 1976

Формат 70×108/32

Тираж 75

0,9 уч.-изд. л.