

УДК 551.467 : 629.78

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ\*

*В. Е. Гершензон, Ю. Б. Хапин, В. С. Эткин*

Обсуждаются результаты модельного радиометрического эксперимента по определению эффективных диэлектрических параметров снежного покрова.

Как известно, кристаллы льда, формирующие снежный покров, рассеивают собственное электромагнитное излучение подстилающей поверхности, что может приводить к уменьшению наблюдаемой яркостной температуры. Этот эффект проявляется в области коротких сантиметровых и миллиметровых волн [<sup>1-4</sup>] и может быть, в принципе, использован как для дистанционного обнаружения снежного покрова, так и для определения его важнейших характеристик (толщины, внутренней структуры и т. д.). Методы теоретического анализа распространения радиоволн в средах с плотной упаковкой рассеивателей развиты в настоящее время недостаточно, что затрудняет анализ результатов дистанционных измерений (например, аэрокосмических). Одним из возможных путей преодоления трудностей является постановка модельного эксперимента по изучению эффективных диэлектрических параметров снежного покрова.

Такой эксперимент был поставлен нами с использованием трех частот: 20, 37 и 89 ГГц. На этих частотах определялась радиояркостная температура снега, вырезанного из наста пластинами (для сохранения внутренней структуры) и помещенного сначала на эталонное черное тело, излучательная способность которого близка к единице ( $\sim 0,97-0,98$ ), а затем на алюминиевый лист, являющийся практически идеальным отражателем. В первом случае моделировалось излучение реальной трехслойной структуры «почва — снег — воздух», во втором — изучались свойства собственно снежного покрова. И в том, и в другом случае варьируемым параметром являлась толщина снега.

Во время измерений контролировались следующие внешние условия: температура воздуха, температура снега, измерялись плотность образцов и радиояркостная температура подсвета атмосферы. Кроме этого, регистрировалась кристаллическая структура снега: средний размер кристаллов льда, наличие прослоек льда в снегу и т. д.

На рис. 1 представлены типичные результаты измерений радиояркостных температур снежного покрова при низких температурах ( $-10^\circ \div -12^\circ\text{C}$ ) окружающего воздуха, т. е. при отсутствии свободной влаги в снегу. Из рисунка видно, что эффективная глубина формирования электромагнитного излучения  $h$  в снежном покрове, определяемая из условия

$$T(h) \approx 0,63 T_\infty, \quad (1)$$

\* Результаты работы доложены на III Всесоюзном симпозиуме по миллиметровым и субмиллиметровым волнам 22—24 сентября 1980 г.

где  $T_\infty$  — радиояркостная температура бесконечно толстого слоя снега,  $T(h)$  — яркостная температура слоя снега толщиной  $h$ , на частоте 89 ГГц мала ( $\sim 10$  см), поэтому дальнейшее увеличение толщины снега практически не изменяет радиояркостную температуру. С увеличением длины волны глубина эффективно излучающего слоя снега увеличивается и составляет на частоте 37 ГГц  $\sim 1$  м, а на частоте 20 ГГц  $\sim 2$  м (величины  $T_\infty$  на этих частотах находились экстраполированием зависимостей  $T(d)$  на большие значения толщин снежного покрова  $d$ ). Величину эффективного коэффициента излучения снежного покрова  $e$  легко определить из формулы

$$e = (T_\infty - T_a) / (T_0 - T_a), \quad (2)$$

где  $T_a$  — радиояркостная температура атмосферы (измеряется при отсутствии снега на алюминиевом листе),  $T_0$  — термодинамическая температура снега (предполагается постоянной по всей толщине покрова). С увеличением длины волны коэффициент излучения растет и составляет для частот 89, 37 и 20 ГГц соответственно  $\sim 0,7$ ,  $\sim 0,8$  и  $\sim 0,9$ .

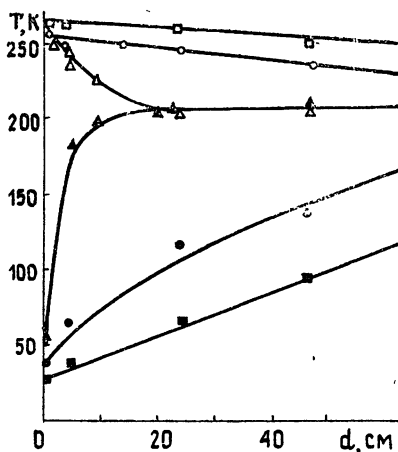


Рис. 1.

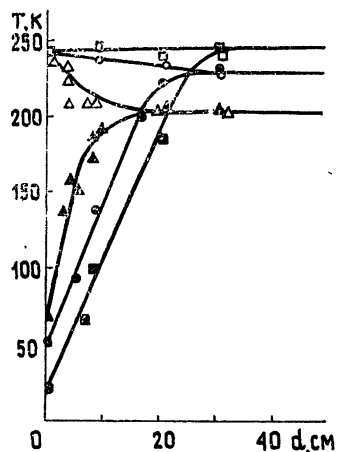


Рис. 2.

Квадратами обозначена частота 20 ГГц, кружками — 37 ГГц, треугольниками — 89 ГГц для снега на черном теле (светлые значки) и алюминиевом листе (темные значки).

Используя значение  $e$  и  $h$  для среды с малым тангенсом угла потерь ( $\text{tg } \delta \ll 1$ ), легко найти эффективные диэлектрические параметры (действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и тангенс угла потерь) снежного покрова из системы

$$\begin{cases} h = \lambda / 2\pi \sqrt{\epsilon'} \text{tg } \delta \\ e = 4 \sqrt{\epsilon'} / [(1 + \sqrt{\epsilon'})^2 + 1/4 \epsilon' \text{tg}^2 \delta]. \end{cases} \quad (3)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Высокие значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости объясняются рассеянием электромагнитного излучения высокой частоты в снегу.

При таянии снега его диэлектрические характеристики претерпевают значительное изменение. На рис. 2 представлены результаты измерений радиояркостных температур снежного покрова при температуре окружающего воздуха  $-0,5^\circ \div -1^\circ\text{C}$  (температура снега была чуть ниже:  $-2^\circ \div -3^\circ\text{C}$ ). Результаты измерений и расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 1

| $\lambda$ , см | $e$       | $\gamma$ , дБ/м | $e'$    | $e''$                   | $\text{tg } \delta$     | $n$     | $\chi$                  |
|----------------|-----------|-----------------|---------|-------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|
| 0,34           | 0,68—0,73 | 44—87           | 10—13   | $17-39 \cdot 10^{-3}$   | $1,3-3,9 \cdot 10^{-3}$ | 3,2—3,6 | $2,1-7,0 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,8            | 0,73—0,80 | 5,4—6,2         | 6,9—10  | $4,2-5,7 \cdot 10^{-3}$ | $0,4-0,8 \cdot 10^{-3}$ | 2,6—3,2 | $0,6-1,3 \cdot 10^{-3}$ |
| 1,5            | 0,79—0,87 | 2,6—2,9         | 2,1—2,7 | $2,0-2,6 \cdot 10^{-3}$ | $0,7-1,2 \cdot 10^{-3}$ | 1,4—1,6 | $0,5-1,0 \cdot 10^{-3}$ |

Таблица 2

| $\lambda$ , см | $e$       | $\gamma$ , дБ/м | $e'$    | $e''$                     | $\text{tg } \delta$     | $n$      | $\chi$                  |
|----------------|-----------|-----------------|---------|---------------------------|-------------------------|----------|-------------------------|
| 0,34           | 0,68—0,73 | 44—87           | 10—13   | $17-39 \cdot 10^{-3}$     | $1,3-3,9 \cdot 10^{-3}$ | 3,2—3,6  | $2,1-7,0 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,8            | 0,82—0,84 | 14,5—17,4       | 5,4—6,2 | $11,8-12,6 \cdot 10^{-3}$ | $1,9-2,3 \cdot 10^{-3}$ | 2,3—2,5  | $2,2-2,9 \cdot 10^{-3}$ |
| 1,5            | 0,89—0,91 | 10,9—12,4       | 1,9—2,0 | $8,2-9,6 \cdot 10^{-3}$   | $4,1-5,1 \cdot 10^{-3}$ | 1,38—1,4 | $2,8-3,6 \cdot 10^{-3}$ |

$\lambda$  — длина волны электромагнитного излучения,  $e$  — коэффициент излучения,  $\gamma$  — погонный коэффициент затухания,  $e'$ ,  $e''$  — действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости,  $\text{tg } \delta$  — тангенс угла потерь,  $n$ ,  $\chi$  — действительная и мнимая части комплексного показателя преломления.

Низкое значение радиояростной температуры черного тела ( $\sim 240$  К) вызвано изменением его свойств в условиях повышенной влажности.

Коэффициент излучения влажного снежного покрова на всех частотах оказывается выше, чем коэффициент излучения сухого снежного покрова, а эффективная глубина формирования излучения значительно уменьшается. Яростная температура снега при еще более высоких температурах воздуха (температура воздуха  $+3^{\circ}\text{C}$ , температура снега  $-0,5^{\circ}\text{C}$ ) уже практически не зависит от его толщины начиная с  $d = 1$  см и составляет на длинах волн 1,5, 0,8 и 0,34 см — 240, 252 и 250 К соответственно.

Надо отметить также, что на излучательные характеристики снежного покрова существенно влияет его внутренняя структура, особенно в диапазоне коротких миллиметровых волн. Значительный разброс ( $\sim 30$  К) измеряемых на частоте 89 ГГц радиояростных температур при толщинах наста  $\sim 2$  см (см. рис. 2) вызван тем, что использовались образцы, различные по своей структуре. Самые низкие яростные температуры ( $\sim 200$  К) дал образец, состоявший из очень крупных ( $\sim 2 \times 6$  мм) цилиндрических кристаллов льда, средние ( $\sim 215$  К)—образец, кристаллы которого имели меньшие размеры ( $\sim 2-3$  мм), но имевший несколько прослоек льда толщиной  $\sim 3-4$  мм. Наибольшую яростную температуру ( $\sim 230$  К) показал однородный образец из сравнительно мелких кристаллов ( $\sim 2$  мм).

Сравнение полученных результатов с результатами работы [5], в которой диэлектрические характеристики снега определялись из измерений на лучевой измерительной линии в двухмиллиметровом диапазоне волн, показывает хорошее совпадение коэффициентов затухания ( $\chi$ ,  $\nu$ ), полученных независимыми методами. В то же время значения показателей преломления сильно расходятся между собой. Это, очевидно, объясняется тем, что в лабораторном эксперименте [5] фиксировалось излучение, не испытывавшее рассеяния на кристаллах льда.

Проведенный модельный эксперимент наглядно показал, насколько сильным рассеивающим действием обладает снег в области миллиметровых волн. Этот эксперимент продемонстрировал, что именно морфология снежного покрова ответственна за излучательные характеристики снега в области коротких миллиметровых волн (при толщинах снега  $> 10-15$  см) и что по мере увеличения длины волны рассеивающее действие кристаллов в снеге уменьшается, и существенное влияние начинает оказывать подстилающая поверхность. Это, в свою очередь, делает возможным определение толщин снежного покрова дистанционными методами.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Мериакри за обсуждение некоторых результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chang I. C., Gloersen P., Shmugge T., Wiheit T. T., Zwally H. J. — J. Glaciology, 1976, 16, № 74, p. 23.
2. Kunzi K. F., Fisher A. D., Staelin D. H., Waters J. W. — J. Geophys. Res., 1976, 81, № 27, p. 4965.
3. Гершензон В. Е., Хапин Ю. Б., Эткин В. С. — Исследование Земли из космоса, 1981, № 1, с. 58
4. Гершензон В. Е., Хапин Ю. Б., Эткин В. С. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам.—Горький: 1980, 1, с. 279.
5. Андреев Г. А., Мериакри В. В., Рубцов С. Н., Ушаткин Е. Ф. — Радиотехника, 1979, 34, № 5, с. 84.

Институт космических исследований  
АН СССР

Поступила в редакцию  
17 ноября 1980 г.

#### DEFINITION OF THE EFFECTIVE DIELECTRIC PARAMETERS OF SNOW COVER OVER THE RESULTS OF RADIOMETRIC MEASUREMENTS

V. E. Gershenson, Yu. B. Khapin, V. S. Ehtkin

Results are discussed of the model radiometric experiment on definition of effective dielectric parameters of the snow cover.