

Особенности электрофизических свойств «холодных» ледников

О.В. Юшкова, Т.Н. Дымова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино, пл. Введенского, д.1, Россия

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, кафедра гляциологии и криолитологии, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; tasinidze@gmail.com

В работе описана электрофизическая модель «холодного» ледника. Проведены расчеты глубинного профиля диэлектрической проницаемости, прослежены вариации действительной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в теле ледника в зависимости от температуры на поверхности и частоты зондирующих радиосигналов.

Here we describe the electrophysical model of a cold glacier, calculate the depth profile of the dielectric constant, and track variations in the effective part of the dielectric constant and the loss tangent depending on the surface temperature and frequency of the radio signals.

Введение

Радиозондирование – мощный инструмент для изучения толщи ледника. Измеряемой величиной является отраженный радиосигнал: если спектр падающего радиосигнала имел вид $S(f)$, спектр отраженного будет равен $R(f)S(f)$, где комплексная функция $R(f)$ называется коэффициентом отражения радиоволн, именно он несет информацию о свойствах отражающей среды [1]. Наличие воды как компоненты льда и снега кардинально меняет физические свойства ледников и делит их на «теплые» и «холодные». В данной работе мы рассмотрим электрофизическую модель «холодного» ледника, как наиболее стабильного с точки зрения радиофизики, и обсудим особенности его диэлектрических характеристик, обусловленные изменениями поверхностной температуры и частоты взаимодействующего электромагнитного поля.

Теоретическая основа расчета коэффициента отражения радиоволн от слоя льда

Рассмотрим задачу определения коэффициента отражения радиоволн от поверхности льда $z = 0$ на базе приведенного волнового уравнения:

$$Y'' + k^2 \varepsilon(z)Y = 0. \quad (1)$$

В этом уравнении k - волновое число. Диэлектрическая проницаемость отражающего полупространства, состоящего из ледника толщины D и диэлектрически однородного ложа, задается комплексной функцией $\varepsilon(z)$:

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} 1 & , z < 0 \\ \varepsilon_{ice}(z) & , 0 \leq z \leq D. \\ \varepsilon_p & , z > D \end{cases} \quad (2)$$

В формуле (2) диэлектрическая проницаемость льда - $\varepsilon_{ice}(z)$, ε_p - ложа ледника. Решение уравнения (1) в области $z < 0$ имеет вид:

$$Y_{z<0} = \exp(ikz) + R(f)\exp(-ikz), \quad (3)$$

где первое слагаемое в выражении (3) описывает падающую радиоволну, второе - волну, отраженную от поверхности льда с коэффициентом отражения $R(f)$.

Электрофизические характеристики ледников

Снег, фирн и лед представляют собой смесь из трех фаз воды: твердой (кристаллы льда, снежинки), жидкой (вода), и газообразной (пары воды и воздух).

Снег и фирн. Так как мы рассматриваем снег и фирн, которые состоят из кристаллов пресного сухого льда и воздуха, то используем формулу Лооуенга, модифицированную для расчета диэлектрической проницаемости снежного покрова $\varepsilon = \varepsilon_{sn}$, для воздуха - $\varepsilon_1 = \varepsilon_{atm} = 1$ и льда - $\varepsilon_2 = \varepsilon_{ice}$ [2,3,4]:

$$\varepsilon_{sn} = \left(\frac{\rho}{\rho_{ice}} (\varepsilon_{ice}^{1/3} - 1) + 1 \right)^3 \quad (4)$$

В соотношении (4) ρ_{ice} - плотность льда, а ρ - плотность снега.

Сухой лед. Для моделирования комплексной диэлектрической проницаемости льда традиционно используют формулу Дебая [2; 5]:

$$\varepsilon_{ice} = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + \tau^2 w^2} + i \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})\tau w}{1 + \tau^2 w^2}. \quad (5)$$

В этой формуле ε_0 - диэлектрическая проницаемость льда в постоянном поле, ε_{∞} - диэлектрическая проницаемость льда в оптическом диапазоне (385-790 ТГц), $w = 2\pi f$ - частота электромагнитного поля в Гц. Время релаксации льда τ зависит от температуры, согласно закону $\lg \tau = \frac{2900}{T + 273,15} - 15,3$, где T задается в градусах Цельсия.

На рис. 1 дана частотная зависимость действительной части функции (5), а на рис. 2 - тангенса угла потерь диэлектрической проницаемости льда $\operatorname{tg}(\delta_{ice}) = \varepsilon''_{ice} / \varepsilon'_{ice}$. На обоих рисунках линии 1 построены для температуры 0°C , 2 - для -10°C и 3 - для -20°C .

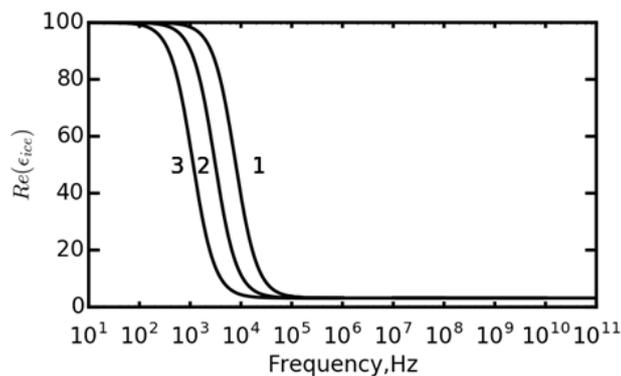


Рис.1. Частотная зависимость действительной части функции ε_{ice} . Линия 1 построена для температуры 0°C , 2 - для -10°C и 3 - для -20°C .

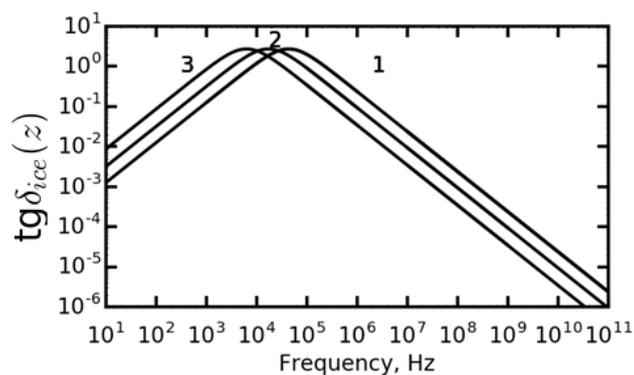


Рис.2. Частотная зависимость соотношения $tg(\delta_{ice}(z))$. Линия 1 построена для температуры $0^{\circ}C$, 2 – для $-10^{\circ}C$ и 3 – для $-20^{\circ}C$.

Ложь ледника. Значение диэлектрической проницаемости ледя ϵ_p в сухом состоянии оценивают от 6 до 12 [6].

Анализ расчетов глубинного профиля комплексной диэлектрической проницаемости снежно-ледового покрова

В нашей модели толщина снега равна 8 метров, толщина «холодного» фирна составляет 50 метров [7], толщина всего ледника достигает 110 метров.

На рис. 3 дано распределение по глубине температуры в снежно-ледовом теле ледника $T(T_0, z)$ при температуре на поверхности T_0 , равной $0^{\circ}C$ (линия 1), $-10^{\circ}C$ (линия 2) и $-20^{\circ}C$ (линия 3).

Для функций $T(T_0, z)$ и $\rho(z)$ по формулам (8) и (7) были рассчитаны глубинные профили действительной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь ледника. Соответствующие графики даны на рис. 4 и на рис.5.

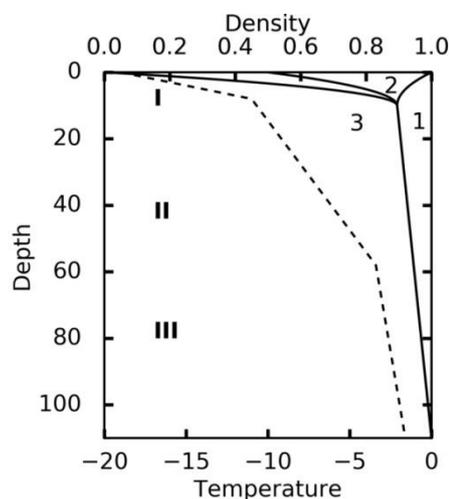


Рис.3. Профиль температуры и плотности в леднике. Цифрой I обозначена зона снега, II – зона фирна и III – зона льда. Пунктирной линией приведено распределение по глубине плотности ледника $\rho(z)$. На графике выделены слои снега (участок обозначен цифрой I), фирна (II) и льда (III).

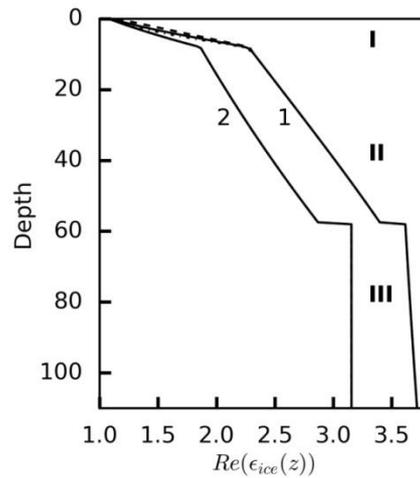


Рис.4. Зависимость от глубины действительной части диэлектрической проницаемости ледника. Цифрой I обозначена зона снега, II – зона фирна и III – зона льда. Сплошной линией построены графики для температуры на поверхности равной 0°C, штрихпунктирной – для -10°C, пунктирной – для -20°C. График 1 рассчитан для частоты 0.1 МГц, график 2 рассчитан для частоты 1 МГц.

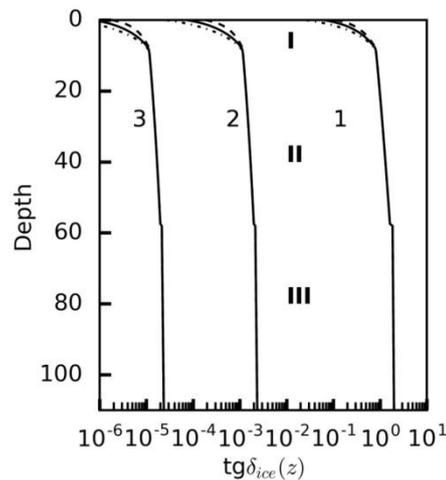


Рис.5. Глубинная зависимость тангенса угла потерь $tg(\delta_{ice}(z))$. Сплошной линией построены графики для температуры на поверхности равной 0°C, штрихпунктирной – для -10°C, пунктирной – для -20°C. Графики рассчитаны для частот 0.1 МГц (линия 1), 100 МГц (линия 2) и 10 ГГц (линия 3). Из расчетов следует, что чем ниже температура и выше частота, тем меньше радиоволны поглощаются в леднике, причем поглощение практически одинаково по глубине и не зависит от типа снежно-ледового покрова.

Коэффициент отражения радиоволн от ледника

Диэлектрическая проницаемость ледника – понятие достаточно абстрактное, так как для практики представляет интерес, зависящий от нее коэффициент отражения радиоволн. Функция $R(f) = |R(f)| \times e^{i\Phi}$ – комплексная, используемый в данной работе метод расчета $R(f)$ от произвольного глубинного профиля подробно описан в работе Юшкова (1994). На рис. 6 представлен модуль коэффициента отражения $|R(f)|$ радиоволн частотой от 10^4 Гц до 10^8 Гц. На рисунке буквой А отмечен частотный диапазон, длина волн которого соответствуют условию $|\frac{\lambda}{D}| > 10$, они отражаются только от ложа ледника с коэффициентом отражения равным $R(f) = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_p}}{1 + \sqrt{\epsilon_p}} \right|$, сам

ледник для них прозрачен. По мере уменьшения λ , волны, отраженные от ложа, начинают интерферировать с волнами, отраженными от поверхности, поэтому частотная зависимость коэффициента отражения приобретает осциллирующий вид, период осцилляций зависит от эффективной толщины ледника, амплитуда от диэлектрической проницаемости пород ложа и льда на поверхности. Для волн этого диапазона значение $tg(\delta_{ice}(z))$ примерно равно $0.5 \div 0.05$, что обуславливает уменьшение амплитуды осцилляций: за счет поглощения отраженные от ложа волны перестают достигать поверхности, но ледово-фирновый слой для них еще прозрачен (на рис. 6 этот диапазон обозначен буквой В), поэтому отражение происходит от поверхности. Коэффициент отражения становится равным

$$R(f) = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{ice}(0)}}{1 + \sqrt{\epsilon_{ice}(0)}} \right|.$$

На рис. 7 приведен фрагмент функции $|R(f)|$ в окрестности частоты сигнала радиоальтиметра - 13,575 ГГц. Следует отметить, что изменение температуры на поверхности ледника на $|R(f)|$ не влияет. На рис. 8 приведен график зависимости от температуры фазы коэффициента отражения радиоволны частотой 13.575 ГГц от ледника.

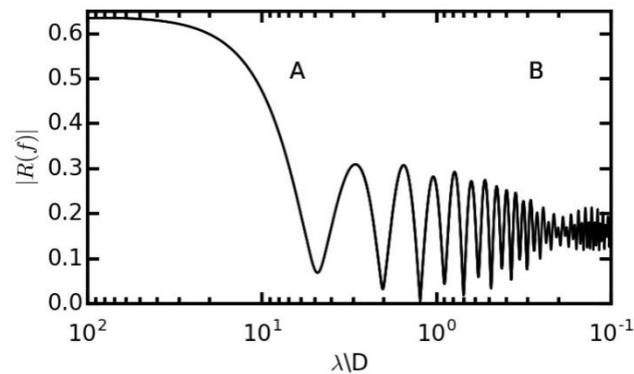


Рис. 6. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения радиоволн частотой от 10^5 Гц до 10^8 Гц.

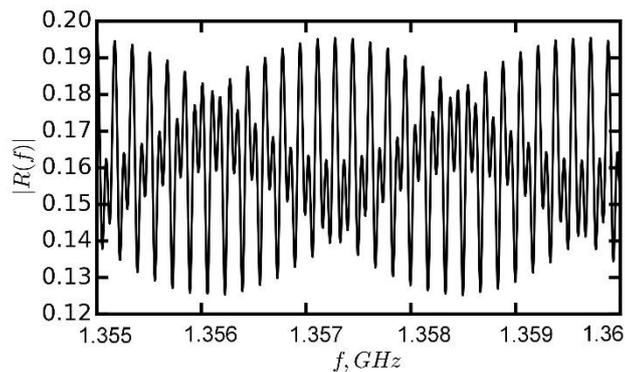


Рис. 7. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения радиоволн частотой от 13.55 ГГц до 13.6 ГГц.

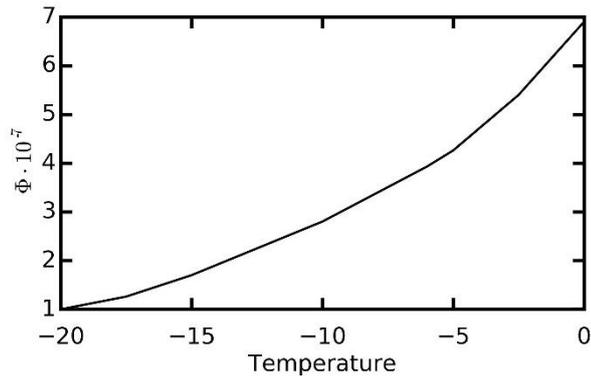


Рис. 8. Температурная зависимость фазы коэффициента отражения от ледника радиоволны частоты 13.575 ГГц. На рисунке по горизонтальной оси отложена частота, по вертикальной - фаза коэффициента отражения, ее значение меняется практически на порядок при изменении температуры на 20 градусов.

Выводы

В результате анализа выполненных расчетов оказалось, что при низких температурах для частот выше 1 МГц действительная часть диэлектрической проницаемости ледника не меняется с изменением частоты и температуры на поверхности, но зависит от строения ледника, в то время как глубинный профиль тангенса угла потерь постоянен по всему телу ледника, за исключением верхнего слоя толщиной до 10 м. Диапазон радиоволн от 0.1 до 1 МГц не оптимален для исследования «холодных» ледников: поглощение радиоволн льдом велико для изучения толстых слоев ледника, а длина волны не позволяет исследовать тонкие слои, поэтому при отражении сигнала превалирует отражение от поверхности ледника. Малое поглощение льдом коротких радиоволн ведет к тому, что в коэффициенте отражения опять появляется вклад от отражения радиоволн от ложа и $|R(f)|$ для коротких радиоволн практически является суммой парциальных отражений радиоволн от поверхности и внутренних границ между снегом и фирном, между фирном и льдом и между льдом и ложем. Период и амплитуда осцилляций функции $|R(f)|$ зависят от глубины залегания внутренних границ и градиента диэлектрических характеристик льда, снега, фирна и пород ложа. Изменения температуры на поверхности, приводящие к изменению тангенса потерь верхних слоев ледника, проявляется в величине фазы коэффициента отражения радиоволн: чем выше температура, тем больше фаза коэффициента отражения. Из анализа результатов расчетов следует, что в отраженном от ледника сигнале на частотах выше 100 МГц содержится одинаковая информация и о строении «холодного» ледника, и о глубинном распределении диэлектрической проницаемости в его теле, но для восстановления электрофизических параметров ледников необходимо использовать широкополосный сигнал с гладким спектром.

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

Литература

1. Skolnik M. I. Radar handbook, 1970.
2. Узлов В.А., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Основные физические параметры снежного покрова // Тр. Нижегородского гос. техн. унта им. Р.Е. Алексеева, 2014, т. 103, № 1, с. 119–129.
3. Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixture // Physica, 1965, vol. 31, No. 3, p. 401–406.

4. Frolov A. D., Ya. Macheret Y. On dielectric properties of dry and wet snow //Hydrological processes, 1999, vol. 13, No. 12-13, p. 1755–1760.
5. Финкельштейн М. И., Кутев, В. А., Карпухин, В., Метелкин, В.
6. Бармасов А. В. Курс общей физики для природопользователей. Электричество, БХВ-Петербург, 2010.
7. Witrant E., Martinerie P. A variational approach for optimal diffusivity identification in firms //18th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'10. – IEEE, 2010, p. 892–897.