

Многочастотные микроволновые измерения распространения поляризованного излучения внутри ледяного покрова

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН
672014 г. Чита, ул. Недорезова, 16а
E-mail: lgc255@mail.ru*

Приведены результаты экспериментов по радиопросвечиванию ледяных покровов в сантиметровом (2 см) и миллиметровом (8 мм) диапазонах. Используя многополяризационные измерения установлено, что при возникновении во льду механических напряжений и пластической деформации в нем возникают некогерентные добавочные электромагнитные волны. Их измерение позволяет наблюдать течение ледяной структуры. Обсужден механизм возрастания сигнала на определенных поляризациях и объяснены некоторые ранее наблюдаемые особенности распространения микроволнового излучения в ледяных покровах.

Ключевые слова: лед, электромагнитные волны, поляризационные измерения, некогерентные добавочные волны, течение льда.

Введение

При радиозондировании ледяных покровов были обнаружены аномалии их электромагнитных свойств (Богородский и др., 1983, 2008, 2009; Drews et al., 2009. В работах (Бордонский, 2007, 2011) было показано, что многие аномалии объясняются возникновением в ледяных телах добавочных электромагнитных волн. Эти волны во льду бывают двух типов – когерентные и некогерентные. Когерентные волны возникают, например, в тонком плоском слое, расположенном между двумя полубесконечными средами, при распространении излучения параллельно границам, и возникают вследствие многократных отражений излучения от границ сред (Бреховских, 1957). Некогерентные добавочные волны, как было представлено в (Бордонский и др., 2007, 2011), возникают из-за рассеяния на неоднородностях, связанных с течением (процессом пластической деформации) кристаллов по базисным плоскостям. Течение носит сложный характер, особенно, при достижении в среде предела текучести, когда в ней возникает отрицательная дифференциальная вязкость (Petrenko et al., 2002).

Точный механизм рассеяния излучения в среде с механической неустойчивостью еще не установлен. Предполагается, что он связан с некоторым усилением излучения на неоднородностях, имеющих вид квазижидких пленок, по которым происходит течение среды (Бордонский и др., 2011).

Очевидно, что знание нелинейных электромагнитных свойств льда представляет интерес для дистанционного зондирования. Цель настоящей работы – продолжить исследование ранее обнаруженных некогерентных добавочных волн в ледяных покровах на двух длинах волн в сантиметровом и миллиметровом диапазонах для выяснения физического механизма образования такого излучения. В миллиметровом диапазоне частота излучения дискретно изменялась в 10% интервале от средней частоты для выяснения частотных свойств объекта.

Методика измерений

Схема измерительных установок приведена в работах (Бордонский Г.С. и др., 2007, 2011). При измерениях маломощный генератор и приемник излучения помещались вглубь ледяного покрова на расстоянии в несколько десятков метров друг от друга. В настоящем

эксперименте, выполненном в марте 2011 г, были использованы частота 13.7 ГГц и частотный интервал от 34 ГГц до 37 ГГц, на котором фиксировались 8 частот при электронной перестройке генератора. Измерялась интенсивность проходящего через лед излучения на 12-ти линейных поляризациях с шагом через 15 градусов. Возникновение некогерентного излучения приводило к необходимости измерения сигнала на многих поляризациях, что связано с усложнением поляризационной картины распространяющихся во льду волн.

В эксперименте использовали супергетеродинные радиометрические приемники с фарадеевскими переключателями поляризации, управляемые током. Используемая аппаратура позволяла проводить последовательные измерения в поляризационных и спектральных каналах.

При регистрации полного поляризационного состояния проходящего излучения время опроса составляло 5 минут на 8 частотах. По измеренным интенсивностям строили поляризационную диаграмму мощности, а также параметры Стокса. Причем первый параметр Стокса находили двумя способами – как суммы мощностей на ВП (вертикальной) и ГП (горизонтальной) поляризациях, а также на линейных поляризациях 45 и -45 (повернутых на соответствующие углы по часовой стрелке и против нее). Их несовпадение рассматривали как появление некогерентных добавочных волн. То же для искаженных поляризационных диаграмм (Бордонский и др., 2011). Выполнялись непрерывные измерения в течение двух недель. При зондировании излучение осуществлялось на круговой поляризации.

Результаты измерений

Характерной особенностью интенсивности излучения от времени (при неподвижных приемнике и передатчике) является возникновение периодических изменений, которые в конце зимнего периода близки к суточным – рис. 1а. Для сантиметрового диапазона это было показано ранее в работе (Бордонский Г.С. и др., 2011).

Какоказалось, аналогичные изменения наблюдаются в миллиметровом диапазоне – рис. 1б. Однако вариации интенсивности на 8 мм имеют приблизительно в два раза меньший период, чем для сигнала в 2 см диапазоне. Это представляется естественным, так как набег в изменениях фазы интерферирующих волн больше для коротковолнового диапазона при одинаковой длине пути лучей.

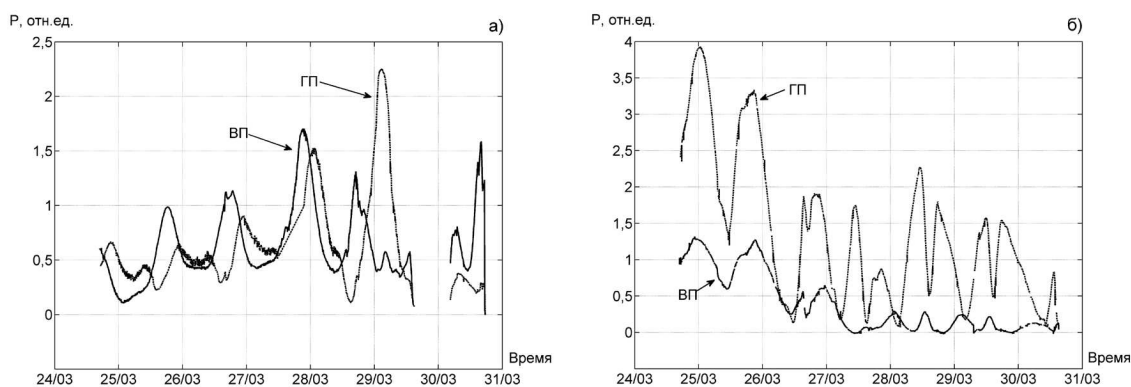


Рис. 1. Мощность проходящего через лед излучения (в относительных единицах).

Приведены данные для двух линейных поляризаций 24-31 марта 2011 г.; пресный ледяной покров оз. Арахлей.
а) – для сигнала с частотой 13.7 ГГц; б) – для сигнала на частоте 34 ГГц

Некогерентная составляющая в виде искажений поляризационных диаграмм также регистрировалась, однако на 8 мм этот эффект был менее выражен. Интересной особенностью распространения излучения на волне 8 мм явилось появление дихроизма в конце зимнего

периода. Оказалось, что перед началом таяния льда проходил преимущественно сигнал на горизонтальной поляризации, хотя во время наблюдений приемник регистрировал излучение на различных поляризациях.

Измерения на различных частотах в диапазоне 34–37 ГГц показали, что поляризационные диаграммы не являются идентичными в близкие моменты времени. Кроме того, некоторые из них показывали заметные отклонения от диаграмм, соответствующих излучению в однородной среде (т.е. имеющих вид «восьмерки», окружности или промежуточного вида).

Для дальнейшего обсуждения механизма возникновения некогерентных добавочных волн приведем результаты ранее выполненных экспериментов, которые до настоящего времени не удавалось объяснить. В 1998 году были выполнены работы по поиску относительно быстрых уединенных волн, возникающих при землетрясениях и других импульсных воздействиях на водную среду и ледяной покров. Предполагали, что возникшие при прохождении уединенных волн в ледяном покрове механические напряжения приводят к росту электромагнитных потерь льда. С этой целью проводили радиопросвечивание льда в двухсантиметровом диапазоне на трех линейных поляризациях. Излучение осуществлялось на круговой поляризации, а прием вели на ГП, ВП и 45° поляризации. Эти эксперименты были выполнены в сейсмичном районе на льду Баргузинского залива оз. Байкал в феврале 1998 г. В один из дней было зафиксировано событие, относящееся к прохождению уединенной волны – рис. 2. Вероятное происхождение волны – разгрузка ледяного покрова от механических напряжений, вызванных тепловым расширением льда в дни потепления. Уединенная волна непосредственно ощущалась по колебаниям ледяного покрова и по сопутствующему звуковому эффекту в виде сильного кратковременного гула над акваторией залива.

Особенности полученных результатов (графики на рис. 2) не удалось удовлетворительно объяснить. Необычность результатов заключалась в следующем. Во-первых, сигнал на ГП в момент прохождения уединенной волны резко уменьшился, а затем стал медленно нарастать, достигнув исходного уровня за время около 2 часов. Во-вторых, сигнал на ВП скачком незначительно вырос, при этом сигналы на двух поляризациях практически сравнялись по уровню, а затем сигнал на ВП несколько упал. Если бы возник рост электромагнитных потерь ледяной структуры, можно было бы ожидать одновременного понижения уровней сигнала на двух поляризациях, что не наблюдали.

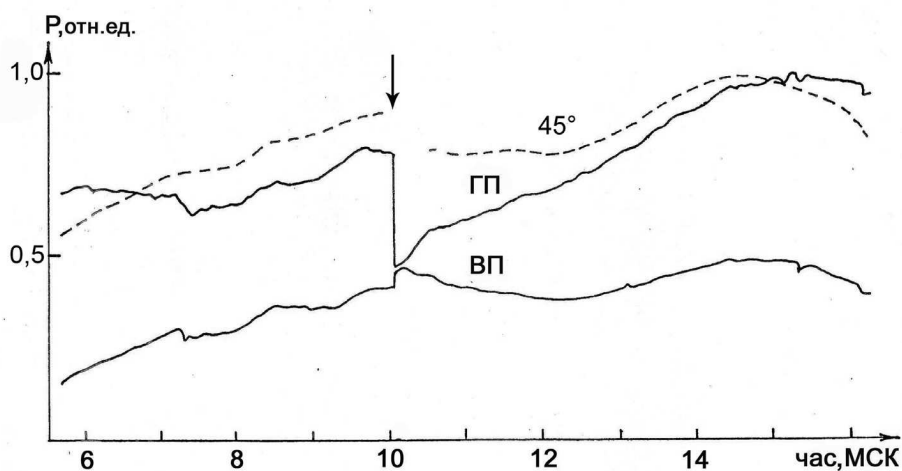


Рис. 2. Записи изменений принимаемой мощности излучения в относительных единицах на длине волны 2.3 см в 10.05 МСК (московского времени) 26.02.1998 г. при прохождении уединенной волны через ледяной покров Баргузинского залива оз. Байкал (отмечено стрелкой). ГП, ВП, 45° – графики для сигналов на соответствующих линейных поляризациях

Обсуждение результатов

В работах (Бордонский и др., 2007, 2011) представлены аргументы, объясняющие аномалии электромагнитных свойств ледяных покровов, связанные с представлением о появлении в них когерентных и некогерентных добавочных волн. Когерентные волны, как показали эксперименты, приводят к медленным изменениям общей интенсивности проходящего через лед электромагнитного излучения, в то время как некогерентные, могут быть ответственными как за медленные, так и быстрые вариации суммарной интенсивности излучения, а также искажения поляризационных диаграмм мощности. Предполагается, что некогерентные волны возникают на пленках, где происходит разрыв водородных связей молекул воды в структуре льда и возникает отрицательная дифференциальная вязкость среды. Эффект быстрого нарастания деформации хорошо известен для кристаллов льда при достижении предела текучести (Petrenko et al., 2002).

Поскольку молекулы воды представляют из себя электрические диполи, в несвязанном (оборванном состоянии водородных связей) они могут создавать повышенную проводимость протонов. Тогда при отрицательной дифференциальной вязкости можно предположить возникновение отрицательного дифференциального сопротивления таких областей среды. Как известно, токи в цепи с отрицательным сопротивлением могут быть несколько усилены и создать рост интенсивности электромагнитного поля при его переизлучения. Из-за хаотического распределения областей течения кристаллов в объеме ледяного тела возникает некогерентное поле, для которого складываются не амплитуды волн, а их интенсивности.

Эксперименты, показывающие существенную зависимость проходящего сигнала от изменения частоты на значение порядка одного процента на длинах волн 8 мм диапазона, говорят о том, что неоднородности, на которых происходит рассеяние падающих волн и возникновение добавочных волн имеют значение порядка 10 мм. Это значение соответствует размерам отдельных кристаллов в ледяном покрове, на котором проводились измерения.

Однако этот эффект может быть замечен только для среды с ориентированными определенным образом оптическими осями кристаллов льда. Пространственная упорядоченность главных оптических осей кристаллов льда (С-осей) характерна для озерного льда (Паундер, 1967), что было подтверждено для объектов, на которых выполнялись эксперименты (Бордонский и др., 2011). Оказалось, что С-оси, начиная с глубин 20-30 см ориентированы преимущественно вертикально. Это означает, что базисные плоскости кристаллов расположены параллельно поверхностям покрова. Известно, что кристаллы льда наиболее легко деформируются путем сдвига вдоль базисных плоскостей (Petrenko et al., 2002). Следовательно, в изучаемых объектах должна была происходить пластическая деформация преимущественно в плоскостях параллельных границам раздела льда с окружающей средой.

Предложенные качественные представления позволяют полностью объяснить наблюдаемые явления в экспериментах по радиолокационному зондированию ледяных покровов. Так, особенности графиков на рис. 2 объясняются следующим образом. При возникновении в ледяном покрове механических напряжений, связанных с изменением температуры и появлении течения (процесса пластической деформации) кристаллов среды вдоль базисных плоскостей, сигнал на ГП возрастает по сравнению с сигналом на ВП. В момент разгрузки напряжения из-за прохождения уединенной волны медленное течение среды (ползучесть) прекращается и сигналы на двух поляризациях выравниваются. Последующий медленный рост интенсивности излучения на ГП определяется накоплением напряжений и возникновением течения льда на данном участке ледяного покрова. Небольшой рост сигнала на ВП может объясняться тем, что некоторая часть кристаллов льда

ориентированы С-осями не вертикально. Таким образом, по характеру изменения сигнала можно определять динамику изменения механических напряжений в структурированном льду, а также особенности его структуры.

Результаты выполненных измерений на волнах 8 мм диапазона, для которых характерно прохождение сигнала на ГП перед началом таяния, можно объяснить эффектом усиления горизонтальной компоненты электрического поля распространяющейся волны. Однако следует также учитывать возможную анизотропию электрических потерь, возникающую в пресном льду с ориентированными включениями микроскопических размеров. Такая особенность обнаружена для морского льда, для которого имеет место повышение потерь для волны с электрическим вектором, совпадающим с линией, перпендикулярной границам ледяного покрова (Финкельштейн и др., 1970). По-видимому, это связано с повышенной проводимостью стенок капсул и капилляров с рассолом, вытянутых в вертикальном направлении.

Выводы

Таким образом, при радиолокационном зондировании ледяных тел в них могут возникать сигналы в виде некогерентных добавочных волн. Эти сигналы (и наблюдаемые аномалии) не объясняются на основе простых закономерностей лучевого распространения радиоволн. Особенности возникновения добавочных волн следующие:

1. Добавочные волны (некогерентные) возникают в ледяных структурах, подвергающихся течению (процессу пластической деформации). Ранее на динамические процессы в ледяных телах не обращали внимания, предполагая, что электромагнитные свойства льда практически неизменны, как при лабораторных измерениях в статическом состоянии, так и в больших природных ледяных телах (ледяных покровах, ледниках, мерзлых грунтах, снегопадах и т.д.).

2. Эффекты некогерентных добавочных волн наиболее выражены в ледяных телах, имеющих преимущественную пространственную ориентацию главной оптической оси кристаллов льда, что связано с облегченной деформацией структуры вдоль базисных плоскостей кристаллов. При этом максимум интенсивности проходящего суммарного излучения соответствует электрическим векторам параллельным базисным плоскостям.

3. Предполагаемый механизм возникновения добавочных волн связан с переизлучением падающей волны на квазижидких пленках, для которых возможно появление отрицательного сопротивления. Размеры таких пленок совпадают с размерами кристаллов льда.

Имеющиеся данные по циклу работ различных исследователей позволяют предположить, что некогерентные добавочные волны возникают в широком диапазоне длин волн от метрового до миллиметрового диапазона длин волн. Их спектральная интенсивность будет зависеть от размеров кристаллов, которые в природной среде соответствуют длинам волн микроволнового и ультракоротковолнового диапазонов.

4. Для дистанционного зондирования образование добавочных волн может представить интерес в плане обнаружения подвижек больших масс льда, детектирования медленных волновых движений, изучения внутренней структуры ледяных тел. Зондирование может быть осуществлено не только при двухпозиционной локации, но и при расположении приемника и передатчика на одном носителе. Интересным является вопрос о возможном заметном усилении внешних излучений, что должно проявляться в увеличении шумов и помех вблизи крупных ледяных тел. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 02-10-00088а).

Литература

1. Богородский В.В., Бенгли Ч., Гудмансен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 312 с.
2. 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.
3. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. Причины изменения фазы коэффициента отражения от границы воздух-лед в микроволновом диапазоне // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. LII. №3. С.260–266.
4. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Поляризационные аномалии микроволнового излучения и добавочные электромагнитные волны в деформируемых ледяных покровах // Журнал технической физики. 2011. №9. С.93–99.
5. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Возможные ошибки при интерпретации данных радиозондирования ледяных покровов // Исследование Земли из космоса. №4. 2007. С. 3–7.
6. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР. 1957. 502 с.
7. Паундер Э.Р. Физика льда. М.: Мир. 1967. 192 с.
8. Финкельштейн М.И., Глушнев В.Г., Петров А.Н., Иващенко В.Я. Об анизотропии затухания радиоволн в морском льду // Физика атмосферы и океана. 1970. Т.VI. №3. С.311-313.
9. Drews R., Eisen O., Weikusat I., et.al. Layer disturbances and radio-echo free zone in ice sheets // The Cryosphere. 2009. №3. P. 195–203.
10. Petrenko V., Whitworth R.W. Physics of Ice. Oxford Univ. Press. 2002. 347 p.

Multy-frequency polarization measurements of microwaves propagating into ice cover

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

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of SB RAS
672014, Chita, 16a, Nedorezova str.
E-mail: lgc255@mail.ru*

The results of the radiotransparency experiments of ice covers at centimeter (2 cm) and millimeter (8 mm) wavelengths are presented. It is founded, using multipolarization measurements, that incoherent additional electromagnetic waves appear in ice under mechanical stress and plastic deformation. Measurements of these waves allow to observe flowing of icy structure. The effect of signal increasing on some polarization was discussed and some earlier observation peculiarities of microwaves propagation were explained.

Keywords: ice, electromagnetic waves, polarization measurements, incoherent additional electromagnetic waves, ice flowing.