

# Изучение волн Гинзбурга-Пекара в ледяных покровах в микроволновом диапазоне

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

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН  
672090, Чита, ул. Бутина 26, а/я 147  
E-mail: [lgc255@mail.ru](mailto:lgc255@mail.ru)*

Приведены результаты экспериментальных исследований преломления и отражения от границы лед-воздух микроволнового излучения. Полученные результаты указывают на то, что пресный лед нельзя считать простой однородной средой. В нем возникают добавочные волны, которые приводят к новым волновым эффектам.

## Введение

При распространении микроволнового излучения через ледяные тела в них наблюдается двойное лучепреломление, которое обычно связывается с анизотропией среды из-за внутренних механических напряжений и определенной ориентацией кристаллов [1]. Однако были выявлены многочисленные аномалии при радиозондировании ледников, которые не удавалось объяснить в рамках простых моделей электромагнитных свойств изучаемых объектов.

В недавних работах [2, 3] сообщалось об обнаружении в ледяных покровах пресных озер в сантиметровом диапазоне «новых» или «добавочных» (по терминологии В.Л. Гинзбурга и С.И. Пекара) волн, которые ранее предсказывались в кристаллооптике для сред с пространственной дисперсией [4, 5]. В отличие от случая двойного лучепреломления, когда линейно поляризованная волна при распространении вдоль некоторых направлений распадается на две ортогонально поляризованные волны, добавочные волны имеют ту же поляризацию, что и исходная, но иное значение волнового вектора. Интерференция исходной и добавочной волн приводит к ряду новых эффектов [6]. Новые волны и двойное лучепреломление создают сложную картину распространения волн в среде с пространственной дисперсией, но позволяют объяснить ранее наблюдавшиеся аномалии при радиозондировании ледников.

## Цель работы и эксперименты

Добавочные волны могут проявиться и в экспериментах, где имеет место прохождение радиоволн через границу сред или отражение от границы. Поэтому в настоящей работе продолжено изучение свойств волн Гинзбурга-Пекара при радиозондировании ледяных объектов. Их исследование необходимо также для выяснения причин возникновения пространственной дисперсии льда. С этой целью были проведены следующие эксперименты.

1. Измерение углов преломления излучения, проходящего через границу лед-воздух. В работе [4] отмечалось, что «новая» волна может обладать отрицательной дисперсией, при которой угол между векторами фазовой и групповой скоростями оказывается больше  $90^\circ$ . В этом случае при прохождении волн через границу раздела сред должно наблюдаться раздвоение пучка выходящего из льда излучения.

Данный эксперимент проводился на ледяном покрове озера с ультрапресной водой на частотах 5,2 ГГц и 13,7 ГГц. В покрове изготавливалось углубление с плоской боковой

поверхностью размерами  $3\text{ м} \times 1\text{ м}$  (толщина ледяного покрова составляла  $1,4\text{ м}$ ). В углубление помещались приемники излучения, устанавливаемые на поворотном устройстве. Расстояние от входной апертуры антенн до стенки выбиралось равным  $1\text{ м}$ . Излучатель располагали в пробуренном отверстии на глубину  $0,5\text{ м}$  на расстоянии от приемника  $30\text{ м}$ . Он создавал излучение с электрическим вектором перпендикулярным поверхности ледяного покрова. При экспериментах температура льда составляла  $-1^{\circ}\text{C} \div -5^{\circ}\text{C}$ . Схема эксперимента представлена на рис. 1. При измерениях снимались угловые зависимости интенсивности преломленной волны на поляризации исходной волны, а также на других линейных поляризациях. Использовались конические рупорные антенны с шириной диаграммы направленности  $6$  градусов на  $13,7\text{ ГГц}$  и  $12$  градусов на  $5,2\text{ ГГц}$ .

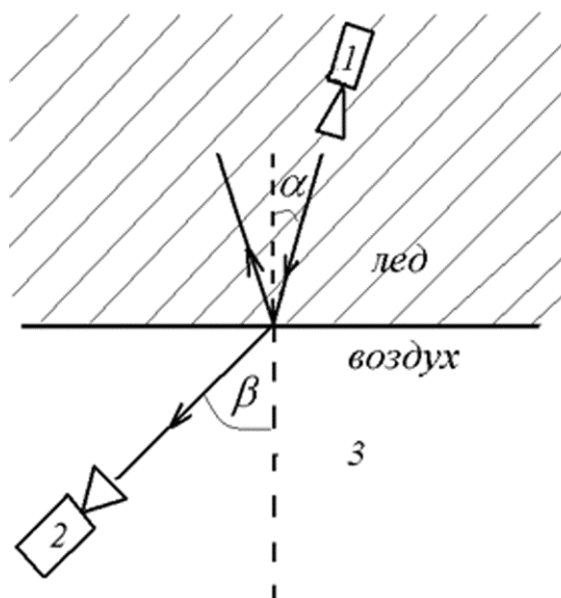


Рис. 1. Схема эксперимента по обнаружению добавочных волн.  $\alpha$  - угол падения;  $\beta$  - угол преломления. 1 – излучатель, 2 – приемник, 3 – углубление в ледяном покрове (вид сверху)

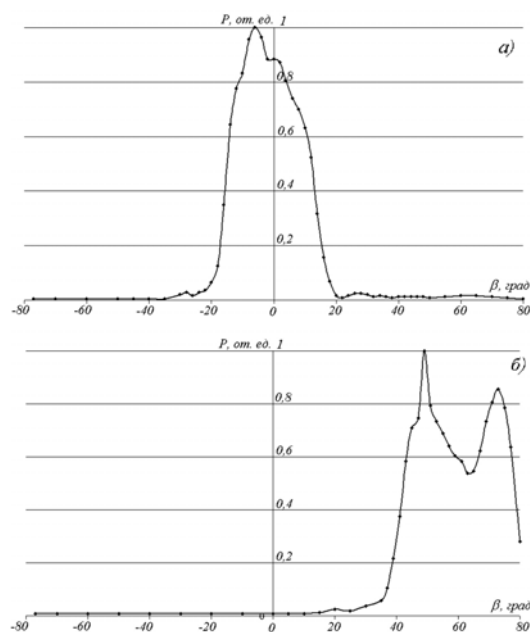


Рис. 2. Зависимость проходящего через границу лед-воздух излучения ( $P$ ) на частоте  $5,2\text{ ГГц}$  от угла преломления при угле падения – а)  $0^{\circ}$ , б)  $30^{\circ}$

## 2. Определение фазы коэффициента отражения от плоской границы раздела воздух-лед.

Естественно предположить, что пространственная дисперсия может проявиться и в изменении фазы коэффициента отражения, если изменять температуру льда. В ранее выполненных экспериментах [3, 4, 7] установлено, что дополнительные волны наиболее ярко проявлялись вблизи температуры фазового перехода лед-вода. Поэтому измерения фазы проведены вблизи  $0^{\circ}\text{C}$  на двух частотах  $5,2\text{ ГГц}$  и  $35\text{ ГГц}$ . Используются две различные методики измерений. В сантиметровом диапазоне собиралась специальная установка, в которой отраженный от исследуемого объекта сигнал складывался с опорным сигналом и по интерференционным изменениям, регистрируемым детектором, определялось изменение фазы коэффициента отражения. Выполнены сравнительные измерения при медленном нагревании образца до температуры плавления. Образец для уменьшения интерференционных явлений изготовляли в виде прямоугольной усеченной призмы.

В миллиметровом диапазоне измеряли мощность прошедшего через плоскопараллельную пластинку из льда излучения и изучалась зависимость сигнала от температуры образца. Обе

установки размещались в лабораторном помещении при положительных температурах, где происходило медленное нагревание образцов до температуры плавления.

### Результаты измерений

Зависимости регистрируемой мощности от угла  $\beta$  для двух углов  $\alpha$  ( $0^\circ$  и  $30^\circ$ ) на исходной поляризации (горизонтальной для геометрии эксперимента) приведены на рис. 2, 3. Угол полного внутреннего отражения для случая однородной и изотропной среды с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon' = 3,15$  составлял по расчетам  $34^\circ$ . Для угла падения  $30^\circ$ , угол преломления должен равняться  $62^\circ$ .

На рис. 4 приведены результаты измерений для угла падения  $45^\circ$ , превышающего угол полного внутреннего отражения.

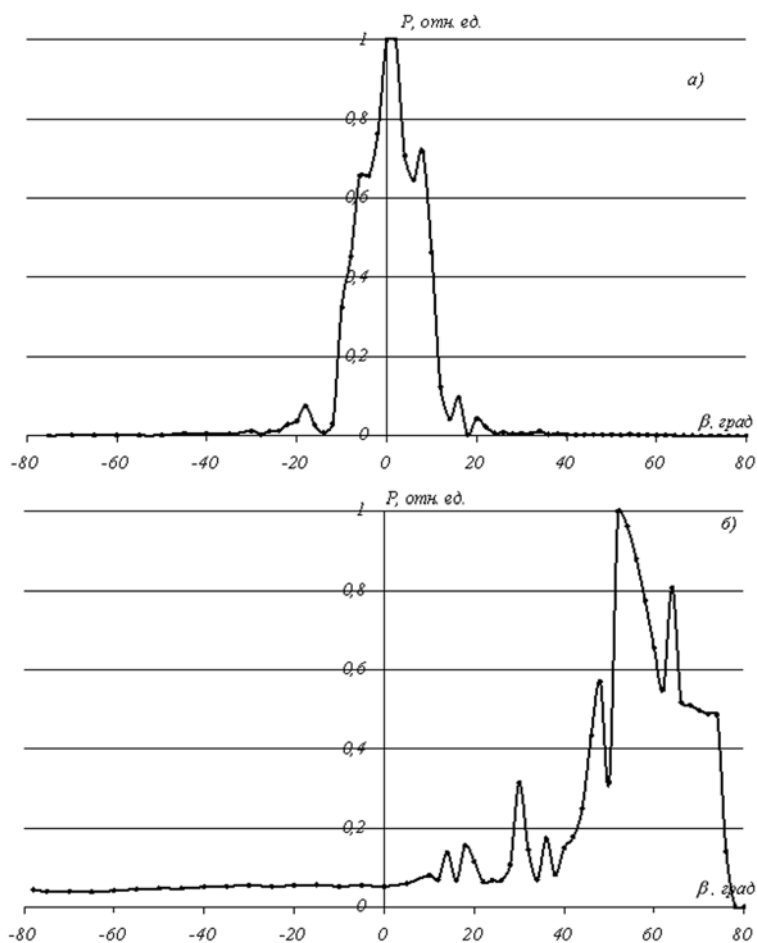


Рис. 3. Зависимость мощности регистрируемого сигнала на частоте 13,7 ГГц от угла преломления при угле падения – а)  $0^\circ$ , б)  $30^\circ$

Как следует из полученных результатов, наблюдается расширение пучка излучения на частоте 5,2 ГГц приблизительно в два раза, причем при измерениях на других поляризациях (при приеме на  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$ , ВП) наблюдался более четко выраженный провал вблизи угла наблюдения  $0^\circ$ . При  $\alpha=30^\circ$  просматриваются два максимума, симметричные относительно угла  $62^\circ$ . На этих же зависимостях есть небольшие изгибы графиков.

Результаты измерений на частоте 13,7 ГГц свидетельствуют о существовании трех и более волн с различными направлениями волновых векторов. Измерения для угла падения  $45^\circ$

дают интенсивность сигнала приблизительно на порядок меньшую, чем для угла  $30^\circ$ . Если считать, что поле проникающее из льда при углах падения больших угла полного внутреннего отражения пренебрежимо мало на расстояниях в несколько десятков длин волн от границы раздела, то, в данном случае, наблюдаются волны слабой интенсивности с волновыми векторами имеющими направления заметно отличающимися от направления вектора групповой скорости. Возможность появления нескольких добавочных волн в среде с пространственной дисперсией отмечалось в работе [7], однако автор посчитал ее маловероятной для кристаллооптики.

Результаты измерений фазы коэффициента отражения на частоте 13,8 ГГц при нормальном падении излучения на плоскую границу воздух-лед при изменении температуры блока льда приведены на рис. 5. На рис. 6 представлены результаты измерений проходящего через блок льда, толщиной 10 см, излучения на частоте 35 ГГц от температуры образца. Во всех экспериментах использовались образцы льда, изъятые из ледяного покрова пресного озера. Минерализация льда составляла 5-10 мг/кг.

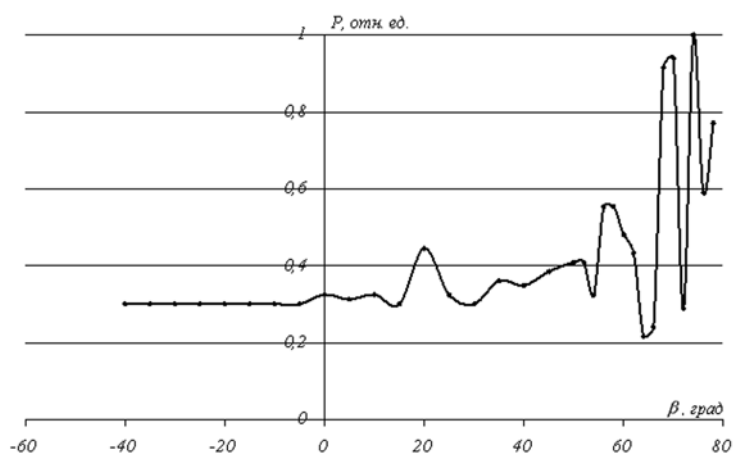


Рис. 4. Зависимость мощности регистрируемого сигнала на частоте 13,7 ГГц от угла преломления при угле падения  $45^\circ$

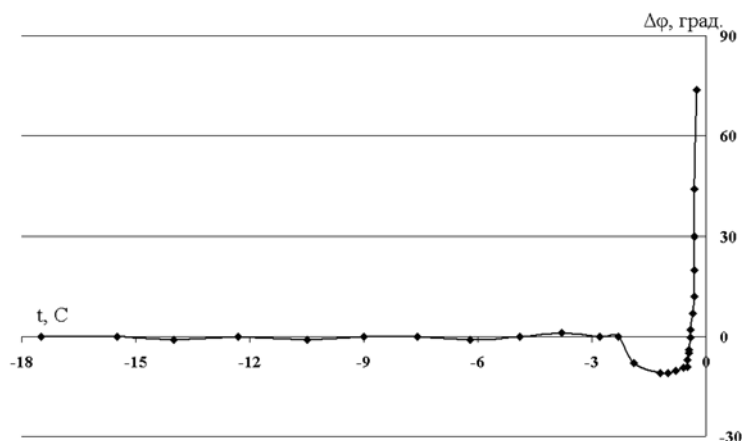


Рис. 5. Изменение фазы коэффициента отражения на частоте 13,8 ГГц от температуры льда при его нагревании

Как следует из рис. 5, имеет место заметное изменение фазы коэффициента отражения вблизи температуры таяния льда. Область I на графике соответствует появлению на поверхности льда пенки воды толщиной около 0,1 мм. Сама пленка слабо влияет на результат измерения, что проверялось ее удалением при протирке. Резкое изменение фазы соответствует, по-видимому, развитию таяния в приповерхностном слое льда без видимых признаков его разрушения. При

измерениях на 35 ГГц наблюдались сильные вариации прохождения сигнала при появлении первых признаков таяния. По мере развития таяния сигнал менялся медленно, что связывалось с уменьшением толщины образца. Отметим, что повторное замораживание блока с его последующим нагреванием существенно изменяло картину интерференции. В этом случае эффект вариаций фазы при достижении  $0^{\circ}\text{C}$  значительно ослаблялся.

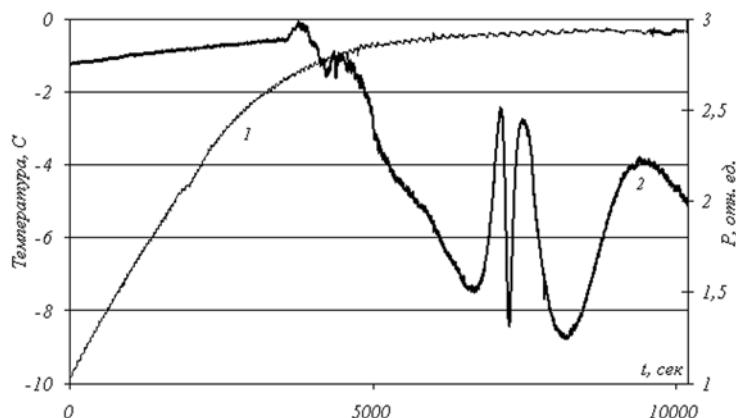


Рис. 6. 1 – Вариации мощности проходящего через блок льда излучения на частоте 35 ГГц вблизи температуры фазового перехода лед-вода; 2 – запись температуры льда от времени с использованием термомпары

### Заключение

Измерение углов преломления на границе раздела лед-воздух выявило расщепление падающего излучения на несколько лучей, что указывает, по-крайней мере, на существование анизотропии среды и появление нескольких волн с различающимися направлениями волновых векторов. Анализ полученных результатов для используемых антенн с относительно широкими диаграммами направленности не позволяет однозначно определить наличие в среде обратных волн. Для этой цели необходимы эксперименты на более коротких волнах, где легче обеспечить узкие диаграммы направленности и получить большее отношение размеров объекта к длине волны. Кроме того, не ясно будет ли обратная волна в среде с пространственной дисперсией преломляется в соответствии с законами преломления для среды с отрицательной дисперсией. В данном эксперименте этого явно не наблюдалось.

Измерения фазы коэффициента отражения показывают ее значительное изменение при появлении первых признаков таяния льда. При этом наблюдалась зависимость эффекта от тепловой истории образца. Установлено, что фаза коэффициента отражения начинает изменяться при температурах выше  $-1^{\circ}\text{C}$ . Данный эффект следует учитывать при интерпретации результатов радиолокационных измерений состояния ледяных образований, использующих фазовые методы.

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

### Литература

1. Богородский В.В., Бентли Ч., Гундмандсен П. Радиогляциология. – Л.: Гидрометеоздат. 312 с.
2. Бордонский Г.С. Электромагнитные свойства льда вблизи температуры фазового перехода вода-лед // Физика твердого тела. 2005. Т.47. № 4. С. 691-695.
3. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В., Цыбикжапов А.Ц. Обнаружение пространственной дисперсии для микроволнового излучения в ледяных покровах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей Т.П. М.: ООО «Азбука-2000». 2006. с. 45 – 49.

4. *Агранович В.М., Гинзбург В.Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. – М.: Наука. 1979. 432 с.
5. *Пекар С.И.* Кристаллооптика и добавочные световые волны. – Киев. Наукова думка. 1982. 294 с.
6. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыбикжапов А.Ц., Цыренжапов С.В.* Обнаружение «новых» волн Гинзбурга-Пекара во льду в микроволновом диапазоне // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. № 5. С. 94 – 97.
7. *Пекар С.И.* Добавочные световые волны в кристаллах и экситонные поглощения // УФН. Т. LXXVII вып. 2. 1962. С. 309 – 319.