

11

Возможный механизм просветления льда в микроволновом диапазоне вблизи 0°C

© Г.С. Бордонский

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия
E-mail: lgc255@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 апреля 2023 г.
В окончательной редакции 1 февраля 2024 г.
Принято к публикации 1 февраля 2024 г.

Предложено объяснение эффекта просветления пресного льда в микроволновом диапазоне при 0°C . Просветление связано с возникновением плазмонного резонанса в островковых пленках среды, возникающих при пластическом течении льда под действием температурных деформаций вблизи фазового перехода.

Ключевые слова: пресный лед, микроволновое затухание, пластическая деформация, плазмонный резонанс.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.09.57567.19587

Диэлектрические характеристики пресного льда в микроволновом диапазоне довольно хорошо изучены. Остается неисследованной область приблизительно от -0.5 до 0°C . При этом неявно предполагается, что вблизи температуры фазового перехода происходит таяние некоторых областей льда на гранях кристаллов, в поровом пространстве, где накапливаются растворимые в воде примеси и частицы загрязнений, что приводит, например, к сложности интерпретации данных дистанционного зондирования [1].

В работах [2,3] сообщалось об обнаружении „просветления“ пресного льда вблизи температуры его таяния в микроволновом диапазоне на частотах 3.3, 5.2, 34 и 90 GHz. Это наблюдение противоречит предположению о росте электромагнитных потерь из-за таяния некоторых областей исследуемого объекта вблизи точки фазового перехода. Выдвигалось объяснение эффекта, связанное со сдвиговой пластической деформацией кристаллов льда по базисным плоскостям, так как просветление наблюдалось, если вектор электрического поля волн находился в этой плоскости [3]. Поскольку для льда было известно существование отрицательной дифференциальной вязкости [4], просветление было связано с этой особенностью, при которой тонкий слой из молекул воды находится в неустойчивом состоянии. Однако более детальное объяснение явления дано не было.

В настоящей работе выполнены новые эксперименты по измерению действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей относительной диэлектрической проницаемости льда с использованием резонатора вблизи частоты 3.5 GHz. Использован прямоугольный резонатор типа H_{101} с внутренними размерами $58 \times 26 \times 25$ mm. Кроме того, были обобщены некоторые другие экспериментальные и теоретические исследования по структуре воды, которые позволили выдвинуть уточняющий механизм явления для объяснения аномальных проявлений электромагнитных свойств пресного льда в микроволновом диапазоне [5].

На рис. 1 представлена схема эксперимента по исследованию резонатора с пресным льдом. В эксперименте измерялись характеристики пропускания резонатора: мощность пропускания на резонансной частоте (P), ширина полосы пропускания, а также температура образца (T). Образец льда был выпилен из ледяного покрова пресного озера в центральной области по высоте, где по данным измерений оптические оси кристаллов были преимущественно ориентированы вертикально. Выпиленный образец с размерами, соответствующими размерам полости резонатора, помещался в его объем таким образом, чтобы базисные плоскости кристаллов были параллельны вектору электрического поля. Нижняя резонансная частота резонатора 6.182 GHz. Минерализация льда составляла 5 mg/kg. Измерения начинали при температуре резонатора от -5 до -10°C с его нагреванием в лабораторном помещении при температуре воздуха $\sim 20^{\circ}\text{C}$. Термопару помещали в тело резонатора. Точность относительных измерений температуры составляла порядка 0.1°C . Скорость измерений — один отсчет за 3 s.

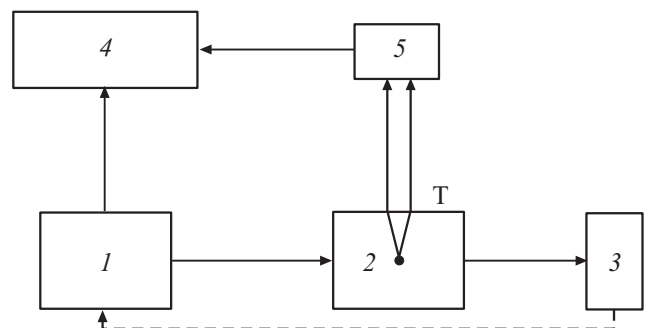


Рис. 1. Схема установки для измерения диэлектрических характеристик льда вблизи температуры фазового перехода. 1 — измеритель частотных характеристик P2M-18/2 (фирмы „Микран“), 2 — резонатор с термопарой (T), 3 — детектор измерителя, 4 — система сбора и записи информации, 5 — усилитель термопары.

Результаты одного из экспериментов представлены на рис. 2. Принципиально они повторили предыдущие результаты. Их особенность при измерениях на частоте 3.5 GHz заключалась в том, что приращение мощности ΔP из-за просветления при приближении к 0°C оказалось более чем в 2 раза выше исходного значения P в точке, отмеченной стрелкой на рис. 2. В предыдущих экспериментах ΔP составляло 10–20% [2,3]. Расчеты значения ϵ'' льда (с учетом потерь в пустом резонаторе) показали, что эта величина при максимуме пропускания резонатора уменьшилась в 4 раза и приблизилась к значению $5 \cdot 10^{-3}$ (при погрешности измерений $0.5 \cdot 10^{-3}$). Необычным оказалось то, что вблизи максимума P наблюдалось резкое падение мощности сигнала, проходящего через резонатор с образцом, приблизительно в 5 раз.

Ранее в работе [6] при просвечивании блока льда было обнаружено аналогичное поведение мощности проходящего через образец излучения (рис. 3). Резкое увеличение поглощения на фоне максимума P наблюдали не во всех экспериментах. Однако его рассмотрение позволило уточнить физический механизм наблюдаемого просветления среды.

Анализ литературных источников показывает, что интенсивность сигналов при спектрометрических измерениях композитных сред может существенно возрастать из-за плазмон-поляритонных возбуждений на границе проводящих и диэлектрических сред [7,8]. В случае образования проводящих наноразмерных частиц в слабопоглощающей среде возникают резонансы рассеяния и поглощения, а также усиление мощности сигналов, распространяющихся вдоль цепочек таких частиц. При их взаимодействии со средой может возникнуть резкое уменьшение излучения на определенных частотах, известное как „тушение“ плазмонного резонанса.

Однако пресный лед — это химически однородная среда (с небольшим количеством примесей $\sim 10^{-5}$). При этом, как было обнаружено в [2,3], эффект просветления

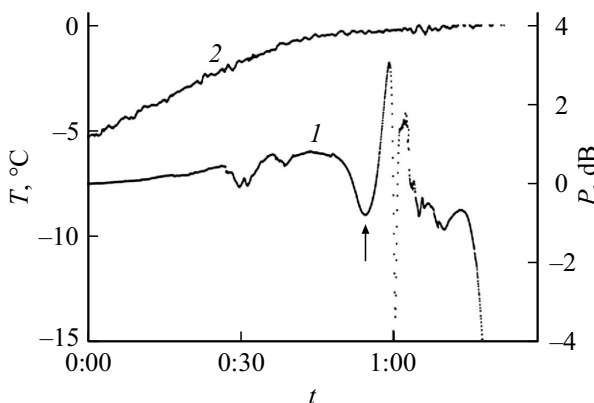


Рис. 2. Результаты измерения мощности пропускания резонатора со льдом от условного уровня 0 dB (1) и температуры (2) в зависимости от времени нагревания. Стрелкой отмечено начало просветления.

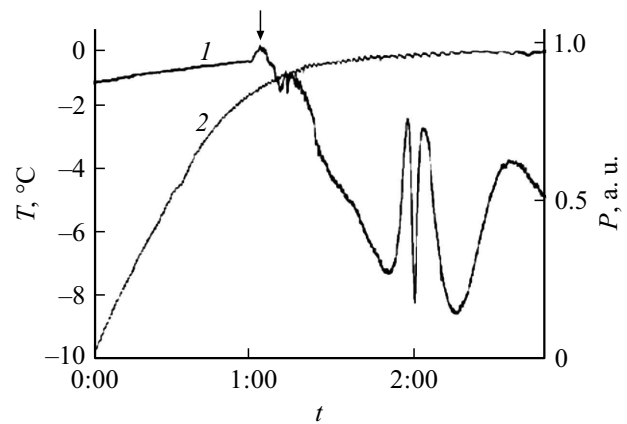


Рис. 3. Зависимости мощности проходящего через образец льда излучения на частоте 32 GHz (1) и температуры (2) от времени нагревания [6]. Стрелкой отмечено просветление.

возникал при нагревании льда при приближении к 0°C перед началом таяния. Таяние определялось по возникновению затухания в среде и достижению температуры льда, близкой 0°C , при точности измерений $\sim 0.1^\circ\text{C}$. Как отмечалось выше, необычным являлось резкое уменьшение затухания перед его последующим достаточно быстрым возрастанием.

Поэтому была выдвинута новая гипотеза о том, что при возникновении в исследуемых образцах пластического течения по базисным плоскостям кристаллов льда в результате деформаций, вызванных градиентом температуры, в среде возникают плазмон-поляритоны. В [2,3] эффект объяснялся течением кристаллов льда по базисным плоскостям, но описание механизма усиления не было предложено. Если также принять предположение образования островков нанометровых размеров на границах слоев, по которым происходит скольжение и появление плазмон-поляритонов, то необходимо понять механизм существенного возрастания проводимости в них. Возможно следующее объяснение. При разрыве водородных связей в слоях, по которым происходит скольжение, образуются жидкие пленки воды. В работе [9] было показано, что на плоской границе жидкой воды с диэлектриком происходит сегнетоэлектрическое упорядочение диполей воды в случае гидрофобной (или частично гидрофобной) поверхности. При этом, как было установлено теоретически и экспериментально в [10], в контактном слое между сегнетоэлектриком и диэлектриком возникает слой с высокой электропроводностью. Она может быть на шесть порядков выше, чем проводимость объемного материала. Этот эффект определяется разностью значений статической диэлектрической проницаемости двух материалов. Кроме того, известно, что пластическая деформация не происходит в виде плавного течения, а проявляется в виде автоволн локализованной пластичности [11]. Длины этих волн в среде находятся в интервале 0.5–2 см. С указанными волнами связано также проявление разделения

зарядов вследствие акустоэлектрического эффекта [12]. В результате течение по пленкам представляет собой замерзание-таяние сверхтонких слоев льда с возникновением проводящих областей и электрических потенциалов. В процессе изменения состояния льда в локальных областях кристаллов с возникновением и исчезновением волн течения в объеме ледяного тела возникают островковые проводящие двумерные образования и появляются плазмон-поляритоны. Их резонансные частоты определяются размерами, проводимостью слоев и характеристиками контактных сред. При этом можно ожидать, что резонансные свойства островков имеют широкий спектр и доходят до частот микроволнового диапазона [7,13]. Тушение плазмонного усиления поля может определяться существованием в среде определенного состояния окружения проводящих включений из примесей в виде жидких и твердых солевых включений, некоторое количество которых всегда имеется в пресной воде.

Следует отметить, что во льду вблизи 0°C при возникновении процесса таяния возможно появление как объемной, так и связанной воды. По существующим представлениям связанная вода имеет переходные значения ϵ' и ϵ'' между льдом и объемной водой. Поэтому появление связанной воды в любом случае должно приводить к росту электромагнитных потерь и понижению резонансной частоты резонатора. Поэтому ее образование не может приводить к эффекту просветления льда. В выполненных нами экспериментах наблюдаемые явления возникали перед появлением заметных количеств как объемной, так и связанной воды, что следовало из отсутствия выраженного сдвига резонансной частоты резонатора.

Эффект понижения фактора потерь до значения, близкого к нулевому, в микроволновом диапазоне наблюдали ранее, например в [14] на длине волны 8.2 mm. Измеренное погонное затухание в образцах изменялось от 0 до 13 dB/m, хотя для химически чистого льда по расчетам оно равно 2 dB/m. На эти данные обращали внимание в ряде публикаций, но эффект так и не был объяснен. Знание физического механизма просветления льда при 0°C представляет интерес для исследования электрических явлений в криосферных образованиях.

Таким образом, просветление образований из пресного льда в микроволновом диапазоне, а также особенности его изменения по мере приближения к точке фазового перехода можно объяснить появлением плазмон-поляритонов при возникновении волн пластического течения по пленкам, параллельным базисным плоскостям кристаллов. Течение происходит в виде автоволн локализованной пластичности, что приводит к образованию в квазижидких пленках среды областей с чередованием кристаллической структуры и активных областей. В этих пленках образуются наноразмерные островковые пленки при таянии-замерзании тонких слоев воды.

Плазмонные резонансы возникают в островковых пленках из-за появления металлической проводимости,

вызванной сегнетоэлектрическим упорядочением на контакте льда и квазижидких слоев, по которым происходит течение. Их геометрические факторы определяют ширину полосы резонанса, простирающегося до нулевых частот в случае анизотропии формы островков. Вследствие влияния примесей в объеме среды на контакте с островками в некоторых случаях наблюдается резкое возрастание затухания („тушение“ плазмонного резонанса).

Эффект просветления и сопутствующие ему особенности могут наблюдаться перед таянием в разнообразных природных мерзлых структурах (например, в мерзлых почвах и грунтах, ледниках, ледяных и снежных покровах), так как кроме кристаллов льда в них содержится значительное количество мелких твердых включений и захваченных в замерзшую среду химических соединений, а следовательно, имеет место широкий набор резонансных частот.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.А. Репина, В.В. Тихонов, Рос. Арктика, № 2, 15 (2018). DOI: 10.24411/2658-4255-2018-00015
- [2] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов, Письма в ЖТФ, **35** (22), 46 (2009). [G.S. Bordonskii, A.A. Gurulev, S.D. Krylov, Tech. Phys. Lett., **35** (11), 1047 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009110224].
- [3] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов, Радиотехника и электроника, **59** (6), 587 (2014). DOI: 10.7868/S0033849414060060 [G.S. Bordonskii, A.A. Gurulev, S.D. Krylov, J. Commun. Technol. Electron., **59** (6), 536 (2014). DOI: 10.1134/S1064226914060060].
- [4] В.П. Епифанов, *Акустические методы в механике деформирования и разрушения пресноводного поликристаллического льда*, докт. дис. (Ин-т проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, М., 2018).
- [5] Г.С. Бордонский, Криосфера Земли, **18** (2), 24 (2014).
- [6] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов, Изв. вузов. Радиофизика, **52** (3), 260 (2009). [G.S. Bordonskii, A.A. Gurulev, S.D. Krylov, Radiophys. Quantum Electron., **52** (3), 235 (2009). DOI: 10.1007/s11141-009-9122-2].
- [7] К. Борен, Д. Хафмен, *Поглощение и рассеяние света малыми частицами* (Мир, М., 1986). [C.F. Bohren, D.R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles* (John Wiley & Sons, 1983).].
- [8] С.А. Майер, *Плазмоника: теория и приложения* (НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, М.—Ижевск, 2011).
- [9] Л.И. Меньшиков, П.Л. Меньшиков, П.О. Федичев, УФН, **190** (5), 475 (2020). DOI: 10.3367/UFNr.2020.01.038721 [L.I. Menshikov, P.L. Menshikov, P.O. Fedichev, Phys. Usp., **63** (5), 440 (2020). DOI: 10.3367/UFNe.2020.01.038721].
- [10] S.M. Korobeynikov, A.V. Melekhov, Yu.G. Soloveitchik, M.E. Royak, D.P. Agoris, E. Pyrgioti, J. Phys. D: Appl. Phys., **38** (6), 915 (2005). DOI: 10.1088/0022-3727/38/6/021].

- [11] Л.Б. Зуев, Ю.А. Хон, *Физ. мезомеханика*, **24** (6), 5 (2021). DOI: 10.24412/1683-805X-2021-6-5-14 [L.B. Zuev, Y.A. Khon, *Phys. Mesomech.*, **25** (2), 103 (2022). DOI: 10.1134/S1029959922020011].
- [12] Г.С. Бордонский, С.В. Цыренжапов, Ю.В. Харин, *Конденсированные среды и межфазные границы*, **14** (2), 162 (2012).
- [13] А.Е. Гайдук, *Мультirezонансные поляризационные системы на основе метаповерхностей*, канд. дис. (Ин-т физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 2021).
- [14] В.Г. Глушнев, Б.Д. Слуцкер, М.И. Финкельштейн, *Изв. вузов. Радиофизика*, **19** (9), 1305 (1976). [V.G. Glushnev, B.D. Slutsker, M.I. Finkel'shtein, *Radiophys. Quantum. Electron.*, **19** (9), 916 (1976). DOI: 10.1007/BF01044047].