

Особенности электромагнитных свойств льда и радиозондирование объектов криосферы

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

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
672090 Чита, ул. Бутина, 26
E-mail: lgc255@mail.ru*

Обобщены имеющиеся экспериментальные результаты изучения аномалий электромагнитных свойств льда в микроволновом диапазоне. Высказаны предположения о причинах этих аномалий. Отмечена необходимость учета добавочных волн и изменений фазы коэффициента отражения от границ сред при решении обратных задач.

Ключевые слова: электромагнитные свойства льда, микроволновый диапазон, коэффициент отражения, обратные задачи.

Введение

Вода в жидком и твердом состоянии — важный объект изучения в задачах дистанционного зондирования криосферы. Электромагнитные свойства жидкой воды представляются достаточно хорошо изученными. Что касается льда, то в последнее время были установлены особые электромагнитные свойства, связанные с проявлением пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости [1]. Обнаружение этих свойств требует, во-первых, их более тщательного изучения и установления причин особых электромагнитных свойств льда и, во-вторых, изменения подходов к обработке информации при решении обратных задач дистанционного зондирования. В настоящей статье обсуждаются достигнутые результаты в данном направлении.

Аномалии микроволновых свойств пресного льда

Изучение электромагнитных свойств ледяных объектов затруднено из-за их высокой изменчивости, трудностей контроля примесей и структуры, зависимости свойств от предистории образования и существования объекта. Поэтому аномалии электромагнитных свойств были выявлены эмпирическим путем при анализе ранее полученных экспериментальных данных и накоплении результатов специальных экспериментов.

Выполнены следующие исследования: изучены свойства резонаторов заполненных льдом в сантиметровом диапазоне [2]; обнаружены добавочные («новые») волны, предсказанные в [3, 4] в кристаллооптике, для микроволнового излучения в ледяных покровах [1]; измерены углы преломления СВЧ-излучений на границе лед-воздух [5]; измерены изменения фазы коэффициента отражения от границы воздух-лед при нагревании льда до 0°C [6]; а также измерены коэффициенты корреляции радиотеплового излучения тонких зимних кристаллических облаков [7].

Кратко изложим итоги этих исследований.

а) Изучение свойств резонаторов со льдом проводили для случая их полного заполнения исследуемой средой. При измерениях температуры наблюдали искажение резонансных кривых, которые не были связаны со свойствами резонаторов. Эти исследования послужили началом для натурных измерений распространения микроволнового излучения в протяженных объектах.

б) Добавочные волны. Их наблюдали при радиопросвечивании пресных ледяных покровов на дистанциях до 1 км, и более, по существенным изменениям регистрируемой мощности от расстояния на

частотах от 1,6 ГГц до 35 ГГц. В этих экспериментах наблюдали сильную временную и пространственную изменчивость поляризационного состояния и интенсивности регистрируемого сигнала. Пример таких изменений приведён на рис. 1-2. На рис. 1 приведены результаты поляризационных измерений проходящей через ледяной покров мощности излучения на 12-ти линейных поляризациях в частотном интервале от 13,0 ГГц до 14,0 ГГц. Результаты представлены в виде полярных поляризационных диаграмм, которые для монохроматического излучения должны иметь вид «восьмерки» (линейная поляризация), и изменяться к «кругу» при переходе от линейной к круговой поляризации. В приведенных данных наблюдали заметное отклонение поляризационных диаграмм от обычного случая, когда в среде имеется одна или две волны на ортогональных поляризациях.

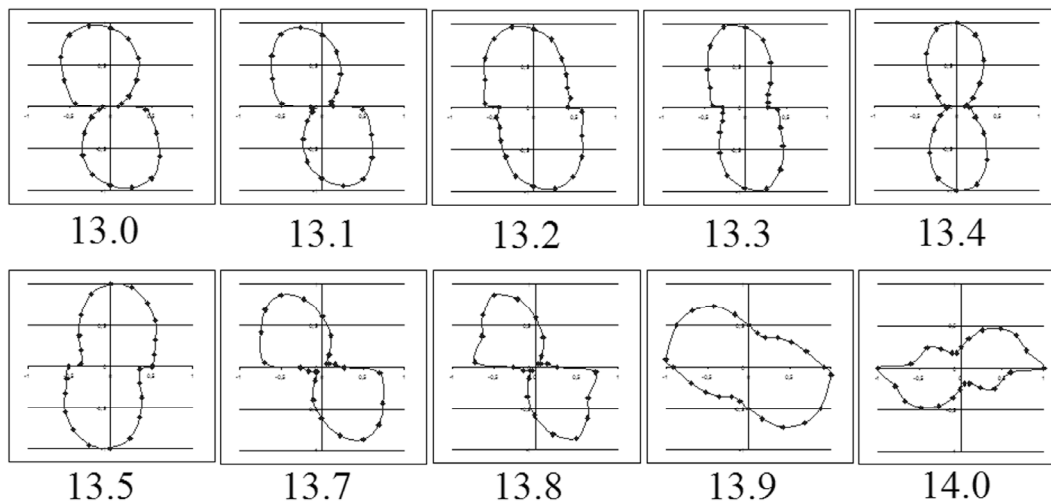


Рис. 1. Частотный ход поляризационной диаграммы в полярных координатах для интенсивности проходящего через пресный лед излучения на расстоянии 40 метров. Измерения на пресном оз. Арахлей Забайкальского края 24 марта 2007 г. перед началом таяния льда. Излучатель настроен на вертикальную поляризацию (электрическое поле перпендикулярно границам раздела сред)

На рис. 2. приведен частотный ход интенсивности сигнала на 4-х поляризациях. Наблюдаются также приблизительно десятикратные вариации мощности при изменении частоты на 1% (изменения вблизи 13,5-13,6 ГГц связаны с совпадением частот зондирующего сигнала и частоты гетеродина приемника излучения).

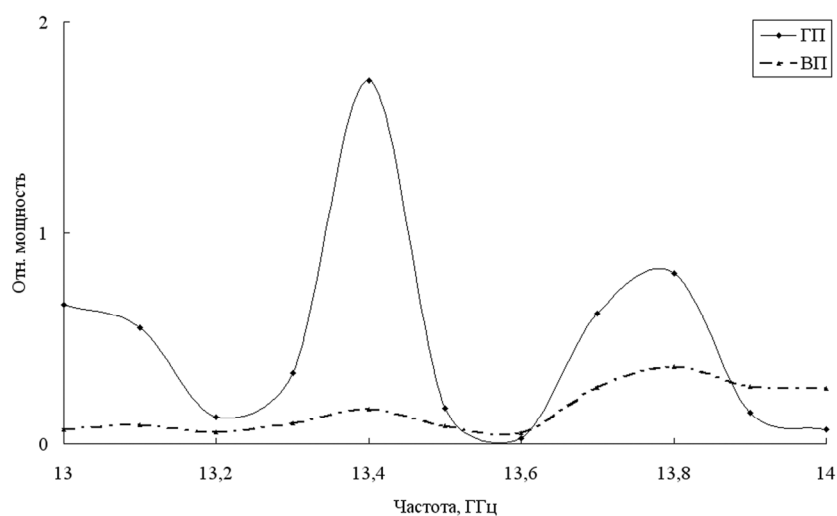


Рис. 2. Частотный ход изменения интенсивности сигнала в относительных единицах на двух линейных поляризациях для данных на рис.1. Частота гетеродина приемника 13,55 ГГц, нижняя частота усилителя промежуточной частоты 60 МГц

в) Измерения фазы коэффициента отражения в сантиметровом диапазоне выявили немонотонный ход ее изменения при температуре выше -2°C . Частично эффект можно объяснить появлением в поверхностном слое увлажнения. При приближении к 0°C изменение фазы резко возрастало достигая десятков градусов. Предположительно эффект может возникать и из-за перколяции при росте удельной электрической проводимости квазизидкого слоя на поверхности кристаллов льда [8], а также вследствие изменения свойств кристаллов льда.

г) Измерения углов преломления при прохождении излучения через границу лед-воздух показали расщепление лучей на два и более, что указывает на существование добавочных волн с иными значениями волнового вектора. При этом отрицательной дисперсии не выявлено. В сопоставлении с результатами измерений поляризационных диаграмм эти данные указывают на то, что волновые векторы исходной и добавочной волн не совпадают по направлению.

д) Исследована корреляция радиотеплового излучения тонких кристаллических облаков в зимнее время, когда температура воздуха в атмосфере падала ниже -30°C . В этих экспериментах осуществлялся поиск добавочных волн в собственном радиотепловом излучении для дисперсной среды. Результаты эксперимента показали, что в зимнее время коэффициент корреляции на двух длинах волн миллиметрового диапазона имеет как положительные, так и отрицательные значения. В летнее время преобладают положительные значения данного коэффициента. Полученные результаты указывают, по-крайней мере, на необычные свойства ледяных частиц, в том числе, возможное объяснение - возникновение добавочных волн.

Причины аномалий электромагнитных свойств льда

Наблюдаемые аномалии микроволновых свойств льда можно связать с добавочными волнами, которые известны для сред с пространственной дисперсией диэлектрической проницаемости [3, 4].

Искажение поляризационных диаграмм может наблюдаться, если поле имеет более чем два базисных состояния или измененный спектр. Проведенные отдельные измерения спектра сигнала проходящего излучения на частотах 13-14 ГГц показали отсутствие изменений спектра в пределах ошибок измерений, равной 0,25 МГц. Если бы волновые векторы дополнительной и исходной волн совпадали, то на выходе из среды возникали синусоидальные волны с некоторым сдвигом фаз. По-видимому, сложение полей одинаковой частоты с различным направлением волновых векторов может приводить к искажениям поляризационных диаграмм проходящего через лед излучения.

Какие же особенности льда могут приводить к аномалиям электромагнитных свойств.

В криосферных образованиях лед достаточно часто находится вблизи температуры фазового перехода. Существование в среде различных примесей приводит к понижению этой температуры и, следовательно, к появлению небольших количеств жидких включений разнообразной формы и свойствами. Внешне слабо заметные, эти включения могут существенно изменять электромагнитные свойства льда. Например, в [8] говорится о высокой удельной электропроводности квазизидких слоев на поверхности кристаллов льда, которая может на шесть порядков превышать электропроводность пресной воды. Небольшие количества растворимых солей могут увеличивать толщину жидких пленок на поверхности кристаллов.

Некоторые авторы считают, что вблизи температуры фазового перехода возникает так называемая фаза предплавления, которая проявляется в возникновении флуктуаций параметров среды и изменении ее свойств [9]. Существование такой фазы для льда еще не уставлено, однако, давно известно, что при температурах приблизительно до -8°C на поверхности кристалла существует квазизидкий слой, который скачком исчезает при дальнейшем понижении температуры. Предполагается, что такое поведение определяется перколяцией электропроводности по пленкам, что напоминает фазовый переход при вымерзании жидкой воды в среде.

Можно отметить особую температурную точку -0°C при атмосферном давлении. В этой точке при поглощении льдом энергии ледяные объекты некоторое время остаются внешне в твердом состоянии, однако часть связей в кристаллах уже разрушена, следовательно, свойства среды

существенно отличаются от свойств низкотемпературного льда.

Таким образом, из общих соображений можно сделать вывод, что природный пресный лед при температурах от -30°C до 0°C должен иметь особые электромагнитные свойства, определяемые наличием примесей, и возможной фазой предплавления при разрушении водородных связей в кристаллах вблизи 0°C .

Другой особенностью льда является способность течь под действием внутренних и внешних сил. При таянии во льду возникает отрицательное давление, которое, однако, не всегда приводит к образованию пустот, поскольку предел текучести льда падает с ростом температуры. При текучести среда находится в двух состояниях твердом и жидком, эти два состояния должны отличаться по электромагнитным свойствам.

В текучем состоянии среда обладает нелинейными свойствами. Нелинейность может проявиться при взаимодействии с проходящими через объект волнами. Например, в среде возникнет акустическая волна, наводимая электрическим полем излучения. В этом случае может возникнуть параметрическое взаимодействие при выполнении условия синхронизации бегущей электромагнитной и акустической волн.

Для развития данных представлений требуются дополнительные измерения (в том числе акустические) на различных мерзлых объектах при различных условиях.

Радиозондирование ледяных покровов и других мерзлотных образований

Существование исходной и добавочной интерферирующих волн требует коррекции методик обработки радиолокационных и радиометрических измерений. Если принять модель, по которой аномалии проявляются вследствие влияния механических напряжений и возникновения текучести, при которой электромагнитные параметры среды приобретают нелинейность, то можно очертить круг объектов с аномальными свойствами.

Во-первых, это все объекты, температуры которых близки точке фазового перехода лед-вода, т.е., находится в интервале $0^{\circ}\text{C} \div -10^{\circ}\text{C}$ и, особенно, при температуре 0°C .

Во вторых, это объекты, в которых возникают механические напряжения, достигающие предела текучести. К ним можно отнести:

- 1) массивные ледники и ледяные тела;
- 2) объекты, где возможны значительные и быстрые изменения температуры (например, атмосферные образования; ледяные покровы резкоконтинентальных областей и др.);
- 3) неоднородные по химическому составу среды, в которых могут протекать криохимические превращения (например, для вкраплений криоэвтектик);
- 4) дисперсные мерзлые среды;
- 5) крупные образования планет, подвергающиеся приливным деформациям т.д.

В особых случаях, это объекты, имеющие температуры и давления, при которых происходят фазовые превращения льда из одной модификации в другую, например, льда Ic в Ih при нагревании первого выше -100°C . То же относится к кристаллогидратам и газогидратам при изменениях температуры и давления.

Круг таких объектов, по-видимому, широк, так как напряженные состояния возникают в различных объектах, содержащих воду, при различных процессах, связанных с фазовыми превращениями, и, которые не просто изменяют свои электрофизические параметры, но могут проявлять активные свойства (т.е. излучать или усиливать электромагнитные волны).

Выводы

Совокупность имеющихся экспериментальных данных можно объяснить особыми свойствами льда, когда в среде достигается предел текучести и возникает её нелинейность с образованием добавочных электромагнитных волн. Свойства льда, связанные с динамическими

процессами, еще практически не изучены.

При радиозондировании ледяных структур могут возникать интерференционное усиление или ослабление зондирующих сигналов, а также поляризационные особенности, в том числе из-за дополнительной гирации волн (не связанной с двойным лучепреломлением). При фазовых радарных методах, например, при радарной интерферометрии, аномалии свойств льда могут приводить к ошибкам при определении тех или иных параметров объектов. Эти эффекты требуют коррекции методик обработки данных радиозондирования. Вместе с тем, отмеченные выше особенности можно использовать для разработки новых методик дистанционного зондирования объектов криосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 09-02-100006-к).

Литература

1. 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. Вып. 5. С. 94-97.
2. Бордонский Г.С. Особенности электромагнитных свойств льда вблизи температуры фазового перехода вода-лед // Физика твердого тела, 2005. Т. 47. № 4. С. 691-695.
3. Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. 1979. 432 с.
4. Пекар С.И. Кристаллооптика и добавочные световые волны. 1982. 294с.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыренжапов С.В.. Изучение волн Гинзбурга – Пекара в ледяных покровах в микроволновом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Вып. 4. Т. I. С. 267-272.
5. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Изменчивость фазы коэффициента отражения от границы льда в микроволновом диапазоне вблизи температуры фазового перехода // Письма в журнал технической физики, 2008. Т. 34. Вып. 6. С. 43-49.
6. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Корреляция радиотеплового излучения атмосферы на длинах волн 3,3 мм и 8,5 мм // Исследование Земли из космоса, 2008. №3. С. 11-17.
7. Рыжкин И.А., Петренко В.Ф. Протонная структура льда вблизи границы лед-металл // ЖЭТФ. 2005. Т. 128. Вып. 2 (8). С. 364-369.
8. Битюцкая Л.А., Машикина Е.С. Переходные процессы при плавлении германия в динамических и квазистатических режимах // Журнал технической физики, 1999. Т. 69. Вып. 12. С. 57-61.

Peculiarities of ice electromagnetic properties and radiosounding of cryospheric objects

G.S. Bordonskiy, A.A. Gurulev, S.D. Krylov, A.O. Orlov, S.V. Tsyrendzapov

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS
26, Butina, Chita, 672090
E-mail: lgc255@mail.ru*

The experimental results for ice electromagnetic anomalies are summed. The origins of their anomalies are discussed. It needs to study the additional waves properties and the changing of phase reflection coefficient from media boundaries under solving of remote sensing problems.

Keywords: ice electromagnetic anomalies, reflection coefficient, remote sensing.