

Влияние температурных напряжений на микроволновые поляризационные характеристики ледяных покровов

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

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
672090 г. Чита, ул. Бутина, д.26
Тел.: (3022)35-40-63; E-mail: lgc255@mail.ru*

Изучено влияние механических напряжений на возникновение в пресном ледяном покрове добавочных электромагнитных волн в микроволновом диапазоне. Установлено, что при наличии во льду преимущественной пространственной ориентации кристаллов, а также возникновения их течения, в среде возникают определенным образом поляризованные некогерентные добавочные волны. Их появление необходимо учитывать при интерпретации данных радиозондирования ледяных объектов, подвергающихся изменениям температуры.

Ключевые слова: микроволновый диапазон, лед, добавочные волны, поляризация, течение льда.

Введение

В работах (Бордонский и др., 2006; Бордонский и др., 2010) изучали появление добавочных электромагнитных волн в пресном ледяном покрове. Данные волны были предсказаны в средах с пространственной дисперсией (Агранович, Гинзбург, 1979), для которых компоненты тензора диэлектрической проницаемости зависят от волнового вектора. Примером такой среды является среда с периодическим изменением электрических свойств, причем период изменения близок к длине волны излучения. Аналогичные эффекты наблюдаются в рентгеновском диапазоне, где длина волны излучения близка периоду решетки кристаллических объектов – эффект Бормана (Даценко и др., 2002). Вместе с тем, еще в работе (Бреховских, 1957), в плоскостной среде с тонким слоем между двумя полубесконечными средами, фактически было предсказано существование добавочных волн. Для этого случая периодичность интенсивности в пространстве возникала из-за многочисленных переотражений излучения точечного источника от границ сред. Переотраженные волны можно представить, используя бесконечный ряд мнимых источников, расположенных в плоскости перпендикулярной границам раздела сред. В этом случае сама среда не имеет пространственной периодичности диэлектрической проницаемости (которая модулирует волны по расстоянию), однако периодичность интенсивности возникает из-за наложения волн мнимых источников.

Как показано в (Бреховских, 1957), на большом расстоянии от источника (\vec{r}), поле волны (например, электрическое \vec{E}) можно представить в виде

$$|\vec{E}| \sim \sqrt{\frac{1}{r}} \left[\frac{1}{2\sqrt{k_0}} \exp(ik_0 r) + \sum_{l=1}^{\infty} \cos\left(\frac{l\pi z}{h}\right) \cos\left(\frac{l\pi z_0}{h}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{k_l}} \exp(ik_l r) \right) \right] \exp(i\omega t), \quad (1)$$

где $\vec{k}_0 = \frac{2\pi \cdot \vec{s}}{\lambda}$ – волновой вектор, \vec{s} – единичный вектор в направлении распро-

странения волны, λ – длина волны излучения в среде, $k_l = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{l \cdot \pi}{h}\right)^2}$, h – толщина слоя,

z_0 – расстояние излучателя от нижней границы слоя, z – расстояние приемника от нижней границы слоя.

Как видно из (1) в тонком слое существует много добавочных волн с волновыми числами k_p , однако реально их число не более числа полуволн, укладывающихся на толщине слоя. Кроме того, волны с более высоким l затухают быстрее, как из-за увеличения длины пути, так и из-за уменьшения коэффициента отражения от границ сред (угол падения по мере роста l уменьшается от значения близкого к 90°).

Однако в (Бордонский и др., 2006; Бордонский и др., 2010) при поляризационных измерениях была обнаружена аномалия поляризационных диаграмм мощности. Вместо характерных диаграмм в виде «восьмерок», окружностей или промежуточных между этими двумя формами на диаграммах наблюдали «вытянутость» вблизи компонента на горизонтальной поляризации. Измерения проводили на 12 линейных поляризациях, что позволило выявить данную особенность поляризационных диаграмм. В (Бордонский и др., 2010) наблюдаемый эффект связали с существованием определенной преимущественной пространственной ориентацией кристаллов льда, а также их выраженной анизотропии механических свойств. Анизотропия проявляется при возникновении течения среды, которое наиболее легко возникает вдоль базисных плоскостей кристаллов.

В настоящей работе было продолжено исследование причин появления искажений поляризационных диаграмм при прохождении микроволнового излучения через пресный ледяной покров, параллельно границам сред. Изучалось возникновение течения анизотропной среды при суточном ходе температуры окружающей среды и влияние данного эффекта на микроволновые свойства ледяного покрова.

Нелинейные свойства льда

Известно, что кристаллы льда под действием механических напряжений начинают течь при некотором напряжении, называемом пределом текучести (Petrenko et. al., 2002). При этом на зависимости напряжение – деформация возникает падающий участок, соответствующий быстрому росту деформации и разрушению среды при сохранении напряжения. В работе (Башкирцева и др., 2009) теоретически исследованы особенности течения жидкого слоя, расположенного между двумя плоскостями, для случая нелинейной зависимости вязкости от скорости течения. Причина нелинейности не обсуждалась. Численными методами расчетов показано, что в узкой области параметров вблизи точки бифуркации может существовать чрезвычайно высокая чувствительность структуры течения к изменениям параметров. Учитывая проявление электрических свойств в полярных жидкостях можно ожидать и высокой чувствительности льда при его течении к внешним электромагнитным излучениям. Таким образом, несмотря на отсутствие точного знания механизма взаимодействия электромагнитной волны с текучей компонентой льда в тонком слое, естественно предположить ее воздействие на распространение микроволнового излучения. Оно может заключаться в особом характере вторичного излучения среды под действием падающего электро-

магнитного излучения. Например, переизлучение в среде может возникать из-за импульсного сверхизлучения Дикке (Железняков и др., 1989) при замерзании текущих тонких слоев среды. Это предположение выдвигалось нами в работе (Бордонский и др., 2009) для объяснения лабораторного эксперимента по прохождению СВЧ-излучения через образец льда в стальной трубе, в которой происходит течение среды, вызванное термическими напряжениями при нагревании.

Для выявления необычных поляризационных эффектов в новых экспериментах измеряли первый параметр Стокса S_1 (характеризующий полную интенсивность принимаемой плоской волны) в двух базисах, повернутых относительно друг друга на 45° : S_1' (ВП, ГП) – при измерениях на вертикальной и горизонтальной поляризациях и $S_1''(45^\circ, -45^\circ)$ – для плоскостей поляризаций, повернутых на углы от вертикали на 45 градусов и -45 градусов. Далее определяли разность $\Delta S_1 = S_1' - S_1''$. Эта разность для линейных сред должна равняться нулю. Появление $\Delta S_1 \neq 0$ можно приписать возникновению нелинейности в среде. В этом случае описание излучения в виде вектор-параметра Стокса становится некорректным.

Методика экспериментов

При выполнении микроволновых измерений использована методика, аналогичная ранее примененной в (Бордонский и др., 2010). Установка состояла из генератора монохроматического излучения и приемника, располагаемых в ледяном покрове на глубине 50-60 см. Расстояние между приборами составляло ~40 м. Эксперименты проводили на ледяном покрове оз. Арахлей (Забайкальский край) в марте – апреле 2010 г.

В новом эксперименте, однако, использовали два приемника, расположенных особым образом (рис.1). Направление от генератора к Пр1 совпадало с линией север-юг, а для Пр2 – с линией запад-восток. Данная схема эксперимента была предложена для выявления особенностей деформации ледяного покрова.

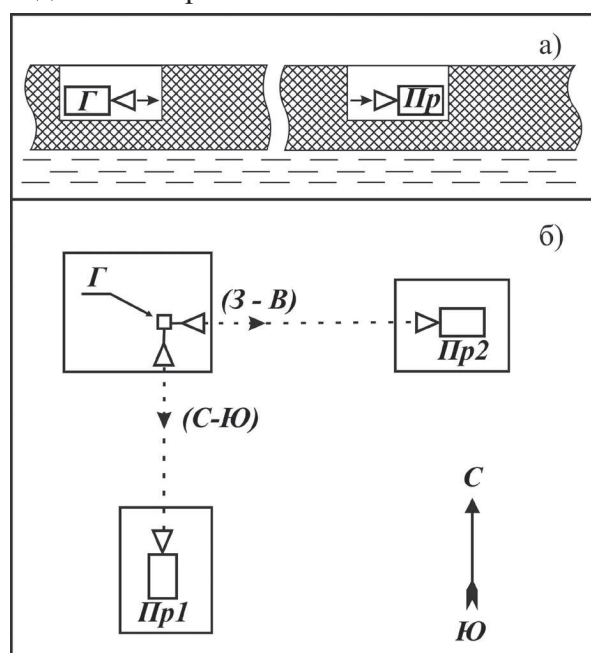


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а) сечение ледяного покрова; б) вид в горизонтальной плоскости. Г – генератор сигнала с делителем на две антенны, Пр1, Пр2 – приемники излучения

Измерение выполняли круглосуточно на частоте 13,7 ГГц. Излучение осуществляли на вертикальной поляризации, а прием на 12 линейных поляризациях с шагом через 15°. Выполнены также эпизодические спектральные измерения с использованием клистронного генератора в диапазоне 13-14 ГГц с шагом перестройки 0,1 ГГц на 11 фиксированных частотах. Мощность генераторов составляла значение порядка 10 мВт. Время измерений поляризационной диаграммы на одной частоте составляло 2 минуты. Диаграмму строили в полярных координатах и нормировали на максимальное значение.

Для определения деформаций льда, вызванных изменениями температуры, выполнялись измерения деформации ледяных полей. Измерение деформации ледяного покрова проводили с помощью датчиков двух типов – по растяжению нити, которая устанавливалась на верхней границе льда, и датчика в виде замкнутого пластмассового сосуда, замороженного в ледяной покров на глубину 30 см. Во втором случае деформации измеряли косвенно по изменению давления воздуха в сосуде.

Записи деформации ледяного покрова позволили определить их характер в различные дни наблюдений. Измерения деформации верхней части покрова проводились между точками на расстоянии 3 м. Поскольку микроволновое излучение проходило расстояние порядков десятков метров, а используемые методы измерения характеризовали локальные деформации, то искали некоторые общие особенности деформаций и течения льда, оказывающие влияние на электромагнитные свойства среды. Также измеряли метеопараметры. Запись всех сигналов осуществляли при помощи системы сбора информации фирмы «Agilent».

Результаты измерений и их интерпретация

Добавочные волны обнаруживаются из длительных измерений S_i при неизменном расположении излучателей и приемников. При суточных вариациях температуры льда ближе к весне наблюдали значительные осцилляции интенсивности принимаемого излучения, которое изменяется более чем в 10 раз. В отдельных точках может наблюдаться почти полное погашение сигнала.

Результаты спектральных измерений поляризационных диаграмм мощности приведены на рис. 2. На них выявляются существенные искажения перед началом таяния льда, когда температура воздуха в дневные часы приближается к 0°C.

Типичное время их изменения (вращения, деформации) при низких температурах воздуха – порядка нескольких суток. Однако это время уменьшается до нескольких часов в весенний период, перед началом разрушения льда при таянии. В различных экспериментах варьировали расположения приемников и передатчиков по глубине и расстоянию от входа рупорных антенны до стенки углублений. Во всех случаях за несколько лет измерений получали качественно одинаковые результаты. Вместе с тем, искажения диаграмм были различным на разных частотах и в разное время.

При вычислениях ΔS_i находили нормированные значения $\Delta \tilde{S}_i = 2 \cdot \Delta S_i / (S_i' + S_i'')$. Оказалось, что $\Delta \tilde{S}_i$ испытывает изменения во времени. Медленное изменение происходит на временах от часов до одних суток. Быстрые изменения – порядка минут и десятков минут. Причем обнаруживается значительная дисперсия $\Delta \tilde{S}_i$, достигающая 100% величины. Однако в некоторые моменты времени дисперсия уменьшается до значений, сравнимых с экспериментальными ошибками измерений.

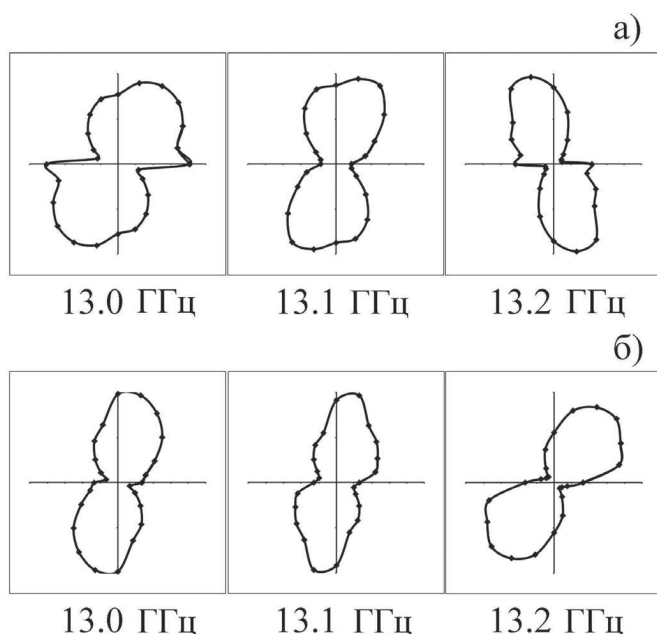


Рис. 2. Поляризационные диаграммы мощности проходящего через ледяной покров микроволнового излучения на различных частотах (направление запад-восток), построенные по измерениям на двенадцати линейных поляризациях: а) измерения 3 апреля 2010 г.; б) измерения 15 апреля 2010 г.

Изменения $\Delta\tilde{S}_1$ со временем для двух направлений распространения излучения имеют заметные различия, хотя в некоторые дни наблюдали совпадение хода зависимостей. Для получения количественных оценок связи деформаций по двум направлениям были вычислены коэффициенты корреляции K для $\Delta\tilde{S}_1$. Этот коэффициент изменяется в пределах $\pm 0,8$ и пульсирует с периодом от 6 часов до 24 часов. Наблюдали дни, когда значение K не превышало $\pm 0,1$, т.е. корреляция практически отсутствовала. В некоторые дни его значение держалось в пределах 0,5-0,95. За сутки наблюдали 2-4 экстремума K для положительных и отрицательных его значений.

Датчики деформации наряду с плавными изменениями регистрировали и скачки. Причем они наиболее выражены перед началом таяния. Когда лед еще радиопрозрачен, а его температура приближалась к точке фазового перехода лед-вода, скачки деформации принимают особый характер. Примеры записи при изменении длины струнного измерителя (регистрировали значение сопротивления переменного резистора, соединенного со струной) приведены на рис. 3 а, б, в. Из представленных данных следует, что скачку деформации предшествует медленное ее развитие. Сам скачок является проявлением текучести льда, когда достигается предел текучести с быстрым сбросом внутренних механических напряжений в среде.

Температура воздуха в дневные часы 5-12 апреля 2010 г., соответствующая данным рис. 3, достигала 0°C . Из полученных результатов измерений деформации следует, что перед началом таяния ледяной покров подвергается непрерывному течению, которое проявляется в виде относительно быстрых скачкообразных изменений линейных размеров ледяных полей с различными временными масштабами. Наблюдаемый рост деформаций совпал с появлением искажений поляризационных диаграмм.

Чтобы объяснить выполненные эксперименты было высказано предположение, что в ледяном покрове наблюдали два типа различающихся по свойствам добавочных волн. Первый тип, определяемый плоскостной геометрией объекта, всегда существует в таких средах и интерферирует с исходной волной. Второй тип – нестационарные волны, которые

возникают при течении среды под действием температурных напряжений или при волновых воздействиях на объект. Нестационарные волны являются некогерентными и возникают в ледяном теле, для которого имеет место анизотропия кристаллического строения.

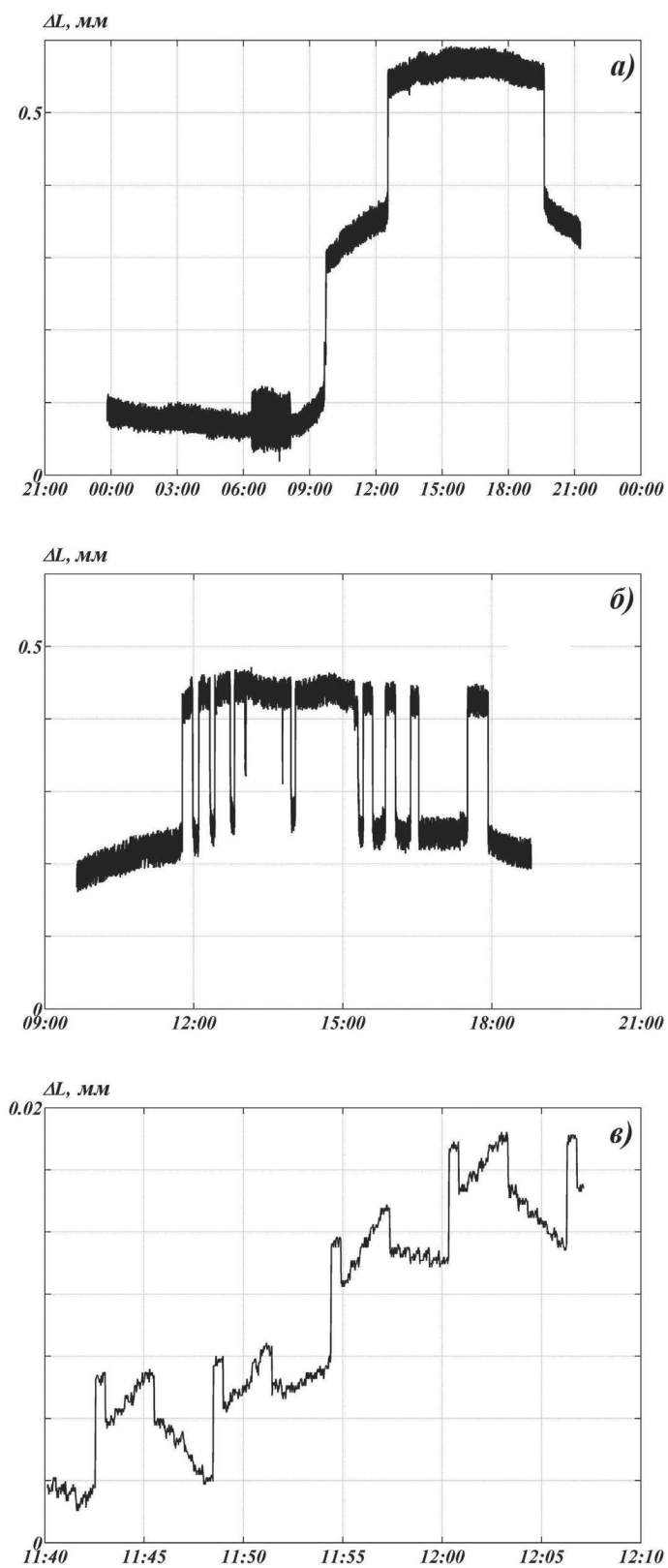


Рис.3. Примеры записей деформации ледяного поля оз. Арахлей (ΔL) на длине датчика 3 м: а) 5 апреля 2010 г.; б) 12 апреля 2010 г.; в) увеличенный фрагмент записи деформаций, представляющий ее тонкую структуру, 7 апреля 2010 г.

Эффект с образованием некогерентных лучей известен в квантовой оптике (Быков, 2006; Быков, 1991). Для обозначения необычных свойств светового излучения в квантовой оптике введен термин «неклассический» свет. Одно из проявлений «неклассического» света – сжатый свет. Для него возможны состояния с низкой дисперсией (неопределенностью амплитуды поля); но при этом фаза поля не определена, т.е. волна не интерферирует с другими волнами.

Следовательно, аномалии поляризационных диаграмм для интенсивности излучения (рис. 2) можно объяснить возникновение во льду некогерентных добавочных волн.

Можно предположить, что появление некогерентных добавочных волн, должно наблюдаться не только в ледяных покровах, но и любых ледяных телах, имеющих структуры с преимущественной ориентацией кристаллов и подвергающихся течению, например, ледниках. Многочисленные необъяснимые аномалии распространения радиосигналов в ледниках отмечены в монографии (Богородский и др., 1983).

В работе (Drews et. al., 2009) также обращено внимание на течение кристаллов в ледяном покрове Антарктиды для объяснения аномалий отраженных сигналов при радиозондировании придонной части ледника. Здесь вблизи ложа ледяного покрова наблюдается так называемая зона свободная от отражения EFZ (echo free zone) толщиной порядка 100 м. Ранее полагали, что эта зона связана с существованием в ней жидкой воды. Однако результаты бурения, приведенные в (Железняков и др., 1989), не подтвердили такое представление. Авторы предполагают, что именно течение среды в нижней части ледника на границе со скальными породами создает условия для потери когерентности при отражении сигнала от слоев льда. Более детально механизм этого явления еще не исследован.

Заключение

В экспериментах по изучению поляризационных аномалий микроволнового излучения, проходящего через ледяной покров и подвергающегося температурным деформациям, обнаруживаются добавочные электромагнитные волны двух типов: когерентные и некогерентные. Когерентные добавочные волны всегда наблюдаются в плоскостных средах. Интерферируя с исходными волнами, они создают пространственные осцилляции интенсивности излучения.

Некогерентные добавочные волны возникают в любых ледяных структурах с пространственным упорядочиванием оптических осей кристаллов, они проявляются при течении среды под действием механических напряжений. Этот тип волн не интерферирует с исходными волнами, поэтому в приемнике излучения происходит сложение мощности поляризованных излучений. Наиболее вероятно появление некогерентных волн при повышении температуры среды, особенно, вблизи температуры фазового перехода, из-за понижения предела текучести, а также при возникновении в ледяных структурах значительных механических напряжений, обусловленных гравитационными воздействиями и градиентами температуры.

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

Литература

1. *Агранович В.М., Гинзбург В.Л.* (1979) Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теории экситонов. М.: Наука. 1979. 432 с.
2. *Баширцева И.А., Зубарев А.Ю., Исакова Л.Ю., Ряшко Л.Б.* (2009) Регулярные и стохастические автоколебания в модели реологического осциллятора // *Нелинейная динамика*. 2009. Т. 5. № 4. С. 603-620.
3. *Богородский В.В., Бентли Ч., Гудмансен П.* (1983) Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 312 с.
4. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д.* (2009) «Просветление» льда в микроволновом диапазоне при текучести // *Письма в журн. техн. физики*. 2009. Вып. 22. С. 46-54.
5. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыбикжапов А.Ц., Цыренжапов С.В.* (2006) Обнаружение «новых» волн Гинзбурга-Пекара во льду в микроволновом диапазоне // *Журнал технической физики*. 2006. Т. 76. № 5. С. 94-97.
6. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В.* (2010) Эффекты гирации микроволнового излучения в ледяных покровах // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 3. С. 139-144.
7. *Бреховских Л.М.* (1957) Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР. 1957. 502 с.
8. *Быков В.П.* (2006) Лазерная электродинамика. Элементарные и когерентные процессы при взаимодействии лазерного излучения с веществом. М.: Физматлит. 2006. 384 с.
9. *Быков В.П.* (1991) Основные особенности сжатого света // *УФН*. 1991. Т. 161. № 10. С. 145-173.
10. *Даценко Л.И., Кладько В.П., Мачулин В.Ф., Молодкин В.Б.* (2002) Динамическое рассеяние рентгеновских лучей реальными кристаллами в области аномальной дисперсии. Киев: Академперіодика. 2002. 352 с.
11. *Железняков В.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В.* (1989) Волны поляризации и сверхизлучение в активных средах // *УФН*. 1989. Т. 159. В. 2. С. 193-256.
12. *Drews R., Eisen O., Weikusat I., et. al.* (2009) Layer disturbances and the radio-echo free zone in ice sheets // *The Cryosphere*. 2009. № 3. P. 195-203.
13. *Petrenko V., Whitworth R.W.* (2002) *Physics of Ice*. Oxford Univ. Press. 2002. 347 p.

Effect of temperature stress on the microwave polarization characteristics of ice covers

G.S. Bordonskiy, A.A. Gurulev, S.D. Krylov

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS

672090 Chita, Butin st., 26

Tel.: (3022)35-40-63; E-mail: lgc255@mail.ru

The effect of mechanical stress on the appearance of additional electromagnetic waves in fresh water ice cover at microwaves was studied. It was founded that the presence of ice preferential orientation of the crystals and the occurrence of flow led to specific polarized incoherent additional waves. Their appearance should be considered when interpreting the radiosounde data icy objects at to temperature changes affected.

Keywords: microwaves, ice, additional waves, polarization, ice flow.