

05.3;09

Изменчивость фазы коэффициента отражения от границы льда в микроволновом диапазоне вблизи температуры фазового перехода

© Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита
E-mail: lgc255@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 августа 2007 г.

Выполнены измерения приращения фазы коэффициента отражения от границы воздух–лед на частоте 13.8 GHz вблизи температуры фазового перехода лед–вода. Установлено изменение фазы на значение в несколько десятков градусов при появлении первых признаков таяния. Этот эффект необходимо учитывать при интерпретации данных радиозондирования ледяных объектов, использующих фазовые методы измерений.

PACS: 41.20.Jb

Радиолокационные методы широко используются для изучения особенностей строения ледников [1,2]. Например, с использованием радиолокаторов была получена информация о толщине ледяного щита Антарктиды и обнаружены многочисленные подледниковые озера. Радиозондирование показало, что бурение скважины в районе российской станции „Восток“ позволит проникнуть в крупное подледниковое озеро. В связи с этим в 2008 г. ожидается получение важной информации о составе воды подледникового озера и реликтовых организмов, которые могли сохраниться из-за замкнутости водного объекта.

Однако на сайте [3] появилось сообщение о работах британских ученых, которые, изучая данные микроволновой спутниковой интерферометрии с использованием спутника ERS-2, пришли к выводу о скачкообразных синхронных изменениях высоты ледяного покрова в различных областях Антарктиды. По их мнению, это связано с тем, что подледниковые озера сообщаются между собой, т.е. подо льдом протекают реки. Таким образом, результаты спутниковой ин-

терферометрии радиолокаторами с синтезированной апертурой (SAR) ставят под сомнение целесообразность проекта бурения ледяного шита, поскольку озера связаны между собой и, возможно, с морской средой.

Следует отметить, что в настоящее время электромагнитные свойства пресного льда в микроволновом диапазоне хорошо изучены лишь в температурном интервале от -0.5 до -40°C . В интервале температур $0 \div 0.1^\circ\text{C}$ диэлектрические свойства пресного льда (химически чистого и природного) практически не исследованы. Кроме того, метод интерферометрии с использованием SAR опирается на измерение разности фаз отраженных сигналов при двух пролетах радиолокатора [4]. Поэтому данный метод работает, строго говоря, для случая, когда фаза коэффициента отражения от поверхности исследуемого объекта не изменяется во времени.

В последнее время появились сообщения о том, что вблизи температуры таяния льда его электромагнитные свойства существенно отличаются от свойств, предсказанных на основе теории Дебая. В работе [5] впервые было показано, что в некотором интервале температур около температуры фазового перехода лед–вода во льду наблюдаются так называемые добавочные волны (или волны Гинзбурга–Пекара, ранее предсказанные в кристаллооптике [6,7]). Добавочные волны имеют уникальные свойства — они обладают той же поляризацией, что и исходная волна, но имеют несколько отличное значение волнового вектора, т.е. длины волны и направления фазовой скорости. В результате при радиозондировании как на проход, так и на отражение от границ ледяного объекта при определенных его геометрических размерах возможно частичное пропадание сигнала или его усиление. Как показано в работе [8], этот эффект необходимо учитывать при интерпретации данных радиозондирования, так как могут наблюдаться ложные объекты и исчезновение реально существующего объекта. Кроме того, в [8] в связи с обнаружением добавочных волн была отмечена необходимость более тщательного изучения радиолокационных коэффициентов отражения от границы воздух–лед при температурах вблизи 0°C .

Действительно, из общих соображений следует, что при достижении температуры плавления лед, поглотивший некоторое количество тепла, еще находится в твердом состоянии, но его структура уже нарушена. Свойства такого льда в настоящее время не исследованы. Вместе с тем тающий лед является распространенным природным объектом.

Поэтому если не проявлять осторожности при интерпретации данных радиолокационных измерений, то можно сделать ошибочные выводы о состоянии ледяного тела. Хотя средняя температура во внутренних районах Антарктиды даже летом имеет отрицательные значения, тем не менее могут наблюдаться аномалии, когда температура тонких слоев снежно-ледяного покрова приближается к 0°C . Возможно, что такая ситуация имела место при дешифровке интерферограммы, полученной SAR спутника ERS-2 из двух измерений в различное время, поскольку представлялось, что фаза коэффициента отражения электромагнитной волны от поверхностных слоев покрова не зависит от их температуры.

Цель настоящей работы — измерить изменение фазы коэффициента отражения от границы воздух—пресный лед в сантиметровом диапазоне волн при температуре таяния льда.

Для измерений приращений фазы коэффициента отражения от плоской границы льда использовалась установка, схема которой представлена на рис. 1. Измерения выполнялись на частоте 13.8 GHz.

В установке генератор (Γ) создает излучение электромагнитной волны с использованием антенны (A_1) в направлении блока льда, выполненного в виде прямоугольной усеченной призмы. В волноводном тракте передачи имеются перестраиваемые аттенюатор (АТТ) и фазовращатель (ФВР), а также направленный ответвитель (НО). Часть прямого излучения от Γ просачивается в НО на квадратичный детектор (D_1). Кроме того, на детектор D_1 поступает отраженное от поверхности образца излучение. Два высокочастотных напряжения суммируются, выпрямляются D_1 и создают на нагрузке детектора постоянный ток (I_0). Вследствие квадратичности D_1 постоянный ток через него пропорционален следующей сумме:

$$I_0 \sim \frac{B_1^2}{2} + \frac{B_2^2}{2} + B_1 B_2 \cos \varphi, \quad (1)$$

где B_1 , B_2 — амплитуды прямой и отраженной волн, поступающих на детектор, φ — угол сдвига фаз между двумя волнами.

В схеме установки имеется также детектор D_2 , устанавливаемый для регистрации коэффициента отражения по мощности, что необходимо для корректного вычисления изменения фазы. Сигнал на D_2 поступает с антенны A_2 , расположенной вблизи A_1 . В блок льда на некоторую глубину устанавливается термомпара (ТП). Для сбора данных и измерения температуры использовалась система сбора информации фирмы

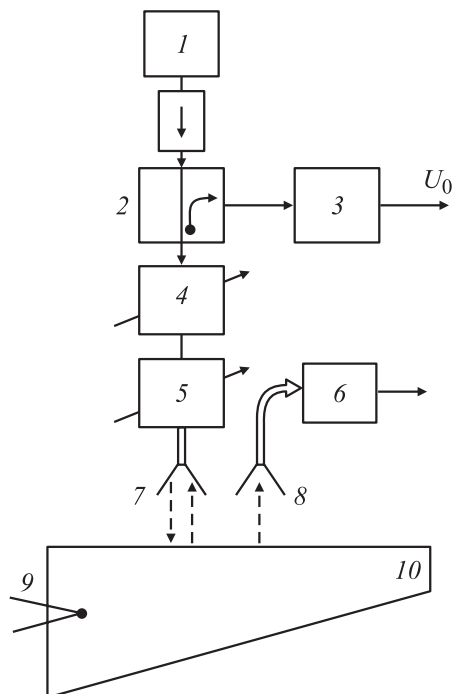


Рис. 1. Схема установки для измерения температурных изменений фазы коэффициента отражения: 1 — Г, 2 — НО, 3 — Д₁, 4 — АТГ, 5 — ФВР, 6 — Д₂, 7 — А₁, 8 — А₂, 9 — ТП. 10 — блок образца льда в виде прямоугольной усеченной призмы.

„Agilent“. Точность измерения температуры составляет $\pm 0.02^\circ\text{C}$. Опрос датчиков производился с интервалом 1 с. Блок льда в виде усеченной прямоугольной призмы имел размеры: $50 \times 50 \text{ cm}^2$ — плоскость, облучаемая антеннами, и 22 см, 5 см — размеры меньших сторон оснований призмы.

Методика измерений заключалась в следующем. Извлеченный из ледяного покрова образец помещался в лабораторное помещение при температуре воздуха $+20^\circ\text{C}$. В процессе нагревания льда измерялись I_0 (или U_0 — напряжение на нагрузке Д₁), t — температура ТП и $K = \frac{P}{P_0}$,

где P — мощность, регистрируемая D_2 , отнесенная к P_0 — начальному значению мощности отраженного сигнала. Измерения выполнены на малой мощности, когда оба детектора работают в квадратичном режиме. В этом случае P и P_0 линейно связаны с напряжением на нагрузке D_2 . Из полученных измерений параметров определялся сдвиг фазы коэффициента отражения.

Для упрощения расчетной формулы использовалась следующая методика первоначальной настройки и калибровки установки. Перестройкой аттенюатора устанавливалось равенство амплитуд опорной и отраженной волн $B_1 = B_2$, проверка их равенства производилась перестройкой ФВР. При этом напряжение на нагрузке детектора U_0 изменялось от некоторого максимального значения U_m , соответствующего $\cos \varphi = 1$, до нуля, когда $\cos \varphi = -1$, в соответствии с формулой (1). Далее для удобства измерений ФВР устанавливали на среднее значение от максимума (в этом случае $\cos \varphi = 0$ и достигается наибольшая чувствительность к изменению разности фаз). Начальной установке соответствует $K = 1$.

Окончательный вид формулы для $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = \frac{\frac{2U_0}{U_m} - \frac{1+K}{2}}{\sqrt{K}}. \quad (2)$$

Отсюда определяется значение угла сдвига фазы и, далее, изменение фазы коэффициента отражения электромагнитной волны от границы воздух–лед.

Измерения выполнены для образцов льда из ледяного покрова пресного природного озера. Концентрация соли во льду порядка 10 mg/kg. График изменения фазы $\Delta\varphi$ коэффициента отражения электромагнитной волны в зависимости от температуры для одного из измерений приведен на рис. 2. Каждая точка графика разделена интервалом времени 12 min. Термопара устанавливалась на глубину 3 см от поверхности льда.

Как следует из полученных данных, на температурной зависимости приращения фазы наблюдаются три области одинакового поведения угла сдвига фаз. Первая область расположена в интервале от начальной температуры -18 до -2.5°C , где отсутствует изменение фазы коэффициента отражения. При температурах от -2.5 до -1°C наблюдалось плавное изменение фазы на 10° и при дальнейшем повышении температуры до -0.5°C она не изменялась. Выше -0.5°C обнаруживается резкое изменение фазы коэффициента отражения.

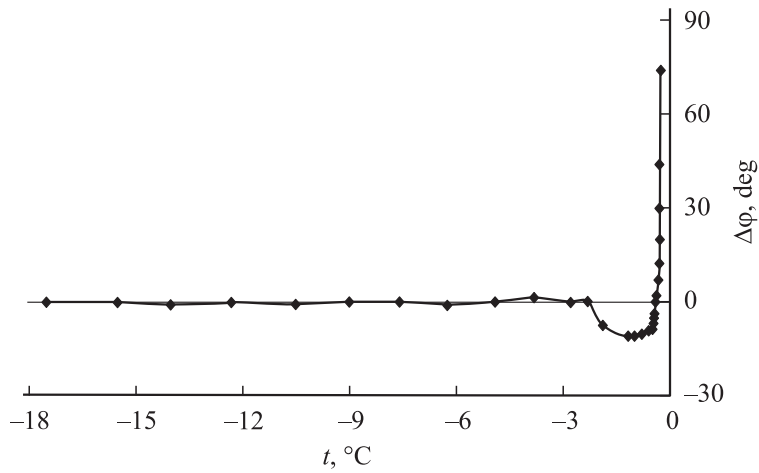


Рис. 2. Зависимость изменения фазы коэффициента отражения от температуры льда при его нагревании на частоте 13.8 GHz.

При анализе полученных зависимостей следует учитывать расположение термопары в образце, поскольку она погружена на несколько сантиметров в глубь образца. Несмотря на медленный разогрев льда, имеет место небольшой градиент температуры. Признаки таяния льда с образованием на поверхности тонкого слоя воды толщиной порядка 0.1 mm начались при показаниях температуры термопары -1°C . Поэтому результаты, относящиеся к температуре -1°C на рис. 2, соответствуют достижению температуры поверхностью образца 0°C и началу таяния льда. При этом тонкая поверхностная пленка воды практически слабо влияла на коэффициент отражения, что проверялось по ее удалению с поверхности при протирке гигроскопичным материалом.

Как показали измерения, дальнейшая многочасовая выдержка образца в лабораторном помещении приводила к появлению периодических изменений амплитуды и фазы коэффициента отражения. Это было связано как с уменьшением геометрических размеров блока, так и, возможно, с развитием процессов таяния в поверхностных слоях и изменением их электромагнитных параметров. Всего было выполнено три измерения на различных блоках льда. Во всех экспериментах получены близкие результаты.

Таким образом, из проведенного эксперимента следует, что при приближении температуры образца из пресного льда к 0°C имеет место некоторое (до 10 градусов) изменение фазы коэффициента отражения на частоте 13.8 GHz; его можно связать с особыми свойствами льда, поглотившего какое-то количество теплоты, но не имеющего внешних признаков таяния. При появлении тонкой пленки воды порядка 0.1 mm и разогреве внутренних слоев льда до температуры $-0.4 \div 0.1^{\circ}\text{C}$ приращение фазы достигает десятков градусов. Этот эффект можно связать со структурной перестройкой слоев льда из-за появления внутренних прослоек воды и особенностями их геометрии. Основным выводом исследования состоит в том, что в любом случае вблизи температуры таяния льда при сохранении его механической целостности и отсутствии заметных количеств жидкой воды наблюдаются значительные изменения фазы коэффициента отражения от границы раздела ледяных тел с воздухом. Данный эффект во избежание ошибочных выводов необходимо учитывать при интерпретации фазовых методов дистанционного зондирования криосферных образований.

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

Список литературы

- [1] Богородский В.В., Бенгли Ч., Гудмандсен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 318 с.
- [2] Johannessen O.M., Khvorostovsky K., Miles M.W., Bobylev L.P. // Science. 2005. V. 310. N 57570. P. 1013–1016.
- [3] http://www.esa.int/esaCP/SEMA94OFGLE_index_2.html (ERS-2 helps detect massive rivers under Antarctica).
- [4] Рис У. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
- [5] Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыбикжапов А.Ц., Цыренжапов С.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 94–97.
- [6] Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1979. 432 с.
- [7] Пекар С.И. Кристаллооптика и добавочные световые волны. Киев: Наук. думка, 1982. 294 с.
- [8] Бордонский Г.С., Гурулев А.А. // Исследование Земли из космоса. 2007. № 4.