

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛЕДЯНЫХ ПОКРОВОВ

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 E-mail: lgc255@mail.ru*

В статье предоставлены результаты измерений радиотеплового излучения Солнца, находящегося вблизи горизонта над поверхностью ледяного покрова пресного озера. Измерения проведены на частотах 1,6 ГГц; 5,2 ГГц и 13,5 ГГц в весенний период времени после восхода и перед заходом Солнца. При исследованиях регистрировалась сумма прямого и отраженного от ледяного покрова сигналов. Установлено, что при таянии льда интерференционная картина заметно усложняется. Наибольший эффект наблюдался на частоте 1,6 ГГц.

Введение

Радиометрические исследования слоистых структур или поверхности раздела сред с периодическими неоднородностями требуют в ряде случаев узких диаграмм направленности антенн с шириной до одного градуса, например, в случае измерений при скользящих углах или для регистрации «критических» явлений [1]. Это затруднение можно обойти в специальном случае, связанном с использованием внешнего движущегося источника широкополосного электромагнитного излучения с относительно малыми угловыми размерами и находящегося вблизи горизонта. Таким источником может являться Солнце. Его использование позволяет применить простые неподвижные антенны с диаграммами в десятки градусов.

В настоящей работе выполнены эксперименты по исследованию возможности использования радиотеплового излучения Солнца для изучения особенностей структур и диэлектрических свойств тающих пресных ледяных покровов при больших углах наблюдения – $75 - 88^\circ$ от надира. Предполагалось, что ледяные покровы в процессе их эволюции могут обладать как некоторым характерным размером пространственных неоднородностей по акватории водоема, так и иметь специфическое распределение диэлектрической проницаемости по высоте. Это могут быть цепочки кристаллов, распределенных тальми слоями или волнообразные структуры, а также горизонтальные слои различной увлажненности. Они могут более ярко проявляться вблизи настильных углов и узких интервалах углов наблюдений. С целью проверки высказанных предположений, выполнены измерения радиояркостной температуры интерференционного поля радиоизлучения Солнца при восходе и заходе светила при установке радиометров вблизи поверхности ледяного покрова.

Методика измерений

Схема измерений радиотеплового излучения Солнца над ледяным покровом представлена на рис.1. Воспользуемся приближением геометрической оптики для анализа схемы измерений. Будем рассматривать углы α , большие угла Брюстера ($90^\circ > \alpha > \alpha_{Br}$). Это связано с тем, что в эксперименте использовались антенны с шириной диаграммы направленности $20-30^\circ$. При исследованиях изучались зависимости изменений антенной температуры радиометров от угла α , толщина льда, высоты d в различные периоды существования ледяного покрова. Измерения выполнялись на частотах 1,6 ГГц; 5,6 ГГц; 13,5 ГГц, а в некоторых случаях и на частоте 34 ГГц. Полосы частот радиометров составляли 0,3 ГГц; 0,4 ГГц; 1,2 ГГц и 2 ГГц, соответственно.

Особенность схемы измерений заключается в том, что лучи 1,2,3 (и более высоких порядков, возникающие при многократных отражениях внутри ледяного покрова) практически параллельны друг другу при падении на лед. При этом выходы лучей сосредоточены в пятне размером $L \sim D \cdot \operatorname{tg} \alpha$. При вращении Земли это пятно движется по поверхности ледяного покрова, уменьшаясь в размерах, если угол α уменьшается, что позволяет «просканировать» ледяной покров по акватории. При этом для гладких поверхностей размер L соответствует проекции апертуры антенны на поверхность льда. Расстояние от обмеряемого пятна до радиометра будет зависеть от угла наблюдения и высоты поднятия антенны радиометра d .

Мнимый источник, соответствующий лучу 3, излучает мощность существенно меньше по сравнению с источниками S_1 и S_2 . Из-за затухания сигнала во льду и потерь на отражение, эти потери зависят от угла наблюдения. Кроме того, из-за разности хода лучей в средах, которая достигает в конце зимы 3-4 метров, луч 3 теряет когерентность по отношению к лучам 1 и 2 при используемых полосах пропускания радиометров ($\sim 0,3-1$ ГГц). Поэтому, в первом приближении, луч 3 можно не принимать во внимание. Однако он может проявиться в интерференционной картине, если вблизи поверхности возникает слоистая структу-

ра небольшой толщины. Другая особенность связана с расстоянием d . При $d=0$ S_1 и S_2 взаимно погашаются. Для больших d и потере когерентности мощности сигналов складываются и интерференционная картина при движении Солнца отсутствует.

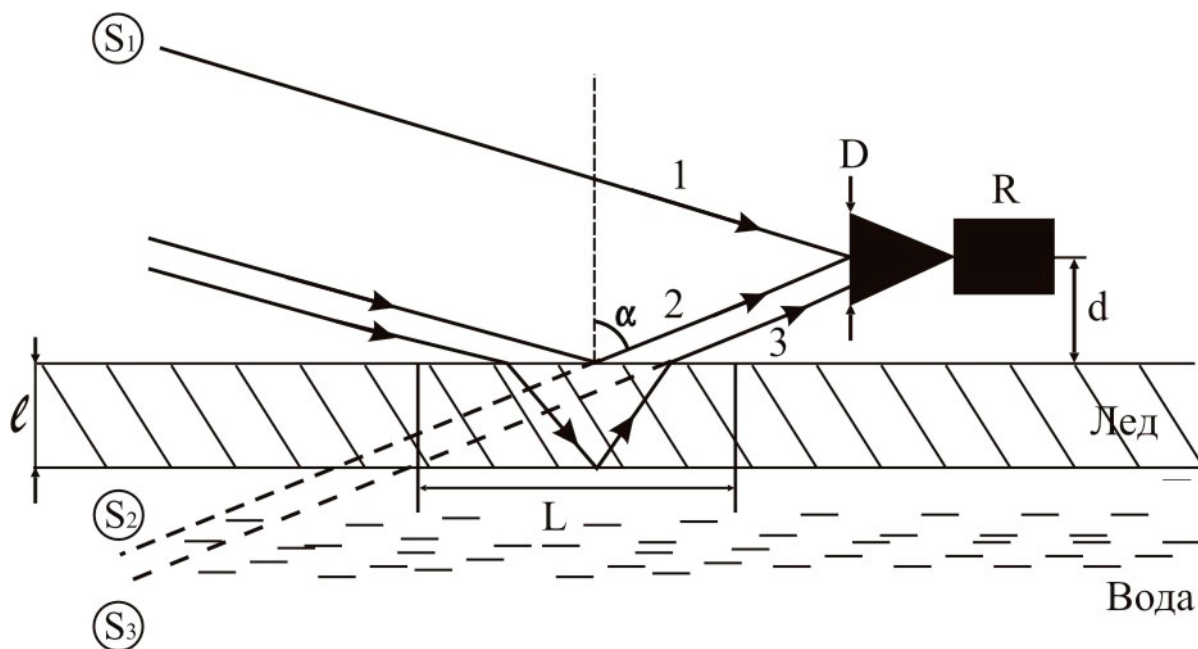


Рис.1. Ход лучей в схеме зондирования ледяных покровов с использованием излучения Солнца. R-СВЧ-радиометр; d -расстояние оси антенны до поверхности ледяного покрова; D -диаметр входной апертуры антенны; α -угол наблюдения; 1,2,3 –прямой, отраженный от границы воздух-лед и отраженный от границы лед-вода лучи, соответственно; l -толщина льда; L -диаметр пятна, от которого принимается отраженный сигнал. S_1 - действительный источник излучения, S_2 и S_3 – два мнимых источника.

Таким образом, сигнал в антенне зависит от d – высоты расположения приемника над поверхностью, полосы пропускания Δf радиометра, α - угла зондирования и l – толщины льда. При проведении исследований перед началом таяния снималась интерференционная картина в зависимости от времени на восходе или на заходе Солнца. Далее выполнялись измерения при таянии ледяного покрова в различных его состояниях.

Ожидаемые результаты

Для случая идеальных сред можно качественно представить результаты наблюдений в следующем виде. На рис. 2а, например, приведен график сигнала, когда ось антенны расположена вблизи поверхности льда. Если в среде вблизи поверхности появляются отражающие слои, это может проявиться в виде небольших пульсаций – штриховая линия на рис. 2а.

Если d превышает длину волны в несколько раз, то типичная картина для сигнала на выходе радиометра имеет вид рис.2б. Для этого случая оценку состояния среды можно получить из сравнения кривых для двух ортогональных поляризаций. Появление третьего некогерентного источника S_3 должно приводить к его наложению на интерференционную картину – рис. 2в. По отклонению A и времени t_1 можно оценить толщину слоя льда или внутренних отражающих слоев.

Для $d \gg \lambda$ луч 1 и 2 некогерентны (если разность их хода превышает значение $\frac{c}{\Delta f}$, где c – скорость света в вакууме). В этом случае наблюдается единичный горб – рис.2г. Если в покрове имеются отражающие слои, то на кривой возможно появление осцилляций.

Идеальные случаи, представленные выше, могут искажаться при пространственном усреднении сигнала в пятне диаграммы направленности. Однако они не столь значительны для небольших значений d , поскольку обмеряемый участок будет большую часть времени иметь небольшие размеры, так как будет находиться недалеко от приемной антенны.

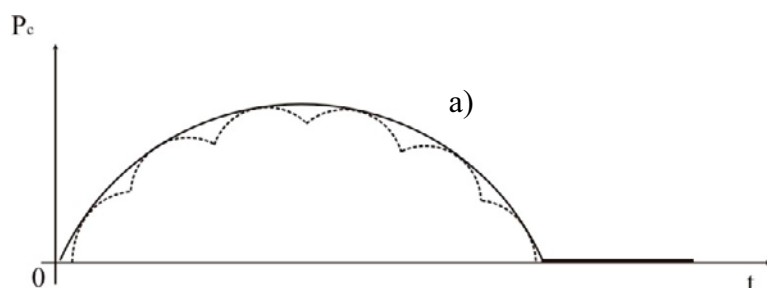


Рис. 2 а). Зависимость регистрируемой мощности сигнала от времени после восхода Солнца ($t=0$) для случая малых d (сплошная линия). Штриховая линия - возникновение отражений от внутренних слоев.

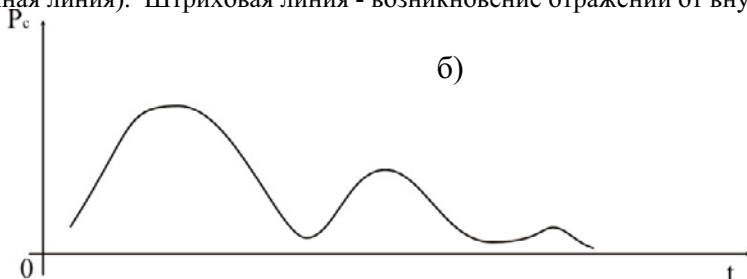


Рис 2 б). Зависимость сигнала от времени для $d > \lambda$, уменьшение интенсивности связано с выходом источника из диаграммы направленности.

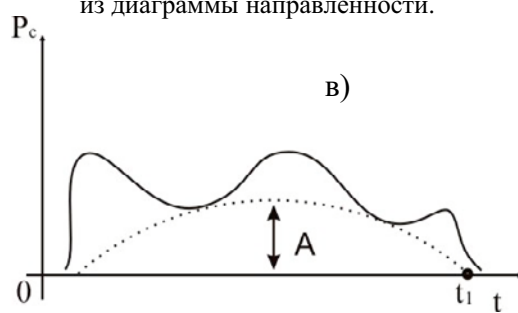


Рис. 2 в). Наложение на интерференционную картину некогерентного мнимого источника S_2 (его мощность представлена штриховой линией).

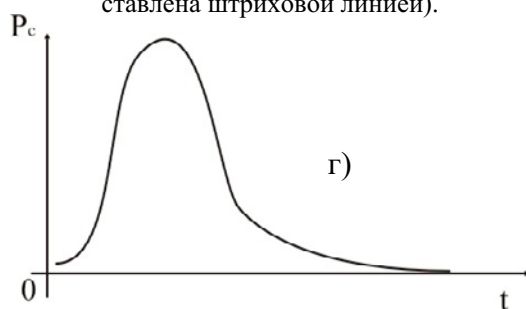


Рис. 2 г). Мощность сигнала при некогерентном сложении прямого и отраженного лучей.

Результаты измерений

Измерения проводились на пресном озере Арахлей в Читинской области, расположенном на высоте 960 м над уровнем моря. Природные условия создавали благоприятную обстановку для измерений: 1 – отсутствие значительного снежного покрова (его высота в среднем составляла несколько сантиметров), 2 – высота окружающих гор давал затенение не более одного градуса дуги, 3 – отсутствие торосов и других структурных нарушений льда, 4 – безоблачная атмосфера.

Измерения выполнялись как на восходе, так и на заходе Солнца. Отмеченные на рис. 2 случаи наблюдались в эксперименте на всех частотах, причем отклонение от идеальных случаев наблюдались только в дециметровом диапазоне. Это, по-видимому, было связано со сглаживанием сигнала на флуктуациях толщин слоев на длинах волн 5 см и короче.

Наиболее интересные результаты представлены на рис. 3 и рис. 4 для длины волны 18 см. Для данных рис. 3, где представлен фрагмент записи «тонкой» структуры на вертикальной поляризации, имело место формирование сухого льда до глубины 10 см, что связывалось с появлением сквозных капилляров по

высоте покрова. В левой части графика кривая приподнята по отношению к правой, что соответствует интерференции луча 1 и 2. Однако на кривой присутствуют максимумы от других интерферирующих лучей. Отметим, что между метками времени на графике, Солнце изменило свое положение на 13° . При этом наблюдалось пять максимумов интерференции, т.е. через интервал около $3,3^\circ$. Кроме того, после второго максимума интерференции появились более быстрые осцилляции, соответствующие периоду сдвига источника на $0,4^\circ$ дуги. На максимумах с низкой частотой наблюдались еще более быстрые колебания, соответствующие их появлению через интервал около $0,1^\circ$ дуги.

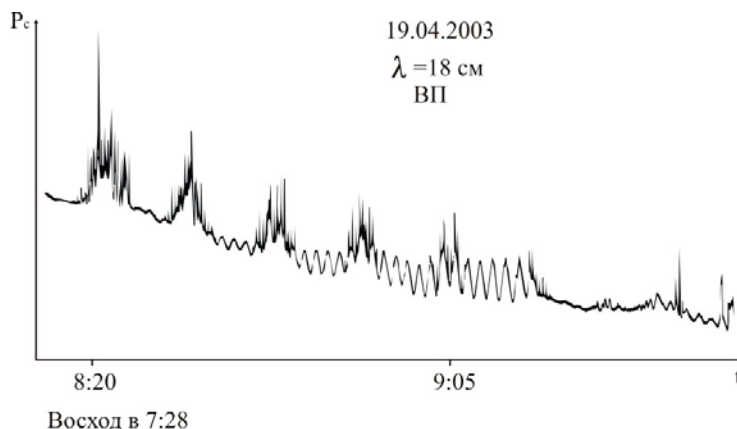


Рис. 3. Фрагмент записи сигнала на восходе Солнца на волне 18 см. Время местное.

На рис. 4 представлены измерения спустя 16 суток, когда капилляры во льду сформировались и возникла резкая граница между сухим и увлажненным льдом. При измерениях автоматически производилось переключение прибора для последовательного приема излучения на двух линейных поляризациях. Как видно из рис.4, наблюдается влияние угла Брюстера, когда луч 2 в некотором интервале времени отсутствует и сигнал на ВП становится меньше сигнала на ГП. Перед заходом Солнца сигналы на ГП и ВП практически совпадают.

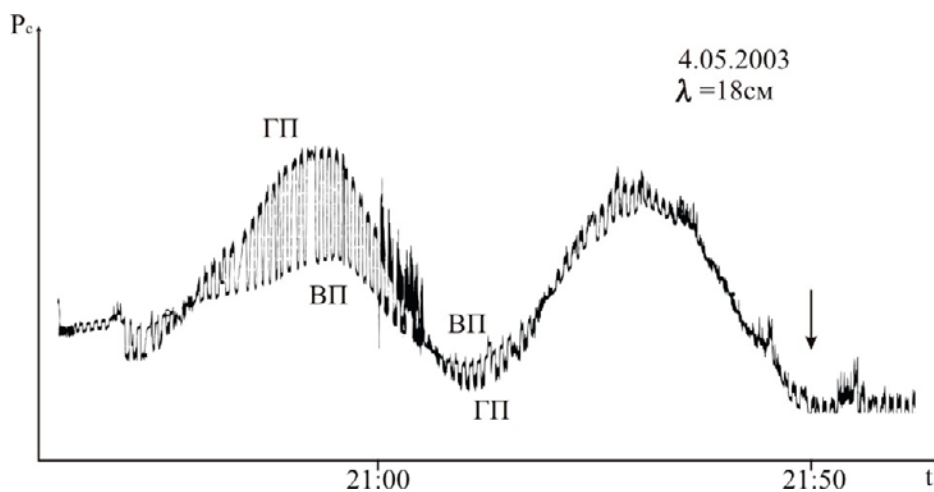


Рис. 4. Измерения при заходе Солнца. Стрелкой отмечен момент захода Солнца за горный хребет на горизонте.

Обсуждение результатов

Предпринята попытка объяснения наблюдаемых аномалий на волне 18 см с использованием простых слоистых моделей ледяного покрова. С этой целью выполнены расчеты коэффициентов отражения от структур двух видов – тонкого слоя льда, лежащего на воде, и тонкого слоя воды на поверхности льда. Для расчетов использован метод, предложенный в работе [2].

На рис.5, приведены результаты расчетов коэффициентов отражения по мощности в зависимости от угла наблюдения для льда толщиной 10 см, лежащего на воде, на длине волны 18 см для случаев вертикальной и горизонтальной поляризаций. На рис. 6 приведена зависимость коэффициента отражения от угла наблюдения структуры в виде слоя воды толщиной 3 мм, находящегося на льду, на той же длине волны.

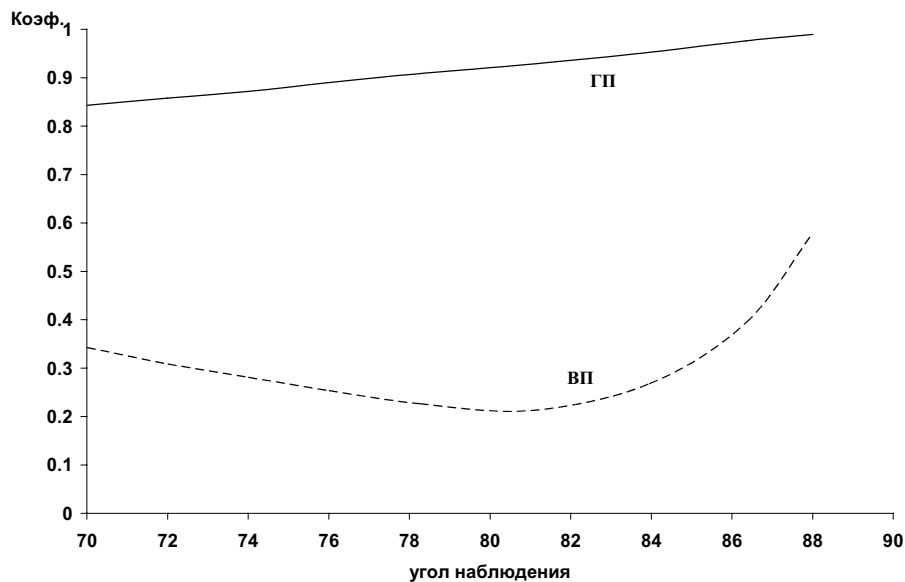


Рис. 5. Зависимость коэффициентов отражения по мощности от угла на длине волны 18 см для структуры лед-вода. Верхний слой воды льда – 10 см.

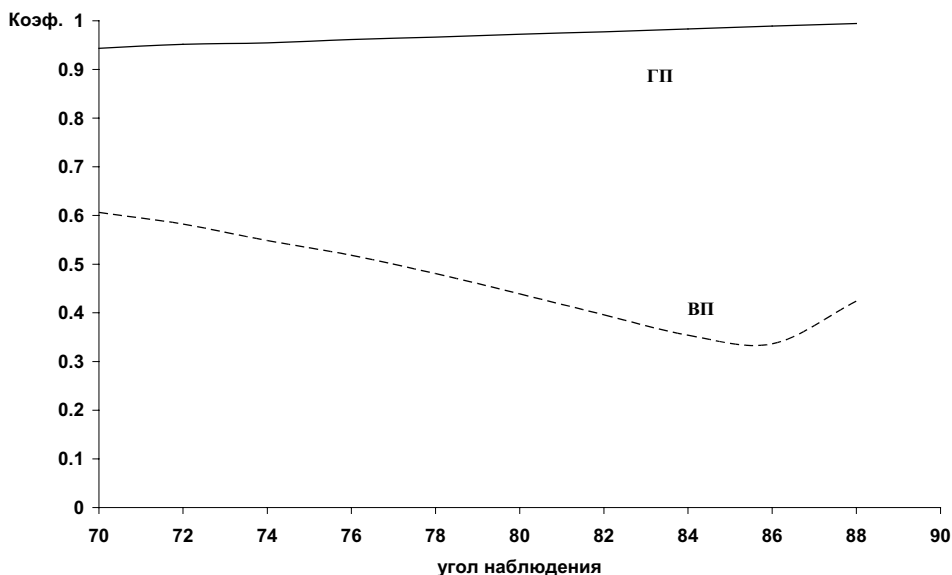


Рис.6. Коэффициенты отражения от угла для слоя воды 3 мм, лежащего на льду на волне 18 см.

Расчеты показывают, что все эти структуры имеют плавно изменяющиеся от угла зондирования коэффициенты отражения, поэтому в рамках простых слоистых моделей трудно объяснить результаты, представленные на рис. 3, 4. Это относится, прежде всего, к появлению быстрых осцилляций сигнала.

Если рассмотреть возможные ошибки для данных, приведенных на рис.3, то, в принципе, не исключено появление в направлении Солнца точечного, близкого к монохроматическому, источника электромагнитного излучения. В такой ситуации интерференционные эффекты должны проявляться значительно сильнее. Если это так, то полученный результат также проявляет интерес, поскольку при измерениях можно использовать более узкополосные радиометры. Для выяснения вопроса желательно выполнить дополнительные измерения на нескольких длинах волн в дециметровом диапазоне и с различными полосами пропускания приемников.

Возможное объяснение наблюдаемых эффектов можно связать с проявлением пространственной дисперсии в неоднородных средах, когда в них существуют неоднородности, сравнимые с длиной волны электромагнитного излучения [3]. Пространственная дисперсия для льда была недавно установлена в работе [4] для среды, находящейся вблизи точки фазового перехода, на длинах волн сантиметрового диапазона. В [4] наблюдалась так называемая «новая» волна, имеющая ту же линейную поляризацию, что и исходная, но несколько отличное значение волнового числа [3]. В некоторых случаях возможно значительное возрастание коэффициента преломления для «новой» волны, поэтому незначительное изменение условий наблюдения могут привести к быстрым осцилляциям суммы обычной и «новой» волны. Кроме того, для сред с

пространственной дисперсией отмечается значительное отличие коэффициентов отражения на границах сред от френелевских.

Тем не менее, используя, обычные представления, из интерференционных кривых можно сделать определенные выводы. Например, из рис. 4 следует, что сигнал на ВП оказался ниже по мощности приблизительно в 20:50, что соответствует углу наблюдения $\sim 75^\circ$. Это связывается с влиянием угла Брюстера, который существенно отличен от 60° , который соответствует полубесконечной среде из льда. Очевидно, в данном случае, возрастает значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости из-за увлажнения верхнего слоя льда, и как следствие, увеличивается угол Брюстера.

Выводы

1. Использование Солнца в качестве источника зондирующего излучения позволяет определить состояние таяния ледяного покрова при измерениях на скользящих углах на волнах дециметрового диапазона.
2. Измерения позволяют определить момент активного таяния льда, а также структурные изменения, когда над пропитанным водой льдом выступает относительно сухой слой толщиной около 10 см. Появление такого слоя приводит к дополнительным осцилляциям сигнала, так как при некоторых углах наблюдения возникает отраженный луч от границ слоя сухой лед – увлажненный лед.
3. Во время механической деструкции льда, когда верхний слой начинает разрушаться, на интерференционной картине на волне 18 см наблюдались дополнительные осцилляции с тремя различными частотами. Наиболее быстрые осцилляции имели период около 20 с. Предполагается, что эти осцилляции связаны с пространственной дисперсией в среде для микроволнового излучения, когда в ней возможно появление «новой» волны, для которой коэффициент преломления может меняться в широких пределах, а кроме того, проявляется существенное отличие коэффициентов отражения от границ сред по сравнению с френелевскими.

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

Литература

1. *Кравцов Ю.А., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Чурюмов А. Н.* Резонансные и нерезонансные явления при микроволновом дистанционном зондировании поверхности океана//Радиотехника. 2000. №1. с. 61 – 73.
2. *Клепиков И.Н., Шарков Е.А.* Тепловое излучение слоисто-неоднородных изотермических сред. – Москва, 1983. – 31 с. (Препринт / АН СССР, Институт космических исследований, Пр - 801).
3. *Агранович В.М., Гинзбург В.Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. Наука, М. 1979. 432 с.
4. *Бордонский Г.С.* Особенности электромагнитных свойств льда вблизи температуры фазового перехода вода – лед// Физика твердого тела. 2005. Т. 47. вып.4. с.691 – 695.