

Обнаружение пространственной дисперсии для микроволнового излучения в ледяных покровах

Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, А.О. Орлов, С.В. Цыренжапов, А.Ц. Цыбикжапов

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

672090 г. Чита, ул. Бутина, д. 26

E-mail: lgc255@mail.ru

В работе приведены экспериментальные результаты по радиопросвечиванию ледяного покрова на частоте 13 ГГц. Установлены осцилляции сигнала в зависимости от расстояния между приемником и передатчиком, период которых варьируется в зависимости от температуры льда в пределах от единиц до десятков метров. Наблюдаемые пространственные осцилляции объяснены существованием во льду двух волн с одной поляризацией, но различными длинами, возникающих в средах с пространственной дисперсией. В случае пресного льда пространственная дисперсия наиболее выражена при температуре вблизи фазового перехода вода-лед.

Введение

При исследовании спектров пропускания прямоугольных резонаторов, полностью заполненных льдом, на частоте 6,3 ГГц вблизи 0°C в [1] было обнаружено раздвоение резонансной линии пропускания – рис. 1.

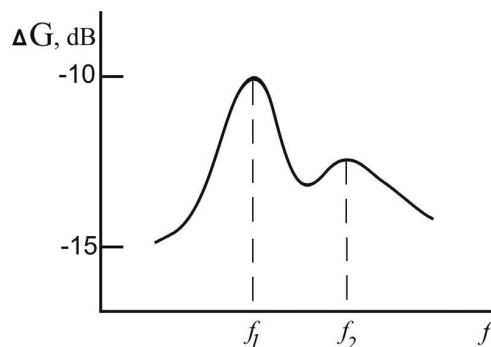


Рис. 1а. Линия пропускания резонатора со льдом после его нагревания от -25 до 0°C за время около четырех часов и последующего охлаждения в течение 20 минут до -11.5°C . f_1 и f_2 – максимумы пропускания на частотах 6323 и 6387 МГц, соответственно. ΔG – уровень сигнала, отсчитываемый от начального значения амплитуды резонанса

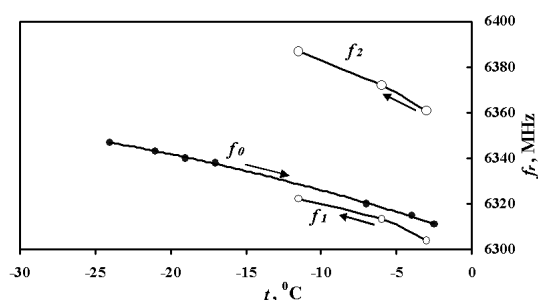


Рис. 1б. Ход резонансных частот резонатора f , при его нагревании (f_0 соответствует одnogорбой кривой пропускания) до температуры, близкой к 0°C , при которой наблюдалось исчезновение сигнала, и последующем охлаждении в течение 20 минут до температуры -11.5°C (f_1 , f_2 соответствуют максимуму пропускания двугорбой кривой). Направление изменения температуры во времени указано стрелками на графиках

Этот эффект интерпретировался как существование во льду двух коэффициентов преломления среды на одной частоте. Данное предположение было проверено для случая распространения линейно поляризованного монохроматического излучения в ледяном покрове пресного озера на частоте 13 ГГц [1]. Как оказалось, в этом эксперименте, в среде наблюдались пространственные колебания амплитуды сигнала

в зависимости от расстояния между приемником и излучателем, что подтвердило существование во льду двух интерферирующих волн с различными их длинами.

Существование двух волн с одной поляризацией, но различными волновыми числами было предсказано в [2, 3] для оптического диапазона в случае кристаллических тел, обладающих пространственной дисперсией. Для таких сред тензор диэлектрической проницаемости зависит не только от частоты поля, но и от волнового вектора. Эффект может возникать в периодических средах, когда характерных период изменений электрических свойств среды становится соизмеримым с длиной волны электромагнитного излучения.

Цель работы и методика эксперимента

В настоящей работе приводятся дополнительные данные по измерениям интерференционных эффектов при распространении СВЧ-излучения в пресном ледяном покрове перед началом его таяния. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

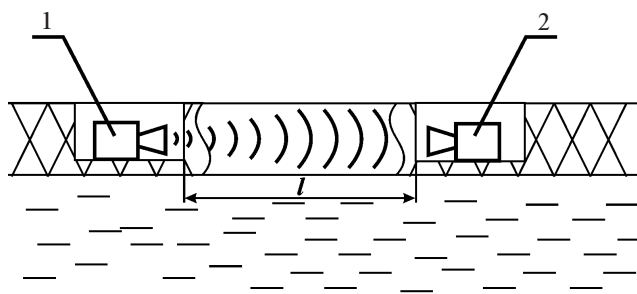


Рис. 2. Схема эксперимента по радиопросвечиванию ледяного покрова

В эксперименте излучатель 1 (на частоте 13 ГГц) и приемник 2 помещались в ледяной покров. Излучатель на диоде Ганна перемещался для изменения расстояния (l) между ними. Для устранения эффекта влияния полостей, где располагался излучатель, измерения производились при сближении приборов и последовательном изготовлении полостей.

Излучение осуществлялось на вертикальной поляризации, а прием сигнала проводился на четырех линейных поляризациях: ВП – вертикальной, ГП – горизонтальной и под углами 45° и -45° .

Результаты измерений

Результаты измерений для трех характерных времен существования льда, когда среда приближалась к талому состоянию, приведены на рис. 3 (а – в).

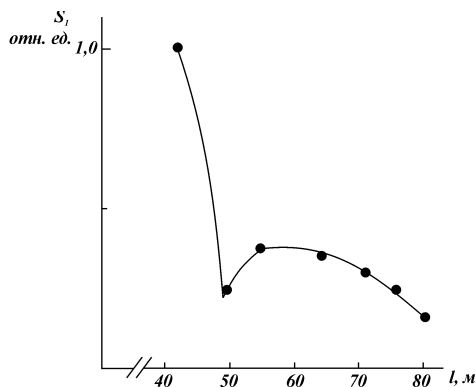


Рис. 3а. Изменение S_1 (первого параметра Стокса) с расстоянием во льду на частоте 13 ГГц (Оз. Арахлей в Забайкалье, 13 марта 2004 г)

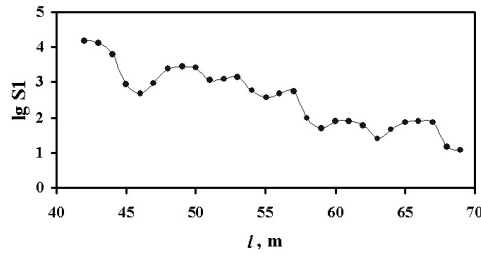


Рис. 3б. Изменение S_1 в ледяном покрове оз. Арахлей на частоте 13 ГГц 21 марта 2004. (S_1 в отн. ед.)

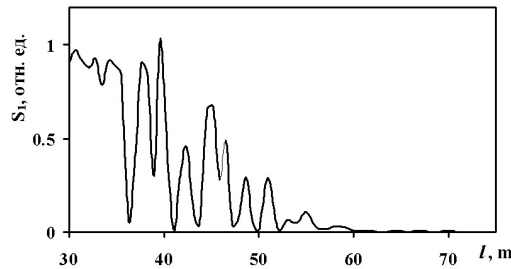


Рис. 3в. Изменение первого параметра Стокса от расстояния на частоте 13 ГГц при распространении излучения в ледяном покрове перед началом таяния льда. Дата - 15 марта 2005 г. Излучение на ГП. График построен по измерениям через 1,5 м

На рис.3а-3в принимаемый сигнал представлен в виде первого параметра Стокса S_1 , равного сумме мощностей на двух ортогональных поляризациях. Как выяснилось при измерениях, наблюдалось вращение плоскости поляризации волны, которое могло возникнуть из-за существования в среде механических напряжений. Поэтому исследовались как интенсивность сигнала на отдельной поляризации, так и первый параметр Стокса, характеризующий полную мощность принимаемого сигнала.

На всех рисунках видны как падение сигнала при удалении от излучателя, так и характерные осцилляции мощности сигнала от расстояния. Из графиков на рис. 3 следует, что по мере приближения температуры к точке фазового перехода наблюдается уменьшение расстояния между минимумами сигнала.

На рис. 3а и 3б относятся к измерениям 2004г., а рис. 3в – к 2005г., когда температура воздуха была более высокой. Температура в средней части ледяного покрова изменялась при этом от -2°C до 0°C .

Можно сравнить наблюдаемые пространственные биения волн с периодом Δx с расщеплением резонансных частот в резонаторе Δf . Для этих величин при малом изменении ε' можно записать соотношение:

$$\Delta f \cdot \Delta x = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}, \text{ или } \Delta f = \frac{c}{\Delta x \sqrt{\varepsilon'}}, \quad (1)$$

где c – скорость электромагнитной волны в вакууме, ε' - действительная часть относительной диэлектрической проницаемости льда.

Соотношение (1) для Δf и Δx можно получить следующим образом. Если рассмотреть полуволновый резонатор длиной l_p , то этот размер равен половине длины волны в среде. Тогда $l_p = \frac{c}{n'_1 2 f_1} = \frac{c}{n'_2 2 f_2}$, где n'_1 и n'_2 - коэффициенты преломления на частотах резонансов f_1 и f_2 резонатора. Из представленного равенства следует, что $n'_1 f_1 = n'_2 f_2$. Если $f_2 > f_1$, то можно записать $(n_2 + \Delta n) f_1 = n_2 (f_1 + \Delta f)$. Преобразуя последнее равенство получим $\frac{f_1}{n_2} = \frac{\Delta f}{\Delta n}$. Если учесть, что $f_1 \approx f_2$, $n_1 \approx n_2 = n$, то получим:

$$\frac{c}{\lambda n} = \frac{\Delta f}{\Delta n} \text{ или } \Delta f = \frac{c}{n} \frac{\Delta n}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения в свободном пространстве. Δn можно связать с Δx – периодом биений, на котором амплитуда волны обращается в нуль. Из данного условия следует: $k_1 \Delta x - k_2 \Delta x = \pi$, здесь k_1 и k_2 – волновые числа $\frac{2\pi}{\lambda} n$. Подставляя их значения в разность фаз получим:

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_1 \Delta x - \frac{2\pi}{\lambda} n_2 \Delta x = \pi.$$

Отсюда получим: $\Delta n = \frac{\lambda}{\Delta x}$. Подставляя последнее равенство в (2) и учитывая, что $n = \sqrt{\varepsilon'}$, получим формулу (1). Отметим, что формула (1) справедлива для небольших приращений Δn и Δf .

Находя по формуле (1) значения Δf получим, что расщепление частот находится в интервале от 10 МГц до 100 МГц для области температур от -2°C до 0°C . Эти значения близки к значению частот в спектре пропускания резонатора при лабораторных измерениях (рис. 1).

В работе [2] приведены дисперсионные соотношения для среды вблизи линии поглощения – рис.4.

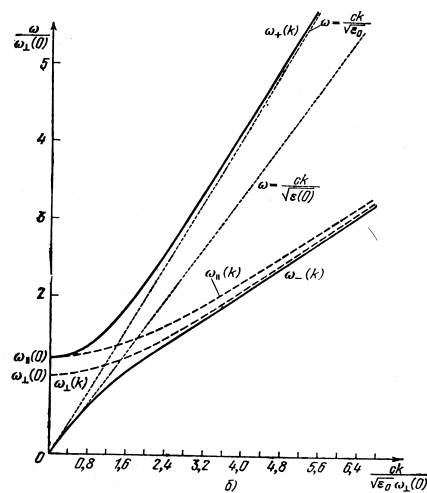


Рис. 4. Дисперсионные соотношения для среды с пространственной дисперсией вблизи линии поглощения [2]

Из графиков рис. 4 следует, что имеется область частот, где возможно существование двух волн с одной поляризацией, но отличными волновыми числами, при этом также одному значению волнового числа соответствуют две частоты. Первый случай проявляется при распространении в среде монохроматического излучения, а, второй, соответствует эксперименту с резонатором, когда изменяется частота зондирующего излучения.

Однако причина пространственной дисперсии льда для СВЧ-излучения в настоящее время не известна. Поэтому возможно, что вид дисперсионных соотношений может быть иным, чем на рис. 4. Поэтому нами изучался вопрос о существовании во льду пространственных периодических решеток различного масштаба. В частности, изучались тонкие образцы льда данного водоема в поляризованном свете. На полученных изображениях просматриваются зерна размерами порядка десятых долей миллиметра. Если считать, что пространственная дисперсия излучения определяется периодической структурой, т.е. пространственной модуляцией электрических свойств льда, то можно представить электрическое поле волны в следующем виде $E = E_0 \sin(\omega_0 t - kx)$, где $E_0 = E' \sin \Delta k x$; $\Delta k = \frac{2\pi}{d}$, где d – период, равный периоду структуры и осуществляется 100% модуляция сигнала. В этом случае в пространстве появляются две волны с двумя пространственными частотами ($1/\lambda$), определяемыми из $k_{1,2} = k \pm \Delta k$. Поскольку Δk можно найти из измерения Δx – расстояния между двумя интерференционными минимумами, то $\Delta x = d$. Это означает, что отдельные зерна льда с размером от 0,1 мм до 10 см вряд ли являются причиной наблюдаемой

пространственной дисперсии. Необходимо искать образования порядка единиц и десятков метров. В настоящее время не ясно могут ли во льду существовать такие структуры и каковы причины их появления.

Другая гипотеза о причинах пространственной дисперсии связывается с особыми электрическими свойствами льда. В работе [4] предложен механизм переноса возбуждения в решетке льда, связанный с образованием солитонов. Однако эксперименты по их поиску и изучению свойств не проводились.

Выводы

Аномалии электромагнитных свойств льда наблюдались ранее и другими авторами. Так при радиолокационном зондировании ледников были обнаружены аномалии, проявляющиеся в исчезновении отраженного от ложа ледника сигнала на значительной части трассы, аномалии во вращении плоскости поляризации сигнала при вторичном прохождении того же объекта и т.д. [5]. Эти аномалии авторами не объяснялись. По нашему мнению наблюдаемые эффекты могут объясняться интерференцией двух волн с одной поляризацией, но отличными волновыми числами. Поскольку интроскопия ледяных тел представляется важной задачей (например, для исследования подледниковых озер Антарктиды, при мониторинге криосферы и т.д.), необходимо учитывать проявление пространственной дисперсии для микроволнового излучения.

Для установления причин пространственной дисперсии требуются эксперименты в широком интервале частот и различных условий существования льда.

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

Литература

1. *Бордонский Г.С.* Электромагнитные свойства льда вблизи температуры фазового перехода вода-лед. // Физика твердого тела. 2005. Т. 47, №4. С. 691-695.
2. *Агранович В.М., Гинзбург В.Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука. 1979. 432 с.
3. *Пекар С.И.* Кристаллооптика и добавочные световые волны. - Киев: Наукова думка. 1982. 294 с.
4. *Давыдов А.С. и др.* Солитоны и движение протонов в льдоподобных структурах. Киев: ИТФ. 1981. 23с. Препринт, ИТФ-81-60Р.
5. *Богородский В.В., Бенгли Ч., Гудмандсен П.* Радиогляциология. - Л.: Гидрометеиздат. 1983. 312 с.