

05:09;12

## Обнаружение „новых“ волн Гинзбурга—Пекара во льду в микроволновом диапазоне

© Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов, А.Ц. Цыбикжапов, С.В. Цыренжапов

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,  
672090 Чита, Россия,  
e-mail: lgc255@mail.ru

(Поступило в Редакцию 7 июня 2005 г.)

Экспериментально исследован недавно обнаруженный эффект пространственной дисперсии в пресном льду для микроволнового излучения. Наиболее ярко этот эффект проявляется в возникновении дополнительных волн с той же поляризацией, что и исходная, но с другим значением волнового вектора. Этот эффект был впервые рассмотрен в работах В.Л. Гинзбурга и С.И. Пекара. В общем случае монохроматического излучения в среде возможно существование четырех волн с различными волновыми векторами. Интерференцией этих волн можно объяснить аномалии электромагнитных свойств ледяных структур, которые наблюдались ранее. Новые эксперименты по изучению поляризационных особенностей сигнала, проходящего через ледяной покров, подтверждают существование пространственной дисперсии в микроволновом диапазоне.

PACS: 41.20.Jb

### Введение

Электрические свойства сплошных сред в зависимости от частоты внешнего поля  $\omega$  в каждой точке пространства характеризуются тензором диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ij}(\omega)$ . Однако кроме частотной дисперсии в электродинамике сплошных сред в ряде случаев необходим учет пространственной дисперсии, когда тензор  $\varepsilon_{ij}$  зависит также и от волнового вектора  $\kappa$ , т.е.  $\varepsilon_{ij}(\omega) = \varepsilon_{ij}(\omega, \kappa)$  [1]. Эффекты пространственной дисперсии в среде определяются отношением  $\alpha/\lambda$ , где  $\alpha$  — некоторый размер, характеризующий среду, параметр решетки и т.п.,  $\lambda$  — длина волны в среде.

Обычно в оптике отношение  $\alpha/\lambda$  мало, и эффекты пространственной дисперсии проявляются лишь для макроскопических образцов и на достаточно большом расстоянии распространения электромагнитной волны. Однако учет пространственной дисперсии весьма важен для понимания новых эффектов, которые отсутствуют в линейной электродинамике сплошных сред. К таким эффектам, например, относится оптическая активность (гиротропия) — вращение плоскости поляризации электромагнитной волны, а также появление „новых“ или „добавочных“ волн, имеющих другое значение волнового вектора при неизменных частоте и поляризации. „Новые“ волны впервые рассматривались в работах В.Л. Гинзбурга и С.И. Пекара [1,2].

Общий случай решения задач с учетом пространственной дисперсии достаточно сложен и требует знания свойств тензора  $\varepsilon_{ij}$ . Для природных сред, насколько нам известно, эффекты пространственной дисперсии практически не изучены. Во-первых, они слабы из-за малого значения параметра  $\alpha/\lambda$ , во-вторых, периодичность структур не характерна для природных объектов из-за хаотичного расположения кристалликов и других структурных элементов в средах. При переходе к радиодиапазону ситуация с наблюдением эффектов

пространственной дисперсии, казалось бы, еще более усугубляется, так как  $\lambda$  значительно возрастает.

Вместе с тем в работе [3] сообщалось о наблюдении „новых“ волн в СВЧ-диапазоне на сантиметровых волнах в ледяном покрове пресного озера. Особенность эксперимента заключалась в том, что „новая“ волна наблюдалась в весенний период времени, когда температура льда приближалась к  $0^\circ\text{C}$ . „Новая“ волна проявлялась в интерференции с обычной волной при изменении расстояния между приемником и передатчиком, в эксперименте расстояние изменялось от 40 до 100 м при этом вместо монотонного падения принимаемой мощности на вертикальной и горизонтальной поляризациях наблюдались ее осцилляции с одинаковым пространственным периодом.

Цель данной работы — продолжение исследований эффекта пространственной дисперсии во льду для установления причин явления и объяснение на основе имеющихся данных ранее наблюдавшихся аномалий радиозондирования ледяных тел.

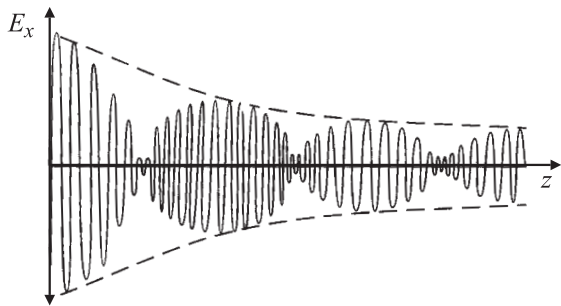
### Рассмотрение эффекта пространственной дисперсии

Появление „новых“ волн можно качественно понять из следующего рассмотрения решения для однородной монохроматической волны и для одной из компонент поля, например, электрического

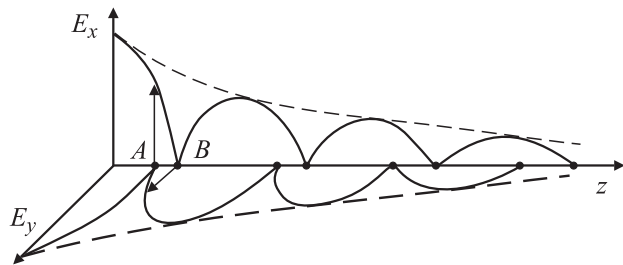
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin(\omega_0 t - \kappa_0 \mathbf{r}), \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi/T$ ;  $T$  — период колебаний;  $\kappa = 2\pi\mathbf{S}/T$ ;  $\mathbf{S}$  — единичный вектор в направлении распространения волны;  $\mathbf{r}$  — радиус вектор.

Если в (1)  $\mathbf{E}_0$  модулировать по времени, т.е. задать  $\mathbf{E}_0$  в виде  $\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}' \sin \Omega t$ , то электромагнитная



**Рис. 1.** Картины биений при сложении волн одинаковой амплитуды с близкими длинами волн для одинаковой линейной поляризации при удалении от излучателя.



**Рис. 2.** Структура электромагнитного поля (для огибающей амплитуд) волны при существовании двух ортогональных и двух добавочных волн (все имеют близкие, но различные длины), что приводит к интерференции поля вдоль осей  $x$  и  $y$ . Структура поля при удалении от источника определяется суммой полей  $E_x$  и  $E_y$ .

волна будет содержать две синусоиды с двумя частотами:  $\omega_{1,2} = \omega_0 \pm \Omega$ . Если в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  расположить периодическую конструкцию с периодом  $d$ , материал которой имеет другое значение диэлектрической проницаемости, то  $\mathbf{E}_0$  будет промодулирована по пространству:  $\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}' \cos \Delta k Z$ , где  $\Delta k$  характеризует период конструкции  $\Delta k = 2\pi/\alpha$ , и в пространстве появятся две волны с двумя пространственными частотами ( $1/\lambda$ ), определяемыми из  $\kappa_{1,2} = \kappa \pm \Delta k$ .

Существование двух волн с близкими  $\kappa$  приводит к возникновению биений. Эта ситуация представлена на рис. 1.

При распространении в среде волны с круговой поляризацией биения возникнут для волн с ортогональными поляризациями, и в пространстве будут существовать четыре волны [1]. В общем случае для ортогональных полей  $\kappa$  будут отличны. При этом структура поля будет такой, как это показано для части пространства на рис. 2. Из него следует, что в точке  $A$  сигнал будет иметь только линейную поляризацию по оси  $X$ , а в точке  $B$  — только по оси  $Y$ . Структура поля волны в пространстве рис. 2 позволяет предсказать некоторые новые эффекты.

1. Вариации первого параметра Стокса  $S_1$  при внешних воздействиях. Предположим, что положение приемника и передатчика не изменяются, однако свой-

ства среды изменяются, например, из-за температурного изменения  $\epsilon_{ij}$ . При этом картина, представленная на рис. 2, будет растягиваться или сжиматься вдоль оси  $Z$ . Минимум значения  $S_1$  будет соответствовать полям вблизи точек  $A$  и  $B$ . Если внешний параметр непрерывно возрастает, а  $S_1$  пробегает несколько минимумов, то по их значениям можно сделать вывод о разностях  $\Delta k$ ; волновых чисел наблюдаемых волн. Слабо выраженные минимумы свидетельствуют или о значительных сдвигах  $\Delta k$  „новых“ и обычных волн или о слабости эффекта пространственной дисперсии.

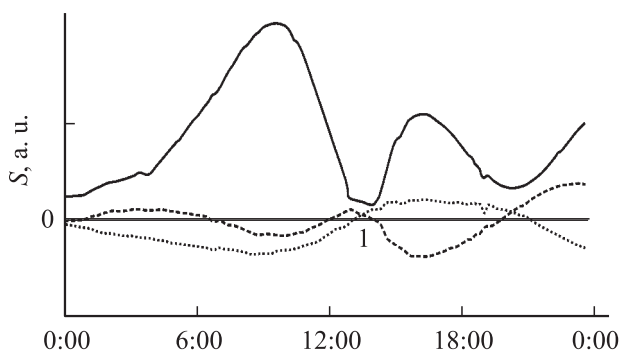
2. Аномалии при радиолокационном зондировании. В этом случае, например, при радиолокационном зондировании ледников, могут появиться как сильные отражения от слабо выраженных слоев, так и пропадание обратного отраженного сигнала от границ раздела зондируемых сред.

3. Смена знаков  $S_2$  и  $S_3$ , второго и третьего параметров Стокса, вблизи точек  $A$  и  $B$ . Особенность данного эффекта для случая существования пространственной дисперсии заключается в том, что он сочетается с достижениями параметра  $S_1$  минимальных значений, что можно видеть из рис. 3.

4. Вариации углов прихода излучения при изменении дистанции между приемником и передатчиком. Как это представлено в [1], векторы групповой скорости  $\mathbf{V}_{gr}$  и фазовой скорости  $\mathbf{V}_f$  волны для случая пространственной дисперсии не совпадают для „новой“ волны и угол между ними больше  $90^\circ$ . В общем случае в зависимости от характера анизотропии среды, он изменяется от  $\pi/2$  до  $\pi$ . Если в эксперименте варьировать расстояние между передатчиком и приемником в среде, то, в зависимости от локальных проявлений анизотропии среды, угол прихода электромагнитной волны может изменяться в некоторых пределах.

Отрицательная дисперсия для „новой“ волны вызывает аномалии законов преломления [4], что может приводить к разнообразным необычным эффектам при переходе волн через границы раздела сред.

5. Нелинейность угла поворота осей эллипсов поляризации от расстояния. Для обычных гиротропных сред угол поворота плоскости поляризации ( $\varphi$ ) пропорциона-



**Рис. 3.** Суточные изменения параметров Стокса излучения, проходящего через лед. Расстояние между приемником и передатчиком 40 м. Измерения на льду оз. Арахлей 14.03.2005 г.

лен длине пути луча ( $L$ ):  $\varphi = bL$ , где  $b$  — постоянная вращения. Если в среде появляются добавочные волны, для которых все волновые векторы не равны между собой, и производится настройка приемника при работе на линейной поляризации на максимум приема, то линейное соотношение между  $\varphi$  и  $L$  нарушается.

Сложная структура сигнала, состоящая из четырех линейно поляризованных волн с различными значениями волновых векторов приводит к сильному искажению эллипса поляризации. В этом случае состояние сигнала можно представить в виде двух эллипсов поляризации [1]. Их наложение при некоторых условиях может приводить к появлению четырехлепестковой поляризационной розетки или принимать вид „гантели“.

## Экспериментальные результаты

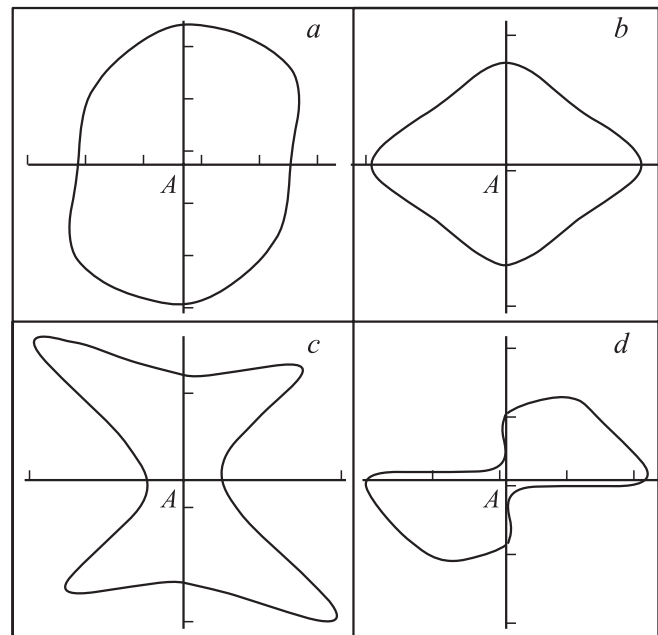
Методика измерений особенностей поляризационного состояния сигнала при радиопросвечивании ледяного покрова приведена в [3]. Дополнительные эксперименты выполнены в весенний период в 2005 г. на льду озера Арахлей, расположенного на Яблоновом хребте в Читинской области. В экспериментах излучатель на диоде Ганна на волну 2.3 см помещался в ледяной покров в круглое углубление во льду диаметром 20 см на глубину  $\sim 50$  см. Излучение осуществлялось на одной из линейных поляризаций — вертикальной (ВП) или горизонтальной (ГП). Приемник излучения — супергетеродинный радиометр размещался в прямоугольном углублении. Прием производился на четырех линейных поляризациях: ВП, ГП,  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$ . Расстояние между приемником и передатчиком изменялось от 40 до 100 м с шагом 2 м. Для устранения эффектов „затенения“ среды углублениями, число которых составило около 100, они располагались на линии, которая имела некоторый угол с направлением между антеннами устройств. Толщина льда в период измерений составляла 130–140 см, а снежного покрова  $\sim 2$  см.

При анализе результатов находились зависимости мощностей принимаемых сигналов от времени и расстояния  $P_{hp}$  — на горизонтальной,  $P_{vp}$  — на вертикальной поляризации;  $P_{45}$ ,  $P_{-45}$  — на сорока пяти градусах, из которых определялись параметры Стокса:  $S_1 = P_{hp} + P_{vp}$ ,  $S_2 = P_{hp} - P_{vp}$  и  $S_3 = P_{45} - P_{-45}$ . По полученным данным строились кривые поляризационного состояния приходящего сигнала, отсчитываемого в четырех представленных поляризационных базисах.

На рис. 3 приведены характерные суточные изменения параметров Стокса при неизменном расстоянии между приемником и передатчиком. Излучение осуществлялось на вертикальной поляризации. Несмотря на кажущуюся симметрию среды относительно данного поляризационного базиса наблюдается появление горизонтальной компоненты, т.е. эллипса поляризации, характерного для сред с двойным лучепреломлением. При этом  $S_1$  (сплошная кривая) испытывает значительные вариации, не связанные с потерями в среде, так как два максимума

достигаются в дневное время, когда температура воздуха и льда максимальны, и можно было ожидать уменьшения данного параметра из-за некоторого роста затухания. В областях минимума  $S_1$  (точка 1) излучение имеет круговую поляризацию, т.к.  $S_2 = S_3 \approx 0$ . В момент времени, предшествующий точке 1, поляризационное состояние испытывает более сложное изменение, так как  $S_2$  (штриховая кривая) изменяется немонотонно. Кроме того, в окрестности точки 1 параметры  $S_2$  и  $S_3$  (пунктирная кривая) меняют знаки. В данном эксперименте дополнительно непрерывно измерялись: температура воздуха, атмосферное давление, влажность и расстояние между приемником и передатчиком. Расстояние между приемником и передатчиком измерялось при помощи лазерного измерителя дистанции. Как оказалось, между метеоданными и кривыми изменения параметров Стокса отсутствовала прямая корреляционная связь.

На рис. 4 представлены поляризационные особенности сигнала для различных моментов времени. Рис. 4, *a* напоминает эллипс поляризации: на рис. 4, *b* эллипс явно деформирован. Однако рис. 4, *c*, *d* свидетельствуют о необычности свойств среды, когда эллипс поляризации заметно искажается. В данном случае он превращается в более сложную замкнутую фигуру, содержащую четыре лепестка. Такая поляризационная картина возможна лишь при наличии большей, чем два базисных состояния, распространяющейся монохроматической волны. Аналогичная поляризационная картина получена при изменении расстояния между передатчиком и приемником.



**Рис. 4.** Поляризационное состояние принимаемого сигнала в различные моменты времени при неизменном расстоянии между передатчиком и приемником. Время измерений: *a* — 12.03.05, 18 : 15, *b* — 15.03.05, 12 : 50, *c* — 13.03.05, 19 : 10, *d* — 14.03.05, 23 : 06.

## Обсуждение полученных результатов

Вариации параметров Стокса наблюдались нами и ранее. В работе [5] регистрировались резко выраженные суточные изменения  $S_1$  в сантиметровом и миллиметровом диапазонах на льду озера Байкал, ледяной покров которого содержит малое количество солевых включений. В работе [6] при измерениях в зимнее время установлена явная связь между изменением  $S_1$  и температурой воздуха.

В работах других авторов по радиозондированию ледяных тел [7–9] обнаружены аномалии в распространении поляризованного излучения, которые невозможно объяснить ошибками эксперимента. Так, в работе [7] отмечалась неоднозначность угла поворота плоскости приемного диполя, настраиваемого на максимум сигнала, при радиолокационном определении ложа ледника. Угол поворота диполя при первом отражении сигнала не был равен тому же углу для вторично отраженного сигнала. Данное наблюдение можно объяснить, если учесть образование „новых“ волн с иным значением волнового вектора. В работе [8] отмечено пропадание отраженного сигнала от границы ледника при вертикальном зондировании в центральных районах Антарктиды, что имело место до 70% длины трассы измерений. Кроме того, часто отмечались заметные отражения от слоев внутри ледников, которые трудно отождествить с какими-либо реальными объектами.

В работе [9] при использовании двухпозиционного метода радиозондирования ледника с интерференцией двух лучей — прямого, проходящего через воздушную среду, и отраженного от нижней границы ледника, получены явные противоречия. При некоторых условиях расчетная скорость распространения сигнала обращалась в бесконечность.

Эффект пространственной дисперсии проявляется не только для ледяного покрова и ледников, он наблюдался в ином виде для другого случая. Так, в лабораторном эксперименте по измерениям спектра пропускания полностью заполненного льдом резонатора при нагревании льда до  $0^\circ\text{C}$  с последующим охлаждением наблюдалось расщепление резонансной кривой пропускания [3]. Данный эксперимент свидетельствует о том, что одной длине волны в среде соответствует две резонансные частоты, и дисперсионная кривая содержит участки с отрицательной дисперсией [10].

Существованием двух интерферирующих волн можно объяснить результаты измерений затухания в блоках пресного льда на длине волны 8.2 мм [11]. По непонятным для авторов причинам затухание для различных образцов изменялось от 0 до 13 dB/m.

Возникает естественный вопрос о механизмах возникновения пространственной дисперсии во льду в микроволновом диапазоне. В [3] предполагалось, что она связана с существованием во льду кристалликов, имеющих характерные размеры в данном объекте и разделенных тонкими пленками жидкой воды. Этот размер имел

порядок 1 мм до данным измерений в поляризационном микроскопе. Если это так, то придется признать, что незамерзшие пленки обладают значительной проводимостью на СВЧ, поскольку их объем при температуре ниже  $0^\circ\text{C}$  для пресного льда составляет  $\sim 10^{-5}$  весовых частей. Возможны и другие механизмы возникновения пространственной дисперсии, связанные с нелинейными свойствами среды, например, высокой подвижностью протонов во льду вдоль линии водородных связей [12].

## Выводы

1. Выявленные аномалии распространения микроволнового излучения в пресных природных льдах в различных экспериментах хорошо объясняются существованием „новых“ волн Гинзбурга–Пекара для непрерывной среды с пространственной дисперсией.

2. Проявление пространственной дисперсии приводит к отрицательной дисперсии, при которой угол между векторами фазовой и групповой скоростями волн превышает  $90^\circ$ , поэтому можно ожидать новые эффекты при распространении и преломлении волн на границах с мерзлыми средами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 02-03-16042).

## Список литературы

- [1] Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1979. 432 с.
- [2] Пекар С.И. Кристаллооптика и добавочные световые волны. Киев: Наукова думка, 1982. 294 с.
- [3] Бордонский Г.С. // ФТТ. 2005. Т. 47. № 4. С. 691–695.
- [4] Силин Р.А. // РиЭ. 2002. Т. 47. № 2. С. 186–191.
- [5] Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыренжанов С.В. // Естественные науки и экология. Омск, 1999. С. 34–37.
- [6] Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Рябова Л.Д., Савиных А.М. // Исследование Земли из космоса. 1996. № 1. С. 34–39.
- [7] Богородский В.В., Трепов Г.В. // Тр. арктич. и антаркт. НИИ. 1983. Т. 379. С. 18–25.
- [8] Богородский В.В., Бентли Ч., Гудмансен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 312 с.
- [9] Федоров Б.А. // Тр. арктич. и антаркт. НИИ. 1987. Т. 359. С. 48–55.
- [10] Блюх К.Ю., Блюх Ю.П. // УФН. 2004. Т. 174. № 4. С. 439–447.
- [11] Глушнев В.Г., Слуцкер Б.Д., Финкельштейн М.И. // Изв. вузов. Радиопизика. 1976. Т. XIX. № 9. С. 1305–1307.
- [12] Petrenko V., Whitworth R.W. Physics of Ice. Oxford Univ. Press., 2002. 347 p.