

05.1;05.2

## **„Просветление“ льда в микроволновом диапазоне при текучести**

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

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

Поступило в Редакцию 27 мая 2009 г.

Экспериментально установлено, что при возникновении во льду механических напряжений с достижением предела текучести электромагнитные потери в среде в микроволновом диапазоне кратковременно уменьшаются. Предполагается, что уменьшение электромагнитных потерь связано с появлением инвертированных слоев при текучести и усилением внешнего сигнала или собственного теплового излучения при последующем замерзании квазизжидких слоев.

PACS: 94.20.ws

Особенностью физических свойств пресного льда является способность течь при любых механических напряжениях [1]. Существует, кроме того, предел механических напряжений, называемый пределом текучести, при котором процесс течения резко ускоряется и возникает нелинейная связь между напряжением и деформацией образца [1,2]. Очевидно, что все криогенные образования подвергаются в природных условиях механическим воздействиям и, следовательно, часто находятся одновременно в двух состояниях: в твердом и жидком. Однако при текучести возникает не просто жидкость в некотором, пусть и малом объеме, а особое состояние среды. Как известно, течение происходит в кристаллах льда вдоль их базисных плоскостей, между которыми находится меньшее число водородных связей. В результате возникают плоскости скольжения, вдоль которых ориентация протонов нарушена и такие области можно назвать квазизжидкими слоями.

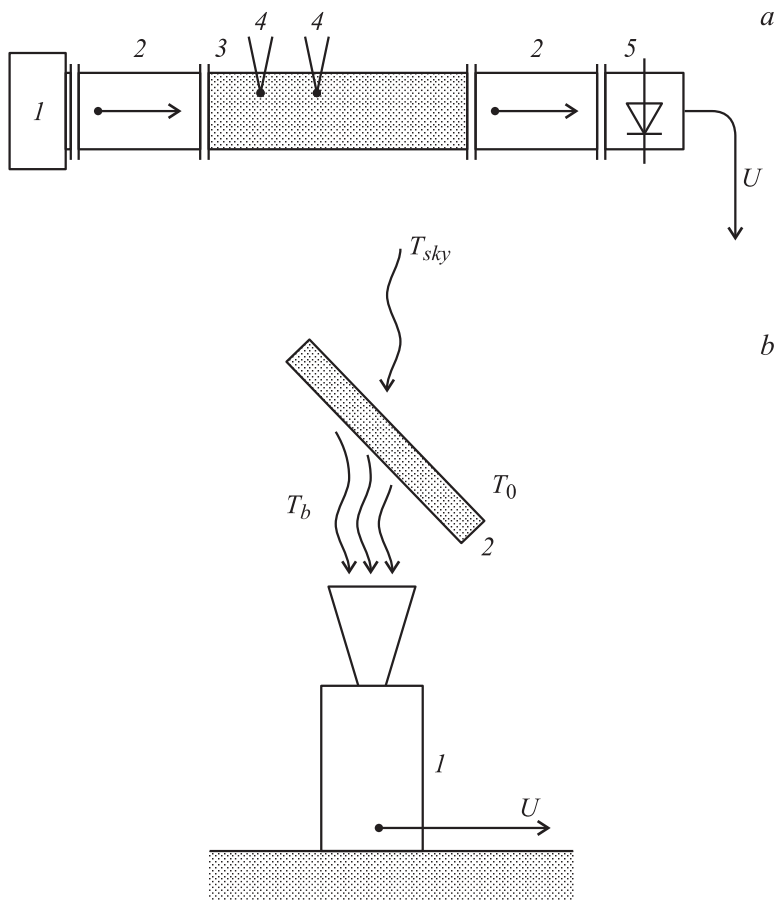
Данная особенность приводит, как можно предположить, к существенным изменениям физических свойств криогенных объектов, в частности, электромагнитных свойств в микроволновом диапазоне. Цель

данной работы — исследование электромагнитных свойств поликристаллического льда вблизи предела текучести на частотах микроволнового диапазона. Эти частоты широко используются при дистанционном зондировании и в системах связи, а также для изучения внутренней структуры ледяных образований, поэтому знание их диэлектрических свойств необходимо для решения многих практических задач.

Как выяснилось, получить течение образца льда простым его деформированием достаточно сложно. Если образец находится в открытом пространстве и к нему прикладывается сжимающее усилие, то, как правило, при достижении некоторого давления образец быстро разрушается на ряд фрагментов. Поэтому в данной работе использованы специальные методики измерений с использованием теплового расширения образцов.

В первой методике использован способ деформирования льда в замкнутом пространстве для устранения его разрушения. С этой целью образец готовили при замораживании воды в стальной трубе. Сам эксперимент заключался в пропускании СВЧ-излучения через трубу, заполненную льдом и нагреваемую от некоторой температуры до температуры его плавления. Из-за разности температурных коэффициентов линейного расширения льда ( $\alpha \approx 52 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и стальной трубы ( $\alpha \approx 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) внутри льда возникает значительное давление, достигающее предела текучести. Момент, когда это происходит, можно зарегистрировать по скачкообразному понижению температуры, из-за разрыва связей между атомами в условиях, близких к адиабатическим. Измерения температуры выполнялись замороженными в образец термодарами. Труба также служила волноводом для микроволнового излучения.

Схема установки приведена на рис. 1, а. Генератор 1 выполнен на транзисторах, его мощность составляла значение порядка 10 мВт. Измерения выполнены на частоте 5.2 GHz. Образец 3 в трубе диаметром 40 мм и длиной 300 мм изготавливали замораживанием воды в холодильнике при температуре  $-10^\circ$ . Трубу помещали в кювету с пресной водой. После замораживания образец освобождали от излишков льда и помещали в лабораторное помещение при температуре  $+20 \div 25^\circ\text{C}$ . В процессе нагревания и возникновения внутренних термических напряжений достигался предел текучести, и при температуре  $0^\circ\text{C}$  начиналось таяние льда. После появления жидкой воды эксперимент спустя короткое время прекращали.



**Рис. 1.** *a* — схема установки для измерения мощности СВЧ-излучения, проходящего через образец льда: 1 — генератор излучения; 2 — развязывающие вентили; 3 — стальная труба со льдом; 4 — термопары для измерения температуры; 5 — детектор,  $U$  — постоянное напряжение, пропорциональное мощности регистрируемого сигнала; *b* — схема установки для измерения собственного радиотеплового излучения нагреваемого блока льда: 1 — СВЧ-радиометр; 2 — образец льда в виде плоскопараллельной пластины.

Кроме непосредственного измерения проходящей мощности, т.е. затухания в среде, был использован второй способ, в котором измерялось собственное радиотепловое излучение образцов льда в виде плоских пластин. Для этой цели использован микроволновый радиометр, ориентированный антенной на холодное небо. В данной методике приемник излучения регистрирует слабое излучение неба, уменьшенное прохождением через пластину льда, и более интенсивное собственное радиотепловое излучение образца. Интенсивность собственного теплового излучения можно связать с потерями в образце и его термодинамической температурой  $T_0$ . Схема измерений приведена на рис. 1, *b*.

Мощность радиотеплового излучения обычно выражают в яркостной температуре  $T_b$ . Для однородного плоского образца без учета отражений от его границ яркостная температура равна [3]

$$T_b = T_{sky}G + T_0(1 - G),$$

где  $T_{sky}$  — яркостная температура неба,  $G$  — коэффициент передачи мощности излучения через образец, который для пассивных сред меньше единицы. Измерения выполнялись на частоте 34 GHz.

Для устранения эффекта переотражения от границ образца угол, под которым проводились измерения (угол между перпендикуляром к блоку из льда и осью рупорной антенны) выбирался равным углу Брюстера ( $61^\circ$ ) при измерениях на вертикальной поляризации. Для безоблачной атмосферы  $T_{sky} \sim 10$  К, поэтому яркостная температура образца приближенно равна  $T_0(1 - G)$  и при постоянной термодинамической температуре  $T_b$  линейно зависит от  $G$ .

При перемещении образца из холодильника в измерительную установку с температурой окружающего воздуха выше  $0^\circ\text{C}$  в нем возникают термические напряжения из-за нагрева и разности коэффициентов линейного расширения. Кроме того, по мере роста температуры возможно достижение предела текучести образца, находящегося при  $0^\circ\text{C}$ , вследствие внутренних напряжений, возникающих из-за уменьшения объема жидкости при таянии (отрицательное давление) и уменьшения значения самого предела.

При изготовлении образцов использовали дистиллированную воду. Пластины из льда приготавливали также их выпиливанием из ледяного покрова пресного водоема, содержащего малое количество солевых

включений (во льду  $\sim 2-5 \text{ mg/kg}$ ). В этом случае получали наиболее однородный образец льда.

На рис. 2, *a* приведены результаты измерений мощности излучения и температуры образца от времени после начала нагревания на частоте 5.2 GHz. На рис. 2, *b* приведены результаты измерений параметров для другого образца льда при достижении им  $0^\circ\text{C}$ . В этом случае изучалось поведение электромагнитных потерь, когда среда поглотила некоторое количество теплоты, но еще находится в твердом состоянии. Результаты измерений радиояркостной температуры на частоте 34 GHz при нагревании пластины льда представлены на рис. 3.

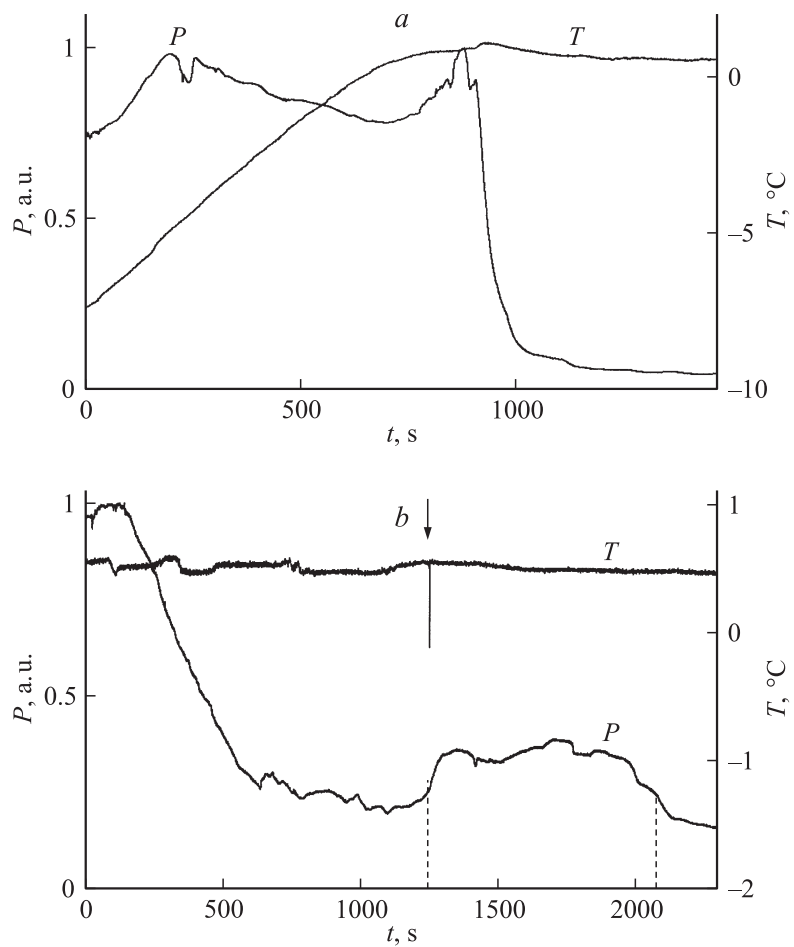
Характерной особенностью всех выполненных экспериментов является наличие „просветленных“ участков записей регистрируемой мощности излучения по мере роста температуры или при развитии таяния во времени. Начало „просветления“ на некоторых записях совпадает по времени со скачком температуры — кратковременным ее понижением. На других зависимостях скачок температуры не наблюдали. Скорее всего, это связано с тем, что течение деформируемых кристаллов охватывает не весь образец, а его отдельные области, в которых механические напряжения благоприятны для быстрых деформаций.

Из графиков рис. 2, 3 следует, что эффект наблюдается как при температурах ниже  $0^\circ\text{C}$ , так и при достижении значения, близкого к температуре фазового перехода. Всего было исследовано 18 образцов, все они с некоторыми особенностями давали результаты, близкие к представленным на рис. 2, 3.

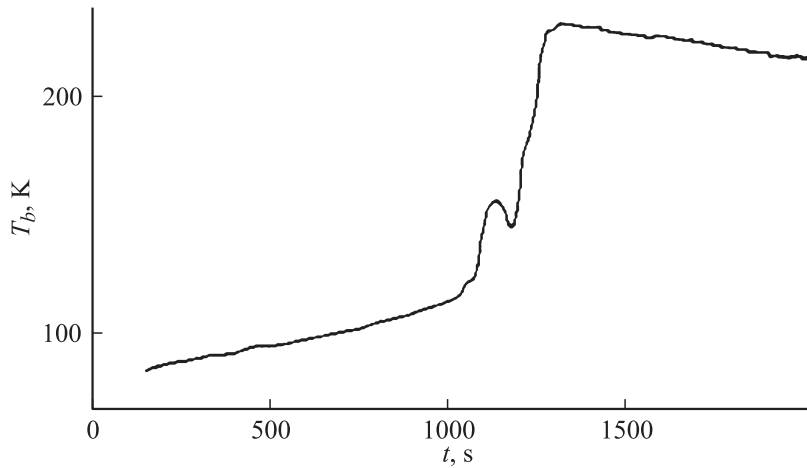
При радиометрических измерениях потери уменьшались только в тающем образце (рис. 3), т. е. вблизи  $0^\circ\text{C}$ . Оказалось также, что образцы, которые длительное время хранились или подвергались механическим воздействиям (вибрации, удары), не показывали данного эффекта.

Следует отметить, что уменьшения потерь в волноводном резонаторе, полностью заполненном льдом, наблюдались в нашем эксперименте также на частоте 3.3 GHz при нагревании резонатора до температур, близких  $0^\circ\text{C}$ .

Таким образом, выполненные эксперименты указывают на „просветление“ образца при достижении его текучести. Наступление текучести удавалось регистрировать по кратковременному уменьшению температуры льда. Уменьшение температуры возникает из-за разрушения структуры и поглощения тепла при разрыве водородных связей



**Рис. 2.** *a* — зависимость проходящей мощности  $P$  (в отн. ед.) и температуры образца  $T$  от времени; *b* — зависимости от времени проходящей через образец мощности излучения и температуры после достижения  $0^\circ\text{C}$ ; стрелкой отмечен момент резкого понижения температуры и начало „просветления“ образца.



**Рис. 3.** Зависимость радиояростной температуры тающего блока льда при измерениях на просвет на частоте 34 GHz. Толщина блока 5 см.

в некотором объеме льда (т.е. переходе в квазижидкое состояние, при котором водородные связи разорваны только между базисными плоскостями кристаллов). После разгрузки механического напряжения лед снова переходит в твердое состояние и его микроволновые свойства восстанавливаются. Этот эффект, в определенной степени, проявляется и для образца, не ограниченного внешними оболочками или другими телами. Его „просветление“ наблюдается при  $0^{\circ}\text{C}$ , когда предел текучести падает до минимального значения и возникает значительное отрицательное давление при начале плавления льда.

Уменьшение электромагнитных потерь по мере нагревания льда и особенно при появлении первых признаков таяния является аномалией. Согласно работам [4–6], при приближении к  $0^{\circ}\text{C}$  фактор потерь пресного льда возрастает. Таяние приводит к резкому возрастанию фактора потерь из-за его весьма значительной величины у жидкой воды. Согласно [5], появление жидкости с объемной концентрацией 0.001% увеличивает значение потерь приблизительно в два раза в сантиметровом диапазоне. В чем же состоит возможная причина уменьшения микроволновых потерь льда?

В работах [7,8] рассмотрено возникновение активных сред, которые могут создавать короткие импульсы излучения (сверхизлучение Дикке). Излучение может также стимулироваться внешним источником. Инверсность в среде может возникать и в случае фазового перехода первого рода с выделением энергии [9].

В наших экспериментах, возможно, наблюдалось состояние среды, когда возникали условия, близкие к возникновению фазово-переходного излучения, однако само излучение не возникало, а инверсность среды проявлялась в некотором усилении внешнего (или собственного теплового) излучения. Первоначально в среде вследствие текучести льда из-за скольжения вдоль базисных плоскостей возникали разорванные связи. После завершения активной фазы текучести образца система возвращалась в исходное состояние, при котором избыточная энергия (свободных связей между молекулами) терялась в виде когерентного излучения, инициированного внешним источником.

Аналогичные эффекты ранее наблюдали и другие исследователи, однако они не давали их интерпретацию, а только констатировали необычные свойства. Например, в работе [10] при измерениях погонных потерь в блоках пресного льда на длине волны 8.2 mm по непонятным для авторов причинам значение потерь для различных образцов изменялось от 0 до 13 dB/m. Если верхнее значение погонных потерь еще как-то можно объяснить неоднородностью образцов, то нулевые потери во льду на длине один метр представляются необъяснимыми. Для химически чистого льда на длине волны 8.2 mm погонное затухание, вычисленное из значения фактора потерь [6], приблизительно равно 2 dB/m. С точки зрения предложенного описания отсутствие потерь в образцах льда [10] находит качественное объяснение.

Обнаруженный эффект можно использовать для целей микроволновой диагностики состояния ледяных тел при возникновении в них текучести.

## Список литературы

- [1] *Hobbs P.V.* Ice Physics. Oxford: Clarendon Press, 1974. 810 p.
- [2] *Petrenko V., Whitworth R.W.* Physics of Ice. Oxford Univ. Press., 2002. 347 p.
- [3] *Краус Д.Д.* Радиоастрономия. М.: Сов. радио. 1973. 456 с.
- [4] *Warren S.C.* // Appl. Optics. 1984. V. 23. N 8. P. 1206–1225.



- [5] *Matzler C., Wegmuller U.* // J. Phys. D: Appl. Phys. (UK). 1987. P. 1623–1630.
- [6] *Бордонский Г.С.* // Радиотехника и электроника. 1995. № 11. С. 1620–1622.
- [7] *Андреев А.В., Емельянов В.И., Ильинский Ю.А.* // УФН. 1980. Т. 131. В. 4. С. 654–694.
- [8] *Железняков В.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В.* // УФН. 1989. Т. 159. В. 2. С. 193–260.
- [9] *Tatarchenko V.A.* Infrared laser based on the principle of melt crystallization or vapor condensation. Why not? Optics and laser technology. 2009. doi:10.1016/j.optlastec.2009.04.001.
- [10] *Глушнев В.Г., Слуцкер Б.Д., Финкельштейн М.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т XIX. № 9. 1305–1307.