

Науки о Земле

УДК 551.321

DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-9-4-13

ВЛИЯНИЕ АМОРФИЗАЦИИ ЛЬДА НА МИКРОВОЛНОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

INFLUENCE OF ICE AMORPHIZATION ON MICROWAVE CHARACTERISTICS



Г. С. Бордонский,
Институт природных
ресурсов, экологии и
криологии СО РАН,
г. Чита
lgc255@mail.ru



А. А. Гурульев,
Институт природных
ресурсов, экологии и
криологии СО РАН,
г. Чита
lgc255@mail.ru



А. О. Орлов,
Институт природных
ресурсов, экологии и
криологии СО РАН,
г. Чита
Orlov_A_O@mail.ru



С. В. Цыренжапов,
Институт природных
ресурсов, экологии и
криологии СО РАН,
г. Чита
lgc255@mail.ru

G. Bordonskiy,
*Institute of Natural
Resources, Ecology and
Cryology SB RAS, Chita*

A. Gurulev,
*Institute of Natural
Resources, Ecology and
Cryology SB RAS, Chita*

A. Orlov,
*Institute of Natural
Resources, Ecology and
Cryology SB RAS, Chita*

S. Tsyrenzhapov,
*Institute of Natural
Resources, Ecology and
Cryology SB RAS, Chita*

Представлены результаты лабораторных и натурных исследований микроволновых характеристик льда, содержащего аморфную фракцию. Для определения электромагнитных параметров ледяных структур, содержащих такую фракцию, проанализированы результаты ранее проведенных исследований и выполнены специальные эксперименты. Измерена интенсивность радиотеплового излучения растущего ледяного покрова на модели на длине волны 0,88 см при температуре воздуха ниже -20 °С. Обнаружена аномалия поведения радиояркости температуры, выразившаяся в понижении ее среднего значения для начальной стадии формирования льда. Ранее аномалии радиояркости, выразившиеся в пульсациях среднего значения величины за время порядка десятков минут, наблюдали при самолетном эксперименте на длине волны 2,3 см при измерениях ледяного покрова группы озер. Особенности поведения диэлектрической пропицаемости свежеобразованного пресного льда в зависимости от времени его существования и температурных воздействий исследовали с использованием резонатора и волновода на частотах 6,5; 34 и 90 ГГц. Результаты исследования показали, что свежеобразованный лед содержит заметное количество аморфного льда, который трансформируется в кристаллический при выдержке образцов. Этот вывод подтвержден другими исследователями в недавних рентгеноструктурных исследованиях льда, образованного при замораживании воды в металлических кюветах. Появление аморфного льда связывается с его ползучестью (медленной пластической деформацией при релаксации внутренних механических напряжений), а также с быстрой пластической деформацией среды при механических напряжениях, превышающих предел ее текучести. В последнем случае лед приобретает свойства среды с пространственной дисперсией, и в нем возможно проявление нелинейных электромагнитных эффектов при взаимодействии электромагнитной волны с волнами пластической деформации. Процессом аморфизации льда можно объяснить ранее наблюдавшиеся особенности при радиозондировании ледяных покровов.

Ключевые слова: микроволновый диапазон; аморфный лед; электромагнитные свойства; пластическая деформация; аморфизация; аномалии; эксперименты; измерения; характеристики; анализ

The article presents the results of laboratory and field studies of the microwave characteristics of ice containing an amorphous fraction. To determine the electromagnetic parameters of ice structures containing such fraction, the results of early studies and special experiments were analyzed. The intensity of the radiothermal radiation of the growing ice cover was measured on the model at wavelength of 0,88 cm at air temperature below -20 °C. The anomaly of the behavior of radio brightness temperature has been revealed, expressed in a decrease of its average value for the initial stage of ice formation. Earlier, radio brightness anomalies were observed in the airplane experiment at wavelength of 2,3 cm for measurements ice covers the group of lakes, expressed in pulsations of the mean value over a time in the order of ten minutes. The behavior of the dielectric constant of fresh ice as a function of its lifetime and temperature effects are investigated using a resonator and a waveguide at frequencies of 6,5; 34 and 90 GHz. The results of the study showed that freshly formed ice contains a significant amount of amorphous ice, which is transformed into crystalline ice when the samples are held. This conclusion was confirmed by other researchers in recent X-ray studies of ice formed by freezing water in metal cuvettes. The appearance of amorphous ice is associated with its creep (slow plastic deformation in the relaxation of internal mechanical stresses), as well as with rapid plastic deformation of the medium at mechanical stresses exceeding its yield point. In the latter case, the ice acquires the properties of a medium with spatial dispersion and it is possible to exhibit nonlinear electromagnetic effects in the interaction of the electromagnetic wave with waves of plastic deformation. One could explain the previously observed features in the microwave remote sensing data by the process of ice amorphization

Key words: microwave range; amorphous ice; electromagnetic properties; plastic deformation; amorphization; anomalies; experiments; measurements; specifications; analysis

Введение. В природной среде при атмосферном давлении возможно существование трех кристаллических модификаций льда: Ih, Ic, XI, а также аморфного льда [13]. Однако при решении задач исследования Земли обычно рассматривается только лед Ih [6], поскольку лед Ic встречается довольно редко, лед XI возникает при температурах ~ -200 °C, а аморфный лед образуется при конденсации паров воды на подложку с температурой ниже -160 °C [12; 16]. Вместе с тем при радиозондировании ледяных образований накошились трудно объяснимые факты, которые указывают на то, что пресный лед является недостаточно исследованной средой, аномалии свойств которой нельзя отнести к влиянию только загрязнений или примесей.

Например, при радиолокационных исследованиях ледников Гренландии, Антарктиды и других крупных ледяных образований обращено внимание на явные отклонения результатов зондирования от реальных параметров этих объектов [2]. Другой пример — обнаружение в придонных частях ледников слоев, свободных от отражения, так называемых *echo free zone* [14].

Аномалии при радиолокации крупных масс льда объяснены возникновением течения среды (или пластической деформации),

которая облегчена по базисным плоскостям кристаллов льда [4]. При этом среда приобретает особые свойства, которые носят динамический характер, т. е. достаточно быстро изменяются во времени сложным образом в зависимости от взаимодействия с окружающей средой. Течение среды можно связать с появлением аморфной фракции в объеме кристаллического льда.

Цель работы — выполнить эксперименты для выявления признаков существования аморфного льда, которые могут проявиться при дистанционном зондировании; оценить изменение диэлектрической проницаемости льда в микроволновом диапазоне при его аморфизации, а также рассмотреть вопрос о проявлении нелинейных свойств льда при быстрой пластической деформации.

Теоретические предпосылки. В настоящее время отсутствуют сведения о диэлектрических свойствах льда, подвергающегося течению в микроволновом диапазоне, за исключением работы Г. С. Бордона и соавторами [4], где обнаружено «просветление» образцов пресного льда при температуре 0 °C. Этот эффект объясняли механическими напряжениями в среде и пластической деформацией при начальной стадии таяния льда, при которой в среде ра-

зорвана часть водородных связей, но вода еще не образовалась. Убедительное подтверждение высказанного ранее представления получено в работе В. М. Силонова, В. В. Чубарова [10], где при рентгеноструктурных исследованиях льда, образованного замерзанием воды в медных кюветах, обнаружено высокое содержание аморфного льда при температурах $-3\ldots-10^{\circ}\text{C}$. Давление в таких кюветах не могло существенно превышать 0,1 МПа (атмосферное), поэтому (согласно фазовой диаграмме) не ожидалось образование аморфного льда при таких температурах и давлениях. Аморфные льды на фазовой диаграмме их состояния могут существовать только при температурах ниже -140°C [13], а для возникновения таяния при температурах порядка единиц градусов Цельсия требуется давление порядка 10 МПа [20].

Как представляется, аморфизация связана с особыми свойствами кристаллов водного льда, а именно, его пластической деформацией при любых значениях механических напряжений, даже незначительных, что называется ползучестью [15; 18]. Локальные вариации температуры, а также внутренние механические напряжения, образовавшиеся в образце при замерзании воды (например, образцы получали при температуре кипения жидкого азота [10]), приводят к возникновению «состояния ползучести», при котором возникает процесс разрыва и восстановления части водородных связей и которое может быть внешне не заметно. Это особое состояние, которое связывается с динамическими явлениями — релаксацией напряженной среды к устойчивому состоянию.

Казалось бы, для задач дистанционного зондирования достаточно ввести поправки в значение диэлектрической проницаемости «ползучего» льда, о чем говорилось ранее. Однако при изучении механических свойств льда (как и многих других твердых сред) обнаружена нелинейность деформации в зависимости от напряжений с образованием отрицательной дифференциальной вязкости [15; 18]. Такая особенность среды, состоящей из полярных молекул, при-

водит к особому виду ее взаимодействия с электромагнитными волнами с образованием некогерентных добавочных волн [4]. Волны в среде, создаваемые внешними излучателями, рассеиваясь на областях с нелинейными свойствами текучей компоненты льда, теряют когерентность, что приводит к искажениям эллипса поляризации. В этом случае волна не описывается параметрами Стокса, а состоит из двух компонент — когерентной и некогерентной. Дифракция электромагнитной волны на волнах течения во льду определяет появление особых электромагнитных эффектов для мерзлых структур на длинах волн электромагнитного излучения 0,5...2 см [3].

Таким образом, можно ориентировочно выделить две области пластической деформации по скорости течения льда под действием механических напряжений: 1) область медленного течения среды (ползучесть); 2) область быстрой пластической деформации. В этих двух областях, по-видимому, имеются свои особенности. Например, в гляциологии известна кратковременная ползучесть, которая будет определять некоторые особые эффекты при дистанционном зондировании, такие как существенные вариации излучательных и отражательных характеристик ледяных объектов на временных интервалах в минуты и часы. Однако в данной статье рассмотрим только характерные особенности микроволновых характеристик, которые, как представляется, для первой группы связаны с изменением эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью, а для второй — определяются нелинейными свойствами льда при напряжениях, превышающих предел текучести.

Экспериментальные исследования.
1. *Процедура измерений.* Выполнены эксперименты по измерению радиотеплового излучения растущего ледяного покрова на моделях, а также измерения в резонаторах для получения данных о действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частях относительной комплексной диэлектрической проницаемости аморфного льда.

При радиометрических измерениях воду помещали в резервуар под открытым небом. Размеры апертуры емкости $1 \times 1 \text{ м}^2$. Радиометры размещали на некотором расстоянии от открытой водной поверхности, измерение радиояркостной температуры проводили на двух линейных поляризациях: вертикальной (ВП) и горизонтальной (ГП).

Для получения льда с внутренними механическими напряжениями замораживание воды проводили при достаточно низких температурах воздуха $\sim -20^\circ\text{C}$. В этом случае первые поверхностные слои льда из-за конкуренции роста кристаллов испытывают механические напряжения, которые «вмораживались» в структуру льда. Наличие внутренних напряжений выявляли при поляризационных оптических исследованиях срезов льда под микроскопом.

При резонаторных измерениях использовали прямоугольный резонатор с толстыми стенками, выполненный из дюралюминия, с размерами $8 \times 14 \text{ мм}^2$ (сечение) и длиной 15 мм. Для получения льда резонатор заполняли водой, с содержанием солей порядка 1 мг/л, для чего одно входное отверстие закрывали массивной заглушкой и образовавшуюся полость заполняли водой. Замораживание проводили при температуре -20°C , приблизительно в течение 30 мин. Затем избыток льда срезали заподлицо с поверхностью фланца резонатора. Волноводную часть установки располагали при отрицательных температурах в холодной области лабораторной установки.

Результаты измерений. Результаты измерений радиояркостной температуры на длине волны 0,88 см приведены на рис. 1. Также представлен расчет на основе модели неизотермической многослойной плоскопараллельной структуры [9]. Для целей сравнения результатов приведено среднее значение T_y между огибающей интерференционных максимумов и минимумов регистрируемого радиотеплового излучения.

Измерения выявили явное различие средних значений расчетной и измеренной радиояркостной температуры. Для измеренной величины ее значение убывает в на-

чальной стадии роста льда, когда скорость образования кристаллов наивысшая, и они испытывают максимальное напряжение сжатия из-за взаимодействия между собой.

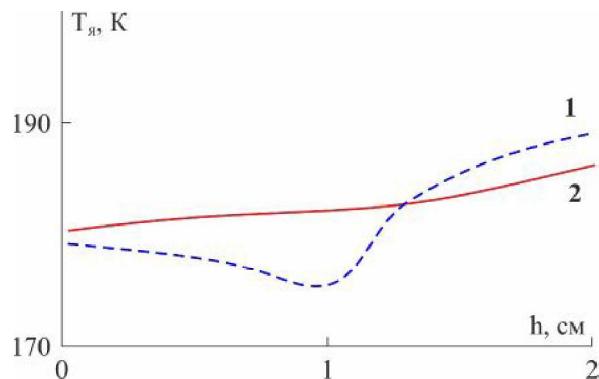


Рис. 1. Зависимость среднего значения радиояркостной температуры ледяного покрова на волне 0,88 см от толщины льда:
1 – экспериментальная зависимость;
2 – расчетная зависимость (угол наблюдения 45° . Горизонтальная поляризация). Полоса частот радиометра $\sim 1 \text{ ГГц}$) /

Fig. 1. Average value dependence of the radio brightness temperature of an ice cover on a wave of 0,88 cm from ice thickness; 1 – experimental dependence; 2 – calculated dependence (angle of observation is 45° . Horizontal polarization. Strip of radiometer frequencies $\sim 1 \text{ GHz}$)

При исследовании свойств среды с использованием резонаторов задавали изменение температуры для изучения диэлектрических свойств свежеобразованного льда. В других опытах наблюдали за изменением резонансной частоты и шириной резонансной кривой резонатора при его выдержке в течение длительного времени. На рис. 2 приведены результаты измерений параметров резонатора от времени за 11 сут вблизи 6500 МГц, которые позволяют определить дрейф диэлектрической проницаемости с течением времени. Образец хранили при температуре окружающей среды не выше -23°C .

Определение значения ε' (для данных рис. 2) льда со временем существования после его образования (6 ч) дает значение 3,127, а для того же льда через 11 сут $\varepsilon' = 3,161$. Вычисления выполнены по формуле $\varepsilon' = \left(f/f_p \right)^2$, справедливой

для случая малых потерь в среде и слабой связи с волноводной линией передачи сигнала. Значение 3,127 для ε' расходится с общепринятым для пресного льда (3,167) при данной температуре [17]. Если бы в образце находилось некоторое остаточное количество незамерзшей жидкости в первые часы после замерзания основной массы воды, то наблюдали бы обратную картину, т. е. ε' свежего льда с остаточными жидкими включениями должна была быть больше для ε' выдержанного льда из-за высокого значения диэлектрической проницаемости жидких включений.

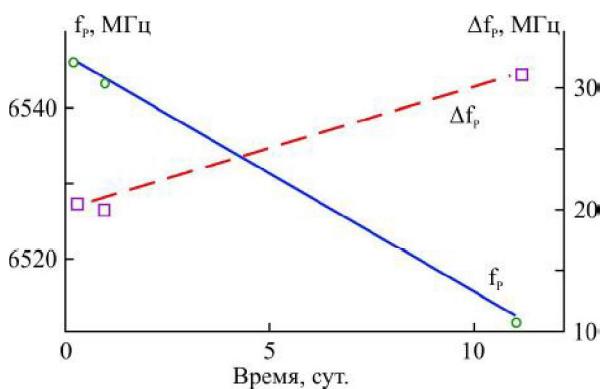


Рис. 2. Изменение резонансной частоты f_p (сплошная линия) и ширины резонансной кривой Δf_p (штриховая линия) на уровне 3 дБ за 11 сут существования образца льда (значения параметров приведены для температуры образца -23°C . Лед из дистиллированной воды с концентрацией соли $\sim 1 \text{ мг/кг}$ /

Fig. 2. Change of resonant frequency f_p (continuous line) and width of a resonant curve Δf_p (dash line) at the level of 3 dB for 11 days of an ice sample existence (values of parameters are given for the sample temperature -23°C . Ice from the distilled water is with concentration of salt $\sim 1 \text{ mg/kg}$)

Результаты исследования и их обсуждение. Для получения полной картины изменения свойств пресного льда при возникновении течения среды используем полученные ранее результаты [4]. На рис. 3 приведены результаты измерений проходящей через блок льда мощности излучения (P) при медленном его нагревании до 0°C .

Полученные результаты (рис. 1–3) можно объяснить образованием в изучаемых объектах аморфного льда. Из измене-

ний Δf_p (рис. 2) при ее возрастании от 20 до 30 МГц можно оценить уменьшение ε'' для аморфной фазы при -23°C на частоте 6,5 ГГц:

$$\Delta\varepsilon'' \approx \frac{(\Delta f_p)_2 - (\Delta f_p)_1}{f_p} \cdot \varepsilon' = \frac{10}{6500} \cdot 3,15 \approx 5 \cdot 10^{-3},$$

где в числителе — изменение ширины резонансной линии при выдержке льда.

Если принять, что весь лед при его образовании аморфный и $(\Delta f_p)_1$ в начальный момент измерения ~ 10 МГц из-за потерь во льду и 10 МГц — из-за связи с волноводом, то ε'' (аморфного льда) $\approx 0,5 \cdot \varepsilon''$ (кристаллического льда). Однако доля аморфного льда в общей массе образцов при замерзании воды не известна. В работе В. М. Силенова, В. В. Чубарова [10] говорится о значительной доле аморфного льда, причем отмечается, что в некоторых образцах рефлексы при рентгеновском исследовании от кристаллической фазы практически отсутствовали. Если оценить ее в 0,3...0,5 от массы образца, тогда ε'' (аморфного льда) $= (0,1...0,3) \cdot \varepsilon''$ (кристаллического льда). Значение ε'' для пресного кристаллического льда, при данной температуре и содержании соли 10 мг/кг, составляет $\sim 10^{-3}$, если содержание соли достигает 50 мг/кг, то $\varepsilon'' \sim 10^{-2}$ [17].

Эти данные качественно согласуются с графиками (рис. 2, 3) для частот 32 и 90 ГГц. Отметим, что еще в ранних измерениях электромагнитных потерь в кернах пресного льда на длине волны 8,8 мм обнаружено, что погонное затухание в них изменялось от 13 до 0 дБ/м [5]. А. Stogrin обратил внимание на эту особенность [19]. При учете названных данных значение ε'' аморфного льда ближе к $\sim 0,1$ от значения ε'' кристаллического льда.

Что касается ε' для аморфного льда, то по измерениям это значение на 0,034 меньше, чем для кристаллического льда, что составляет уменьшение \sim на 1 %. Найденные изменения величин можно объяснить тем, что для аморфного льда уменьшение ε' и ε'' связывается с отсутствием (или уменьшением) в структуре такого льда дефектов Бьеерума и частичным разрушением свя-

занной сетки водородных связей, поэтому он ближе по свойствам к диэлектрикам, чем к полупроводникам (лед II считается протонным полупроводником).

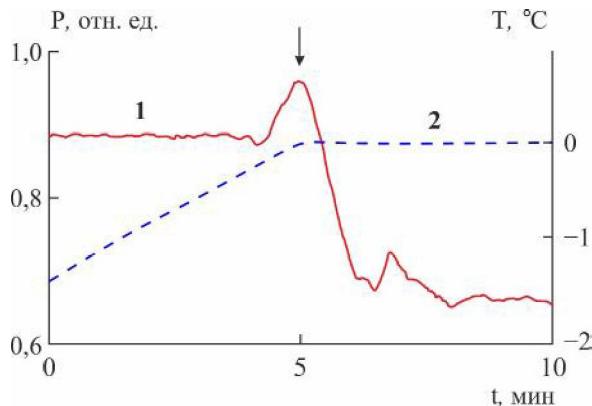


Рис. 3. Зависимость мощности проходящего излучения в относительных единицах (кривая 1) через образец льда на частоте 90 ГГц от времени при его нагревании (кривая 2). Стрелкой отмечено достижение температуры 0 °С и начало таяния льда /

Fig. 3. Dependence of passing radiation power in relative units (curve 1) through an ice sample at a frequency of 90 GHz from time of its heating (curve 2). The arrow has noted attaining of temperature 0 °C and the beginning of ice thawing

Поскольку ε'' аморфного льда меньше, чем для кристаллического, возникновение механических напряжений приводит к понижению радиояркости, что обнаружено в экспериментах по радиометрии (рис. 1).

Особый интерес представляют нелинейные электромагнитные свойства льда при его течении [3; 4]. При радиопросвещивании пресного ледяного покрова параллельно его поверхности на расстоянии 40...60 м на длинах волн 0,8...2,3 см и при установке аппаратуры на глубину 60...70 см при толщине льда 120...140 см обнаружено искажение эллипса поляризации принимаемого излучения. Измерения проводили на льду оз. Арахлей в Забайкальском крае. Искажения наблюдали в конце зимнего периода, когда температура воздуха повышалась перед началом деструкции ледяного покрова. В это время наблюдали резкие суточные колебания температуры, достигающие 20 °С, с возникновением значительных деформаций льда без его видимых разрушений.

Искажение эллипса поляризации объяснили образованием некогерентных добавочных волн, которые возникают в средах с периодическим изменением ее электромагнитных параметров. Если период этих изменений близок к длине волны излучения, то вследствие пространственной модуляции волны возникают добавочные волны, которые имеют отличающуюся длину от исходной волны при одинаковой поляризации и частоте излучения [1]. В случае, если периодические структуры имеют хаотические параметры в объеме среды, то возникающие добавочные волны оказываются некогерентными.

Некоторое время не было ясности в вопросе физической природы периодических структур в ледяном покрове. Но относительно недавно предложена новая концепция течения кристаллических сред [7; 8]. Показано, что пластическая деформация любых кристаллических сред сопровождается возникновением необычного явления — автоволн течения. Автоволны течения представляют солитоны с чередованием аморфной фазы в кристаллической среде с характерным расстоянием (т. е. длиной волны) в пределах 0,5...2 см.

Предложено наблюдать добавочные волны по нарушениям параметров Стокса [3]. Так как волны течения в объеме среды имеют хаотические характеристики, следовательно, рассеяние излучения на этих структурах приводит к некогерентным добавочным волнам. Для них, например, первый параметр Стокса (S_1) может быть различен при измерениях в различных поляризационных базисах. Следовательно, его измерения в двух повернутых на некоторый угол базисах дадут различные значения. Для плоской монохроматической волны в изотропной среде разность этого параметра для двух базисов $\Delta S_1 = 0$, так как S_1 характеризует интенсивность излучения и не зависит от выбора поляризационного базиса. Такие измерения выполнены для ледяного покрова перед началом его таяния. На рис. 4а приведены результаты измерений для разности $\Delta S = (S_1' - S_1'')$, где S_1' (ВП, ГП) определен для базиса (ВП, ГП) и $S_1''(45^\circ, -45^\circ)$ для базиса ($45^\circ, -45^\circ$).

Излучение осуществляли на круговой поляризации. На рис. 4 δ приведены значения температуры льда на глубине 10 см для определения моментов максимального изменения градиентов температур во льду за несколько суток измерений. Ненулевое значение ΔS_1 наблюдалось при изменении направления градиента температуры в верхних слоях льда, т. е. во время возникновения наибольших деформаций в ледяном покрове.

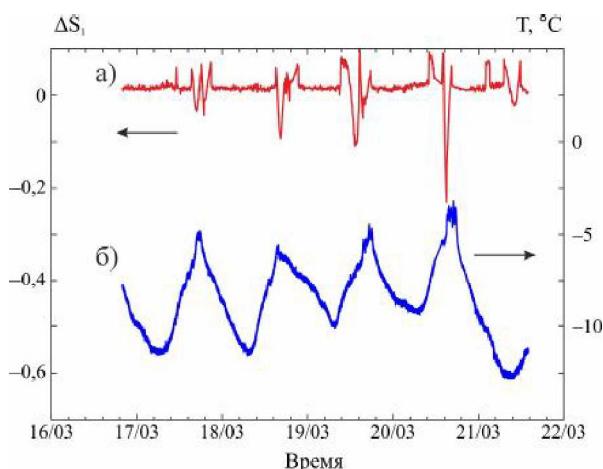


Рис. 4. Результаты измерений параметров ледяного покрова: а) разность первого параметра Стокса (в относительных единицах); измерения на длине волн 2,3 см; б) температура льда на глубине 10 см, толщина снежного покрова при измерениях 2...5 см (дата измерений: 16–21.03.2016 г. Ледяной покров оз. Арахлей в Забайкальском крае) /

Fig. 4. The results of measurements of ice cover parameters: a) difference of the first parameter of Stokes (in relative units); measurements on the wave length of 2,3 cm; b) ice temperature at a depth of 10 cm, thickness of snow cover at measurements 2 ... 5 cm (date of measurements: 16–21.03.2016 g. An ice cover of the Lake Arakhley in Transbaikal Region)

Таким образом, из выполненных экспериментов следует, что при механических воздействиях на лед можно выделить две области механических напряжений по скорости деформаций. Первая – область малых напряжений, когда наблюдается низкая скорость деформации. Она соответствует явлению, называемому в физике льда ползучестью. При ползучести имеет место аморфизация, захватывающая значительный

объем льда. По мнению В. М. Силонова, В. В. Чубарова [10], это может иметь место до полного объема образца в замкнутом пространстве с жесткими границами. Для учета аморфной фазы при измерениях микроволновых свойств различных объектов можно определять свойства среды, используя значения ϵ' и ϵ'' , полученные из измерений. Однако следует разработать специальные методики, позволяющие учесть долю аморфного льда в объеме образца.

В настоящее время сведения о ϵ' и ϵ'' аморфного льда, возникшего при течении льда Ih, отсутствуют. По оценке, выполненной в данном исследовании, для частоты 6,5 ГГц при ползучести среды ϵ' незначительно уменьшается, приблизительно на ~1 %. Понижение ϵ'' более существенно, приблизительно на порядок величины на частотах 6,5, 34 и 94 ГГц, где выполнены измерения. Анализ полученных результатов указывает на то, что участки среды при медленном течении обладают свойствами диэлектрика, а не жидкой воды, как это происходит при высоких давлениях [20], так как в последнем случае ϵ' и ϵ'' заметно выше, чем для чисто кристаллического льда Ih. По-видимому, наблюдения echo free zone (области свободной от отражения на дне ледников Антарктиды), объясняются возникновением аморфизации льда при давлениях больше 10 МПа с понижением электромагнитных потерь, так как хорошо регистрируется граница льда на подложке. При аморфизации придонного слоя ледников исчезает стратификация льда, связанная с ориентацией главной оптической оси кристаллов.

При достижении в среде предела текучести, когда в ней возникает нелинейная связь деформации с напряжением, ситуация резко усложняется. В такой среде возникают автоволны течения – чередование кристаллического и аморфного состояний [7; 8]. Кроме возникновения пространственной дисперсии в определенных участках спектра микроволнового диапазона такая среда может обладать активностью. Предполагается, что отрицательная дифференциальная вязкость для полярной среды сопровождается и отрицательным диф-

ференциальным сопротивлением для токов определенных частотных интервалов. Этот вопрос требует дальнейшего экспериментального исследования. Течение среды может возникать не только при механических воздействиях и температурных напряжениях в той или иной мерзлой среде, но также при конденсации пара на холодных частицах с последующим их замерзанием и возникновением волновых структур при спинодальном распаде жидкого состояния [3; 11]. Это явление может возникнуть в случае формирования града, т. е. при атмосферных процессах.

Выводы. 1. Выполненные микроволновые эксперименты выявили эффекты, которые можно объяснить аморфизацией льда I_h (просветление среды, пульсации радиояркостной температуры и др.). Появление аморфной компоненты льда при температурах -10...-3 °С подтверждено наблюдениями также при рентгеноструктурных исследованиях. Образование аморфной фазы связывается с воздействием механических напряжений на лед I_h, возникающих как в процессе кристаллизации воды в стиснутых условиях, так и при изменении температуры в среде, а также при внешних силовых воздействиях (приливах, волновых движениях, взаимодействиях с окружающей средой и т. п.).

2. Механические напряжения создают пластическую деформацию льда, которая при невысоких значениях напряжений или в ограниченном жесткими стенками пространстве приводит к ползучести, а при превышении предела текучести — к нелинейной связи деформации и напряжения, быстрой пластической деформации с возникновением отрицательной дифференциальной вязкости. Таким образом,

аморфизация ледяных объектов связана с динамическим явлением — их течением. При прекращении течения и релаксации механических напряжений аморфная фаза переходит в кристаллический лед.

3. В области ползучести значение ε' аморфного льда ниже, чем для кристаллического льда I_h. По оценкам из выполненных измерений, при понижении $\varepsilon' \sim 1\% \varepsilon''$ уменьшается приблизительно на порядок. Аморфизацию при ползучести в расчетах переноса излучения в мерзлой среде можно учесть, зная ε' аморфного льда. Необходимо выполнить соответствующие более точные измерения значений ε' и ε'' в диапазоне частот и интервале температур. Для этого требуется разработка методики учета доли аморфного льда в образцах при измерениях.

4. В области превышения предела текучести в среде возникает пространственная дисперсия. По современным представлениям, в пластически деформируемой среде возникают автоволны течения в диапазоне длин волн 0,5...2 см и возможно проявление активности (например, усиление внешнего излучения). Как предполагается, автоволны течения могут возникать и при конденсации пара на холодной твердой поверхности при спинодальном распаде жидкой пленки при ее замерзании.

5. Необходимо изучение влияния аморфизации льда и связанных с ней динамических явлений на его электромагнитные свойства для развития методов дистанционного зондирования, так как ледяные структуры широко распространены в природной среде, а силовые воздействия на них из-за тепловых процессов, приливов, волновых движений характерны для поверхностных слоев Земли, холодных планет и их спутников.

Список литературы

1. Агранович В. М., Гинзбург В. Л. Кристаллоонтика с учетом пространственной дисперсии и теория экзитонов. М.: Наука, 1979. 432 с.
2. Богородский В. В., Гаврило В. Н., Недошивин О. А. Разрушение льда. Методы, технические средства. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 232 с.
3. Бордонский Г. С. Причины образования некогерентных добавочных волн в микроволновом диапазоне в пресном льду при пластической деформации // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 8. С. 131–136.
4. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д. Электромагнитные потери пресного льда в микроволновом диапазоне при 0 °С // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 6. С. 587–592.

5. Глушнев В. Г., Слуцкер Б. Д., Финкельштейн М. И. Об измерении затухания радиоволн восьмимиллиметрового диапазона в морском и пресноводном льдах и снеге // Известия вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 9. С. 1305–307.
6. Ялезняк И. И. Глыбовый массив горных пород: исследование и моделирование криогенного теплопереноса // Вестник Забайкальского гос. ун-та. 2015. № 11. С. 23–29.
7. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Бараникова С. А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 322 с.
8. Зуев Л. Б., Зариковская Н. В., Федосова М. А. Макролокализация пластического течения в алюминии и соотношение Холла-Петча // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, № 9. С. 68–74.
9. Клепиков И. Н., Шарков Е. А. Теоретические исследования собственного излучения резко однородных неизотермических сред // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3–15.
10. Силонов В. М., Чубаров В. В. Аморфизация льда вблизи точки плавления // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 5. С. 108–112.
11. Скрипов В. П., Скрипов А. В. Спинодальный распад (фазовый переход с участием неустойчивых состояний) // Успехи физических наук. 1979. Т. 128, № 2. С. 193–231.
12. Amann-Winkel K., Böhmer R., Fujara F., Gainaru C., Geil B., Loerting T. Colloquium: Water's controversial glass transitions // Reviews of Modern Physics. 2016. Vol. 88. No. 1.
13. Chaplin M. Amorphous ice and glassy water [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lsbu.ac.uk/water/chaplin.html> (дата обращения: 17.07.2018).
14. Drews R., Eisen O., Weikusat I., Kipfstuhl S., Lambrecht A., Steinhage D., Wilhelms F., Miller H. Layer disturbances and the radio-echo free zone in ice sheets // The Cryosphere. 2009. No. 3. P. 195–203.
15. Hobbs P. V. Ice physics. Oxford: Clarendon Press, 1974. 837 p.
16. Loerting T., Giovambattista N. Amorphous ices: experiments and numerical simulations // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. Vol. 18. P. 919–977.
17. Mätzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies // J. Phys. D.: Appl. Phys. 1987. Vol. 20. P. 1623–1630.
18. Petrenko V. Physics of Ice. Oxford: Oxford Univ. Press, 1999. 347 p.
19. Stogrin A. Study of the microwave brightness temperature of snow from the point of view of strong fluctuation theory // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 1986. Vol. 24. No. 2. P. 220–231.
20. Tse J. S., Klein M. L. Pressure induced amorphization of ice Ih // J. Chem. Phys. 1990. Vol. 92. No. 6. P. 3992–3994.

References

1. Агранович В. М., Гинзбург В. Л. *Kristallooptika s uchetom prostranstvennoi dispersii i teoriya eksitonov* (Crystal optics with allowance for spatial dispersion and exciton theory). Moscow: Nauka, 1979. 432 p.
2. Богородский В. В., Гаврилов О. А. *Razrushenie lida. Metody, tekhnicheskie sredstva* (Destruction of ice. Methods, technical means). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 232 p.
3. Бордонский Г. С. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* (Technical Physics Journal), 2016, vol. 86, no. 8, pp. 131–136.
4. Бордонский Г. С., Гурьев А. А., Крылов С. Д. *Radiotekhnika i elektronika* (Radio engineering and electronics), 2014, vol. 59, no. 6, pp. 587–592.
5. Глушнев В. Г., Слутский Б. Д., Финкельштейн М. И. *Izvestiya vuzov SSSR. Ser. Radiofizika* (News of universities of the USSR. Radiophysics series), 1976, vol. 19, no. 9, pp. 1305–307.
6. Железняк И. И. *Vestnik Zabaykalskogo gos. univ.* (Transbaikal State University Journal), 2015, no. 11, pp. 23–29.
7. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Бараникова С. А. *Fizika makrолokalizatsii plasticheskogo lecheniya* (Physics of macrolocalization of plastic flow). Novosibirsk: Nauka, 2008. 322 p.
8. Зуев Л. Б., Зариковская Н. В., Федосова М. А. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* (Technical Physics Journal), 2010, vol. 80, no. 9, pp. 68–74.
9. Клепиков И. Н., Шарков Е. А. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* (Earth exploration from space), 1992, no. 6, pp. 3–15.
10. Силонов В. М., Чубаров В. В. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neutronnye issledovaniya* (Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies), 2014, no. 5, pp. 108–112.
11. Скрипов В. П., Скрипов А. В. *Uspekhi fizicheskikh nauk* (Advances in the physical sciences), 1979, vol. 128, no. 2, pp. 193–231.
12. Amann-Winkel K., Böhmer R., Fujara F., Gainaru C., Geil B., Loerting T. *Reviews of Modern Physics* (Reviews of Modern Physics), 2016, vol. 88, no. 1.
13. Chaplin M. *Amorphous ice and glassy water* (Amorphous ice and glassy water). Available at: <http://www.lsbu.ac.uk/water/chaplin.html> (Date of access: 17.07.2018).

14. Drews R., Eisen O., Weikusat I., Kipfstuhl S., Lambrecht A., Steinhage D., Wilhelms F., MillerH. *The Cryosphere (The Cryosphere)*, 2009, no. 3, pp. 195–203.
15. Hobbs P. V. *Ice physics (Ice physics)*. Oxford: Clarendon Press, 1974. 837 p.
16. Loerting T., Giovambattista N. *J. Phys.: Condens. Matter (J. Phys.: Condens. Matter)*, 2006, vol. 18, pp. 919–977.
17. Mätzler C., Wegmüller U. *J. Phys. D.: Appl. Phys. (J. Phys. D.: Appl. Phys.)*, 1987, vol. 20, pp. 1623–1630.
18. Petrenko V. *Physics of Ice (Physics of Ice)*. Oxford: Oxford Univ. Press, 1999. 347 p.
19. Stogrin A. *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing (IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing)*, 1986, vol. 24, no. 2, pp. 220–231.
20. Tse J. S., Klein M. L. *J. Chem. Phys. (J. Chem. Phys.)*, 1990, vol. 92, no. 6, pp. 3992–3994.

Коротко об авторах

Бордонский Георгий Степанович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией геофизики криогенеза, Институт природных ресурсов экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Чита, Россия. Область научных интересов: дистанционное зондирование, микроволновая радиометрия, физика льда и мерзлых дисперсных сред
lgc255@mail.ru

Гурьев Александр Александрович, канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природных ресурсов экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Чита, Россия. Область научных интересов: радиофизика, дистанционное зондирование мерзлых сред в микроволновом диапазоне
lgc255@mail.ru

Орлов Алексей Олегович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт природных ресурсов экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Чита, Россия. Область научных интересов: радиофизика, дистанционное зондирование мерзлых сред в микроволновом диапазоне
Orlov_A_O@mail.ru

Цыренжапов Сергей Васильевич, младший научный сотрудник, Институт природных ресурсов экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Чита, Россия. Область научных интересов: инженерная геология, физические свойства мерзлых дисперсных сред
lgc255@mail.ru

Briefly about the authors

Georgy Bordonskiy, doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of Cryogenesis Geophysics laboratory, Institute of Natural Resources Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: remote sensing, microwave radiometry, physics of ice and frozen dispersed media

Aleksandr Gurulev, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, senior researcher, Institute of Natural Resources Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: radio physics, remote sensing of frozen media in the microwave range

Aleksey Orlov, candidate of physical and mathematical sciences, researcher. Institute of Natural Resources Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: radio physics, remote sensing, cryogenic objects, condensed matter

Sergey Tsyrenzhapov, junior researcher, Institute of Natural Resources Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: engineering geology, physical properties of frozen dispersed media

Образец цитирования

Бордонский Г. С., Гурьев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Влияние аморфизации льда на микроволновые характеристики // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 9. С. 4–13. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-9-4-13.

Bordonskiy G., Gurlev A., Orlov A., Tsyrenzhapov S. Influence of ice amorphization on microwave characteristics // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 24, no. 9, pp. 4–13. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-9-4-13.

Статья поступила в редакцию: 19.07.2018 г.
Статья принята к публикации: 02.11.2018 г.