

О коэффициенте отражения электромагнитных волн от границы воздух – лед в сантиметровом диапазоне

Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов, С.В. Цыренжапов, А.О. Орлов

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

672090 г. Чита, ул. Бутина, д. 26

E-mail: lgc255@mail.ru

В работе исследованы изменения фазы коэффициента отражения от плоской границы воздух-лед на частотах 13,8 ГГц и 6,0 ГГц. Экспериментально установлено относительное изменение фазы коэффициента отражения от пресного природного льда на несколько десятков градусов при температуре выше -2°C . Данный эффект необходимо учитывать при фазовых методах радиолокационных измерений.

Микроволновые методы дистанционного зондирования широко используются для изучения криосферных образований. Вследствие значительной теплоты фазового перехода разнообразные ледяные структуры длительное время находятся вблизи температуры фазового перехода лед-вода при их нагревании. Вместе с тем, электромагнитные свойства пресного льда при 0°C практически не исследованы. Обычно исследователи ограничиваются областью температур ниже $-0,5^{\circ}\text{C}$, а в отдельных случаях исследовался чистый пресный лед в лабораторных условиях при нагревании до $-0,2^{\circ}\text{C}$. Считается, что при температуре выше $-0,1^{\circ}\text{C}$ возможны проблемы с появлением жидкой воды (из-за наличия во льду примесей). Тем не менее, на практике исследователи интерпретируют данные радиолокационных измерений ледяных тел, не учитывая особых свойств льда вблизи температуры фазового перехода. Так на сайте (http://www.esa.int/esaCP/SEMA940FGLE_index_2.html) (ERS-2 helps detect massive rivers under Antarctica) появилось сообщение британских ученых о результатах изучения Антарктиды со спутников ERS с использованием метода радиоинтерферометрии об аномалиях высоты поверхности. По их данным наблюдается скачкообразное изменение высоты ледяного щита в отдельных областях.

В работе [1] приведены экспериментальные результаты по радиопросвечиванию ледяных покровов, в которой показано существование во льду добавочных электромагнитных волн при температурах вблизи 0°C , предсказанных в работах В.Л.Гинзбурга и С.И.Пекара [2,3] для кристаллооптики. Эти волны имеют одинаковую с исходной волной поляризацию, но другие значения волнового вектора. Добавочная волна по данным [2,3] связана с пространственной дисперсией в среде. Возникает вопрос о влиянии пространственной дисперсии на фазу коэффициента отражения, изменение которой необходимо учитывать при дешифровке данных радиоинтерферометрии.

В настоящей работе приведены результаты лабораторного исследования фазы коэффициента отражения от блока пресного льда при его нагревании до начала таяния. Измерения выполнялись в сантиметровом диапазоне на частотах 13,8 ГГц и 6,0 ГГц. Образец выпиливали из ледяного покрова пресного озера в виде усеченной прямоугольной призмы для устранения влияния интерференционных эффектов, размеры призмы 50см x 50см x 5см x 22см. Содержание во льду соли около 10 мг/кг. В методе измерений сравнивались две волны: опорная и отраженная от поверхности ледяной призмы. С помощью отдельного детектора дополнительно измерялась мощность отраженного сигнала. Одновременно выполнялись измерения температуры образца с помощью термомпары, помещенной в лед на глубину 3 см от поверхности. Методика измерений для частоты 13,8 ГГц приведена в работе [4]. Точность измерений фазы составляла порядка 1° .

Измерения фазы коэффициента отражения в длинноволновой части сантиметрового диапазона на частоте 6,0 ГГц выполнялись с использованием измерителя комплексных коэффициентов отражения Р4-36. В этом случае измерения проведены по стандартной методике, при которой у поверхности льда на расстоянии 1 см размещали входную апертуру небольшой рупорной антен-

ны. Антенна через коаксиально - волноводный переход подключалась к измерительному мосту. Точность измерений не хуже $\pm 5^\circ$.

Образец из льда помещался в лабораторное помещение, где выполнялись измерения при температуре около $+20^\circ\text{C}$. В процессе нагревания льда проводились измерения изменения фазы коэффициента отражения. График изменения фазы от температуры на частоте 13,8 ГГц приведен на рис. 1.

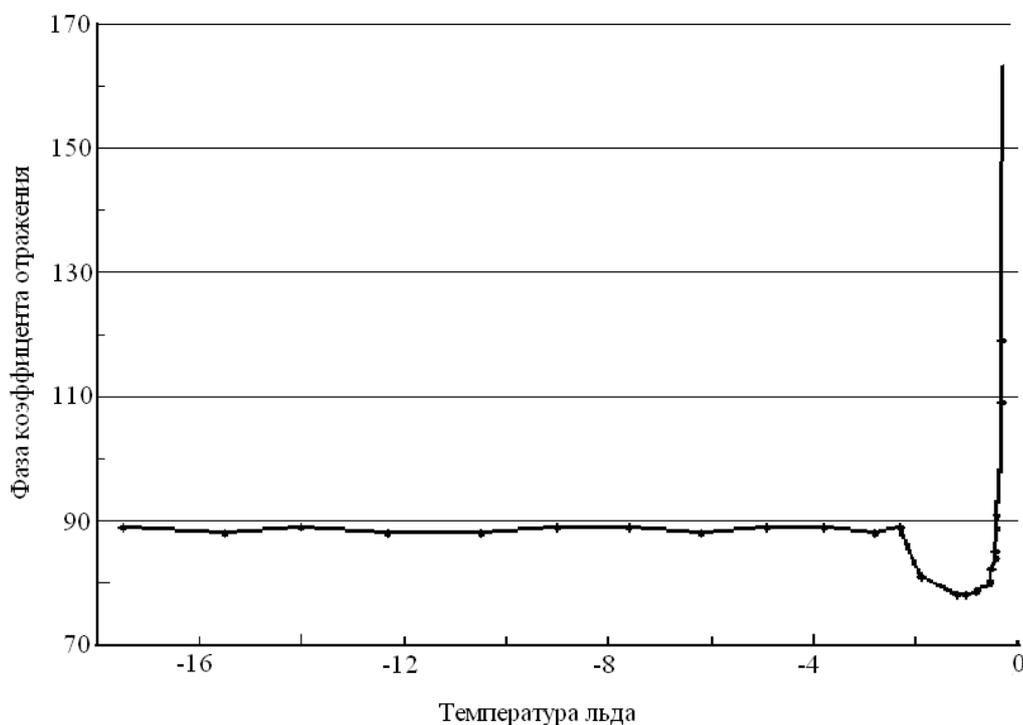


Рис. 1. Зависимость изменения фазы коэффициента отражения от температуры льда при его нагревании на частоте 13,8 ГГц

Каждая точка графика разделена интервалом времени 12 минут. Как следует из полученных данных, наблюдаются три области на температурной зависимости приращения фазы. Первая область расположена от начальной температуры льда -18°C до $-2,5^\circ\text{C}$, в ней отсутствует изменение фазы. При температуре от $-2,5^\circ\text{C}$ до -1°C фаза плавно менялась на 10° и при дальнейшем повышении температуры до $-0,5^\circ\text{C}$ не изменялась. Выше $-0,5^\circ\text{C}$ обнаруживается резкое изменение фазы коэффициента отражения.

При анализе полученных данных следует учитывать расположение термопары в образце. При ее показаниях -1°C началось таяние льда с образованием на поверхности тонкого слоя воды толщиной порядка 0,1 мм. Поэтому результаты, относящиеся к температуре -1°C на рис.1 соответствуют процессам таяния поверхности призмы. Однако тонкая поверхностная пленка практически слабо влияла на коэффициент отражения, что проверялось по ее удалению с поверхности при помощи гигроскопичного протирочного материала. Дальнейшая многочасовая выдержка образца в лабораторном помещении приводила к уменьшению его размеров и появлению пульсаций амплитуды и фазы коэффициента отражения, что, по-видимому, связано с развитием процессов таяния в поверхностных слоях.

На рис. 2 приведены результаты измерений фазы коэффициента отражения на частоте 6,0 ГГц и температуры блока льда от времени выдержки исследуемого образца. В эксперименте также наблюдался заметный сдвиг фазы (до 25°) при приближении температуры льда к 0°C с последующим резким ее изменением.

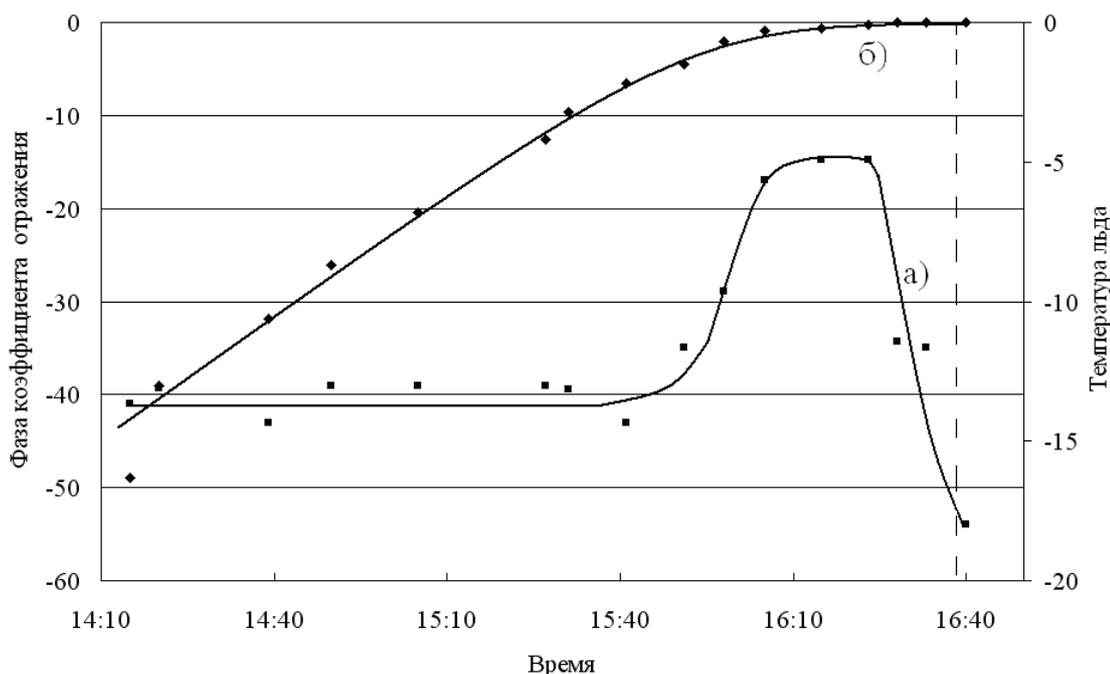


Рис. 2. Изменение а) фазы коэффициента отражения на частоте 6,0 ГГц и б) температуры льда от времени выдержки в лабораторном помещении при температуре +20°C. Штриховой линией отмечено время достижения температуры 0°C

Таким образом, из экспериментальных данных следует, что при приближении температуры к 0°C в коротковолновой части сантиметрового диапазона имеет место некоторое (до 10° - 20°) изменение фазы коэффициента отражения, его можно связать с особыми свойствами льда. При возникновении признаков таяния образца изменение фазы достигло десятков градусов на двух используемых частотах, что можно связать со структурной перестройкой слоев льда (появлением внутренних прослоек воды, их особыми свойствами и т.п.). В любом случае вблизи таяния льда при сохранении его механической целостности и отсутствии заметных количеств жидкой воды наблюдаются резкие изменения фазы коэффициента отражения от границы раздела с воздухом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 06-02-16098).

Литература

1. Бордонский Г.С., Гурулева А.А. Возможные ошибки при интерпретации данных радиозондирования ледяных тел. // Исследование Земли из космоса, 2007. ;№4. С. 3-7.
2. Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учётом 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. Бордонский Г.С., Гурулева А.А. Изменчивость фазы коэффициента отражения от границы льда в микроволновом диапазоне вблизи температуры фазового перехода // Письма в ЖТФ, 2008. Т. 34. №6. С. 43-49.