

02;05.3

Усиление микроволнового излучения во льду при фазовом переходе, вызванном давлением

© Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, А.О. Орлов, С.В. Цыренжапов

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

Поступило в Редакцию 4 июня 2012 г.

Приведены результаты измерений распространения микроволнового излучения на частотах 13.7 и 34 GHz через область микровзрыва в пресном льду. Наблюдали усиление мощности проходящего сигнала на частоте 13.7 GHz приблизительно на 1 dB/m в течение 1 ms. Предполагается, что эффект связан с образованием квазжидких пленок и их последующим замерзанием.

В работах [1–4] рассматривался вопрос о возникновении нетепловых излучений при фазовом переходе жидкости в твердое состояние. Однако в настоящее время имеется еще недостаточное число экспериментальных данных для понимания такого процесса. Например, неясно, какая доля энергии и в какого вида процессах она может перейти в монохроматическое или широкополосное нетепловое излучение.

Как нам представляется, возникновение нетепловых излучений при фазовых переходах возможно, если имеется предварительно структурированная система, обладающая меньшей энтропией в высокоэнергетическом состоянии по сравнению с неструктурированным объемом жидкости. Для случая воды примером структурированного объекта являются жидкокапельные облака или пористые увлажненные тела с упорядоченной системой пор. Особым случаем таких систем является кристалл льда, подверженный течению (пластической деформации) при скольжении его частей по базисным плоскостям. Кристалл в этом случае напоминает „сэндвич“ с чередующимися слоями, разделенными „квазжидкими“ прослойками. „Квазжидкий“ слой, имеющий лишь частично разорванные в кристалле связи, имеет более низкую удельную энтропию по сравнению со случаем тонкого слоя со структурой объемной воды. При прекращении процесса деформации разорванные

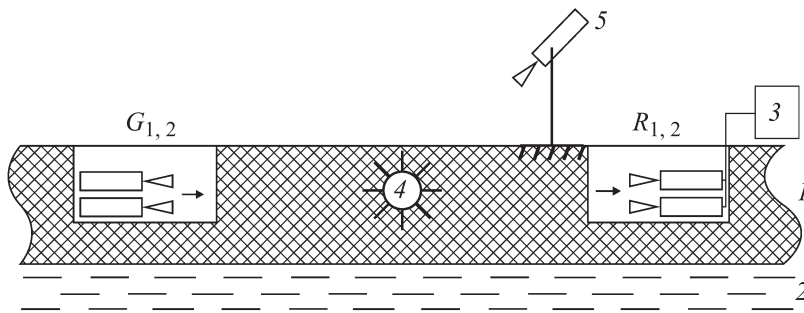


Рис. 1. Схема измерительной установки.

в кристалле связи восстанавливаются с выделением энергии в окружающую среду. Представленный процесс может возникать в связи с меньшими значениями сдвиговых напряжений вдоль базисных плоскостей кристаллов льда [5].

В данной работе выполнено экспериментальное исследование по обнаружению неравновесного состояния ледяной структуры, подвергающейся течению при резком увеличении в ней давления. Рост давления в среде и создание процесса пластической деформации осуществляли при помощи взрывов небольших пороховых зарядов. Из-за возможного широкого спектра такого излучения и небольшой его спектральной плотности мощности регистрация эффекта может быть затруднена, поэтому для поиска возникновения активности среды через нее пропускали внешнее монохроматическое микроволновое излучение. Ожидали рост проходящего излучения, связанный с проявлением механизма сверхизлучения Дикке [6], для которого переизлучение элементами среды фазируется внешним сигналом.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. При измерениях использован ледяной покров 1 ультрапресного озера 2, для которого концентрация соли $\sim 1 \text{ mg/kg}$ во льду соответствовала дважды дистиллированной воде. В ледяной покров 2 на глубину 40 см помещали два маломощных генератора G_1 и G_2 на частоты 13.7 и 34 GHz, а также два широкополосных супергетеродинных приемника R_1 и R_2 с полосой пропускания 1.2 и 4 GHz соответственно. Выходной высокочастотный сигнал после детектирования усиливался усилителем

постоянного тока и записывался системой регистрации 3, состоящей из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и ноутбука. В экспериментах использовали АЦП с частотой опроса 800 Hz. В области 4 ледяного покрова помещали пороховой заряд массой 5–8 g, который устанавливали в пробуренную лунку, заливаемую водой с последующей выдержкой в течение двух суток. Пороховой заряд помещали в небольшую герметичную пластиковую капсулу с размерами ~ 3 см, его подрыв осуществляли нагревом электрическим током высокоомного провода. Усилитель постоянного тока имел полосу пропускания не менее 20 kHz, что позволяло вместе с используемым АЦП регистрировать импульсы излучения длительностью порядка 1 ms. Расстояние между генератором и приемником выбирали равным 5 m. При исследованиях также выполняли измерения радиояркостной температуры с помощью радиометра 5 трехсантиметрового диапазона с постоянной времени 0.01 s и флуктуационным порогом чувствительности ~ 0.1 К. Радиометр использовали для регистрации жидкой воды, которая могла образоваться (или проникнуть по трещинам) в изучаемой области.

Особенность структуры озерного льда при его формировании в отсутствие последних течений — определенная ориентация главной оптической оси кристаллов (С-оси), которая с глубин льда ~ 20 см направлена преимущественно вертикально. Известно, что кристаллы льда подвержены течению (пластическая деформация) вдоль базисных плоскостей, которые перпендикулярны главной оптической оси. Кроме того, при значительном нагружении льда проявляется взрывная неустойчивость льда [7]. Поэтому в области взрыва можно ожидать появления не жидкости в чистом виде, а мелких фрагментов льдинок с прослойками воды в горизонтальной плоскости. Такая структура будет иметь меньшую энтропию (из-за некоторой упорядоченности), чем такого же объема однородная жидкая вода, поэтому при замерзании образовавшейся пленочной воды можно ожидать выделения энергии с низкой энтропией, т.е. усиления внешнего монохроматического излучения. Измерения проводили для волн на горизонтальной поляризации (вектор электрического поля параллелен границе раздела сред). Если среда течет при давлениях, значительно превышающих предел текучести (составляющей значение порядка десятков бар [5]), то можно ожидать, что прослойки имеют минимальную толщину, поскольку деформируется весь объем, а плоскости скольжения имеют вид „квазжидких слоев“. При этом электрический вектор внешнего

излучения будет максимальным образом взаимодействовать с плоским „квазизидким“ слоем.

В работе [8] аналогичным образом изучали распространение звуковой волны через область взрыва во льду. Использовался пороховой заряд массой в несколько граммов. Оцененное давление в сфере, равной 10 диаметрам заряда, составляло 340 bar. Если фронт давления распространяется со скоростью звука, то за время 0.1 ms наблюдаемая область достигнет размеров ~ 0.3 м. При температуре льда $-2^\circ\text{C} \div -3^\circ\text{C}$ (что имело место при эксперименте) это давление приведет к кратковременному таянию льда, без поглощения тепловой энергии, что будет длиться ~ 0.1 ms, и далее будет наблюдаться обратный процесс — фазовый переход жидкой воды в лед. Поскольку на разрыв водородных связей будет затрачена механическая энергия, то при замерзании она может выделиться как в виде тепла, так и частично через когерентное электромагнитное излучение, которое можно наблюдать по усилению внешнего излучения, проходящего через область замерзающей воды.

Результаты экспериментов для частоты 13.7 GHz приведены на рис. 2. Как следует из полученных данных, за время порядка 1 ms наблюдается поглощение сигнала, далее, за время ~ 50 ms наблюдали усиление проходящего сигнала на $\sim 30\%$. Через 0.2 s поглощение сигнала стало выше, чем исходное на 15%. Результаты, представленные на рис. 2, объясняются следующим образом. В начальной стадии взрыва образуется некоторое количество воды в соответствии с фазовой диаграммой „давление–температура“. Это приводит к росту поглощения излучения (на временном интервале ~ 1 ms). Образовавшиеся пленки воды при падении давления замерзают с выделением энергии, что наблюдается на интервале времени ~ 50 ms. Последующий незначительный рост затухания можно объяснить возможным просачиванием воды по трещинам из нижнего слоя.

Предложенное объяснение подтверждается данными микроволновых радиометрических измерений (рис. 3). В этом случае измерения проводили при постоянной времени 10 ms, что соответствовало полосе пропускания выходной низкочастотной части прибора 25 Hz. Понижение радиояркостной температуры (T_b) в начальный момент на 1 K соответствовало существованию относительно высокой концентрации жидкой воды. Последующий рост T_b на 7 K связан с замерзанием жидкой воды. Расчеты T_b , выполненные по методике, представленной в работе [9], дают значение концентрации жидкой воды $\sim 70\%$ в

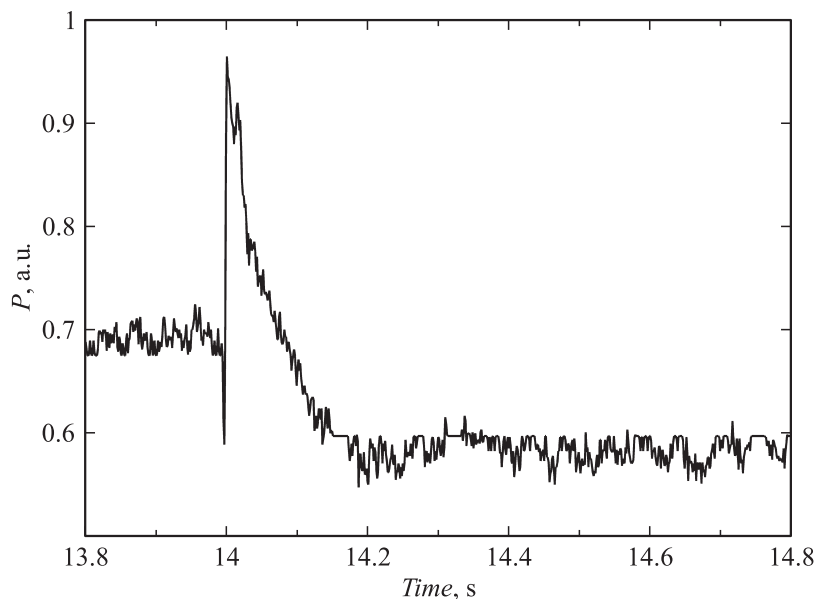


Рис. 2. Регистрируемая мощность излучения на частоте 13.7 GHz в зависимости от времени при инициировании взрыва во льду.

начальной стадии развития взрыва (когда яркостная температура понизилась) и $\sim 0.005\%$ в стадии замерзания образовавшихся жидких пленок. При расчетах использовали модель структуры ледяного покрова с жидкими включениями при толщине слоя 20 см, расположенного на глубинах от 30 до 50 см и общей толщине льда 120 см. Микроволновые параметры льда взяты из работы [10].

Всего было выполнено 4 эксперимента, в двух из них наблюдали усиление сигнала на частоте 13.7 GHz. В одном эксперименте оно составило 1.3 dB, в другом — 0.5 dB. Усиление на частоте 34 GHz не наблюдали. Возможное объяснение этому различию следующее. При возникновении течения среды по пленкам в базисных плоскостях возникновение усиления можно связать с отрицательным дифференциальным электрическим сопротивлением. Токи, наводимые внешним полем падающей волны, зависят от импеданса пленки, реактивная

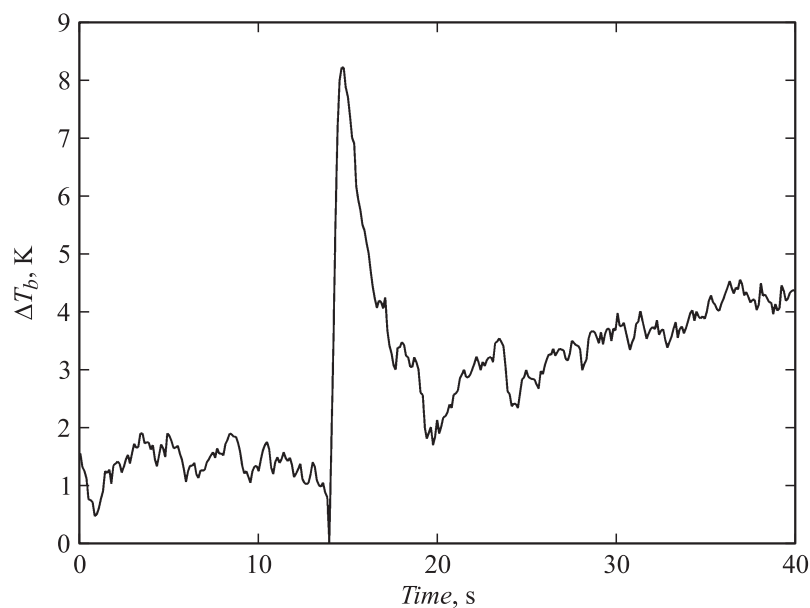


Рис. 3. Результаты измерений радиояркостной температуры в трехсантиметровом диапазоне, соответствующих экспериментальным данным (рис. 2). Угол наблюдения 45° при вертикальной поляризации.

составляющая которого растет с частотой. Это приводит к уменьшению тока и, следовательно, интенсивности переизлученных волн. По-видимому, эффект усиления будет возрастать для более длинных волн или иметь резонансный характер в зависимости от структуры пленок. Этот вопрос требует дальнейшего исследования. Отсутствие эффекта в двух экспериментах на частоте 13.7 GHz может объясняться неточной установкой приборов по отношению к области взрыва.

Таким образом, в системе, где имеет место фазовый переход жидкой структурированной (пленочной) воды в твердое состояние, наблюдается усиление проходящего электромагнитного излучения. В среде из пресного поликристаллического льда при кратковременном резком повышении давления, превышающем пределы текучести в области с размерами около одного метра, усиление проходящего излучения

на частоте 13.7 GHz составило приблизительно 1 dB/m. Полученный результат может представить интерес для радиозондирования больших масс льда. Например, вблизи донной части ледяного щита Антарктиды в районе оз. Восток давление достигает 300 bar.

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

Список литературы

- [1] *Perelman M.E., Tatartchenko V.A.* // Phys. Rev. Lett. A. 2008. V. 372. N 14. P. 2480–2483.
- [2] *Tatartchenko V.A.* // Opt. & Laser Technol. 2009. V. 41. N 8. P. 949–952.
- [3] *Татарченко В.А.* // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 33. № 3. С. 169–175.
- [4] *Бордонский Г.С.* // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 91–93.
- [5] *Petrenko V.M., Whitworth R.W.* Physics of Ice. Oxford Univ. Press, 2002. 347 p.
- [6] *Меньшиков Л.И.* // УФН. 1999. Т. 169. В. 2. С. 133–154.
- [7] *Фатеев Е.Г.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 7. С. 46–52.
- [8] *Фомин В.А.* Действие взрывов во льду, сопровождающееся таянием льда в волне сжатия: Автореф. дис. . . . канд. физ-мат. наук. М.: МФТИ, 1985. 23 с.
- [9] *Клепиков И.Н., Шарков Е.А.* // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3–15.
- [10] *Бордонский Г.С.* // Радиотехника и электроника. 1995. № 11. С. 1620–1522.