

Изучение механизма образования добавочных электромагнитных волн в ледяных структурах и возможные задачи дистанционного зондирования

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

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

С целью исследования механизма образования некогерентных добавочных электромагнитных волн выполнены эксперименты по изучению распространения микроволнового излучения через область льда, подвергаемого импульсному давлению порядка 100 бар. Обнаружено усиление проходящего излучения на значение около 1 дБ/м. Эксперименты подтвердили возможность появления вторичных некогерентных источников в поле первичной волны, если в среде возникает течение (пластическая деформация). Рассмотрены возможные задачи дистанционного зондирования, где могут проявиться некогерентные добавочные электромагнитные волны.

Ключевые слова: микроволновое излучение, пресный лед, некогерентные добавочные волны, течение льда.

Введение

В работах (Бордонский и др., 2012, 2011а) представлены данные о существовании в пресных ледяных покровах двух типов добавочных электромагнитных волн: когерентных и некогерентных. Первые возникают при распространении излучения в плоскостойкой среде параллельно границам раздела. Некогерентные волны, как было показано в (Бордонский и др., 2011а), возникают при динамических процессах, связанных с деформациями и течением среды. Эти волны могут возникать не только в плоскостойких средах, но и в любых ледяных структурах. Они особенно заметны в случае, если среда состоит из кристаллов, имеющих пространственно-упорядоченные главные оптические оси. Как известно, течение облегчено вдоль базисных плоскостей кристаллов, что приводит к анизотропии электромагнитных свойств ледяных структур, подвергающихся деформациям. Внешние излучения, рассеиваясь на отдельных деформируемых кристаллах, создают некогерентное поле, которое нельзя описать с использованием параметров Стокса. Это, как предполагается, связано с усилением сигнала источника множественными областями. Течение среды может возникать, если значение механических напряжений превышает некоторый предел (предел текучести). Тогда деформация кристаллов растет и может продолжаться при меньшем значении напряжения, т.е. в среде проявляется отрицательная вязкость (Petrenko, Whitworth, 2002). Предполагается, что при этом возникает отрицательное сопротивление для микроволновых токов. Данные качественные представления о возникновении добавочных волн позволяют объяснить многие аномалии при распространении поляризованного излучения в пресных ледяных покровах (Бордонский, 2012; Бордонский и др., 2011б).

Вместе с тем детали механизма образования добавочных некогерентных волн практически еще не изучены, поэтому целью настоящей работы было дальнейшее исследование

механизма образования добавочных электромагнитных волн и причин роста интенсивности распространяющегося в ледяных структурах излучения. Для этой цели была использована специальная методика измерений, при которой в среде создавалось импульсное давление порядка 100 бар с применением пороховых зарядов небольшой массы, что приводило к ее течению, так как предел текучести пресного льда имеет значение порядка десяти бар. Через область высокого давления пропускали электромагнитные волны от излучателей с круговой поляризацией. Их интенсивность регистрировали быстродействующими приемниками и анализировали изменение интенсивности излучения, прошедшего через область повышенного давления.

Методика измерений

При измерениях в качестве исследуемой среды выбрали ледяной покров ультрапресного озера, для которого концентрация соли во льду составляла значение порядка 1 мг/кг. Такая среда обладает высокой механической прочностью и удобна для проведения экспериментов. В работе (Фомин, 1985) было оценено давление, возникающее при взрыве порохового заряда массой в несколько граммов, замороженного в блок пресного льда. Его значение составляет более 300 бар в сфере ~ 10 диаметров заряда.

Схема измерительной установки для проведения экспериментов приведена на *рис. 1*.

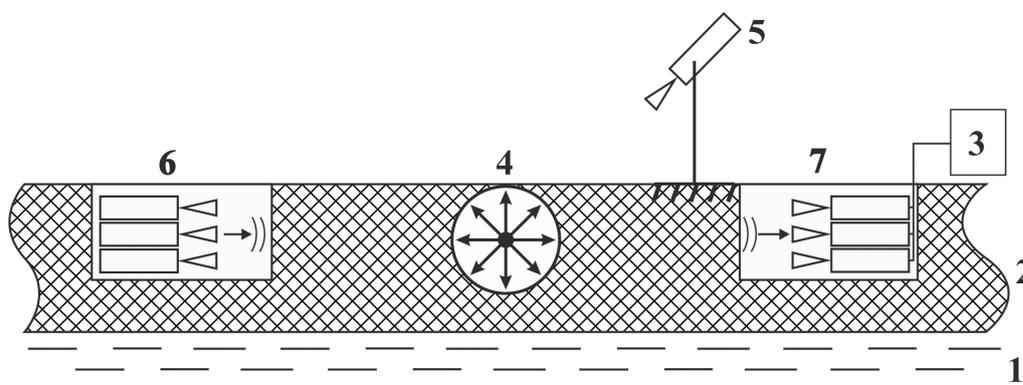


Рис. 1. Схема установки. 1 – водная среда, 2 – ледяной покров, 3 – система регистрации данных, 4 – область взрыва небольшого порохового заряда, 5 – микроволновый модуляционный радиометр трехсантиметрового диапазона, 6 – генераторы на частоты 10÷34 ГГц, 7 – компенсационные радиометры

В ледяной покров (2) на глубину до 40 см помещали маломощные генераторы (6) на частоты 10, 13,7 и 34 ГГц. Излучение, создаваемое рупорными антеннами, направляли на радиометры компенсационного типа (7) через область (4), где для моделирования текучести (пластической деформации) инициировали взрывы небольших пороховых зарядов с массой 5–8 г. Предполагали, что если среда проявляет активность, создаваемую механическими воздействиями с фазовыми превращениями в ней, то во время взрыва и некоторое время после него должен наблюдаться рост мощности регистрируемого приемниками излучения.

Расстояние между генераторами и радиометрами выбирали равным 5 м. При регистрации выходных сигналов приемников использовали аналого-цифровой преобразователь со временем опроса около 0,1 мс. Этого времени достаточно для регистрации как воздействия ударной волны в исследуемой области, так и последующих релаксационных процессов в среде.

При исследованиях выполняли также измерения радиояркостной температуры с помощью модуляционного радиометра (5) трехсантиметрового диапазона с флуктуационным порогом чувствительности $\sim 0,1$ К при постоянной времени 10 мс для получения дополнительной информации о состоянии льда после импульса давления в нем.

Результаты измерений

Всего в 2012–2013 гг. выполнено 10 сеансов измерений с различными наборами приборов. Измерения проводили при температуре льда в области взрыва от -2°C до -15°C . Результаты одного из измерений для частоты 13,7 ГГц приведены на *рис. 2*.

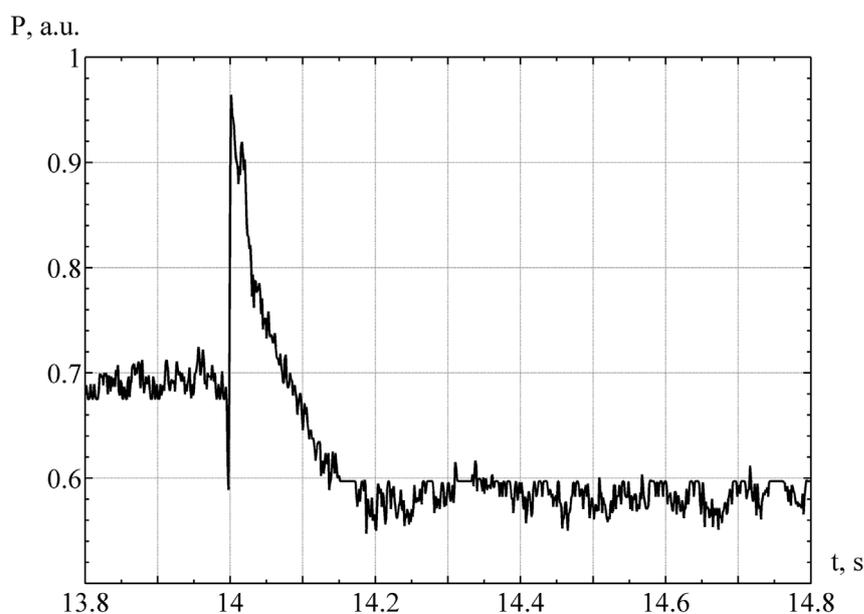


Рис. 2. Регистрируемая мощность излучения на частоте 13,7 ГГц от времени в относительных единицах при инициировании взрыва во льду

Были обнаружены характерные выбросы выходного сигнала приемников излучения. Как следует из полученных данных, за время порядка 1 мс наблюдалось поглощение излучения. Далее за время в несколько десятков мс наблюдали усиление интенсивности проходящего сигнала на значение $\sim 30\%$. Через 0,2 с поглощение сигнала стало выше по сравнению с исходным на 15%. Некоторый рост затухания после взрыва можно объяснить разрушением льда и возрастанием потерь из-за рассеяния на неоднородностях. В других экспериментах время, когда сигнал возрастал, составляло значение порядка 1 мс.

Кроме того, выполнены три измерения для соленого льда содового озера с концентрацией соли 3 г/кг на частотах 10 и 13,7 ГГц. При температуре льда -10°C эффект

отсутствовал. С использованием жидкого азота был охлажден участок льда с зарядом до -53°C . Для этого случая, когда вымерзают все жидкие включения, также наблюдали усиление излучения, которое достигло 2 дБ на 10 ГГц (при расстоянии между приемником и излучателем около 1 м).

Обнаруженные особенности на других частотах следующие. На частоте 10 ГГц использовали компенсационный приемник на две ортогональные линейные поляризации: ГП и ВП. При этом наблюдали разницу в изменении интенсивности: на одной (ВП) наблюдалось превышение начального уровня излучения в момент взрыва, а на другой (ГП) эффект отсутствовал. На частоте 34 ГГц приращение интенсивности в некоторых экспериментах отсутствовало. Возможно, что в некоторых случаях не удавалось точно расположить приборы на линии, проходящей через центр взрыва. Другое предположение – частотная селективность эффекта роста интенсивности, определяемая свойствами льда.

Выполнены также проверочные измерения при ориентации антенн приемников в небо, т.е. область, свободную ото льда. В этом эксперименте проверяли возможность возникновения ложных сигналов, определяемых импульсами низкочастотных излучений, создающими наводки на низкочастотные узлы радиометров на частотах от единиц герц до десятков мегагерц (Гордеев и др., 1994). Как оказалось, такие наводки в наших экспериментах отсутствовали.

Обсуждение результатов

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 мс). Образовавшиеся прослойки воды при последующем падении давления замерзают с усилением микроволновой энергии, что наблюдается в интервале времени ~ 10 мс. Дальнейший незначительный рост затухания по прошествии 0,1 с по сравнению с первоначальным уровнем можно объяснить просачиванием воды по трещинам из нижнего слоя.

Предложенное объяснение подтверждается данными микроволновых радиометрических измерений (*рис. 3*).

Понижение радиояркостной температуры T_b в начальный момент времени на 1 К на интервале ~ 10 мс соответствовало существованию относительно высокой концентрации жидкости. Ее оценка была выполнена по методике расчетов, представленной в (Клепиков, Шарков, 1992), и получено значение концентрации жидкой воды $\sim 70\%$ в начальной стадии развития взрыва, а также $\sim 0,005\%$ в стадии замерзания, когда T_b выросла на 7 К по отношению к первоначальному уровню. 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 вычислены по формулам из работы (Бордонский, 1995).

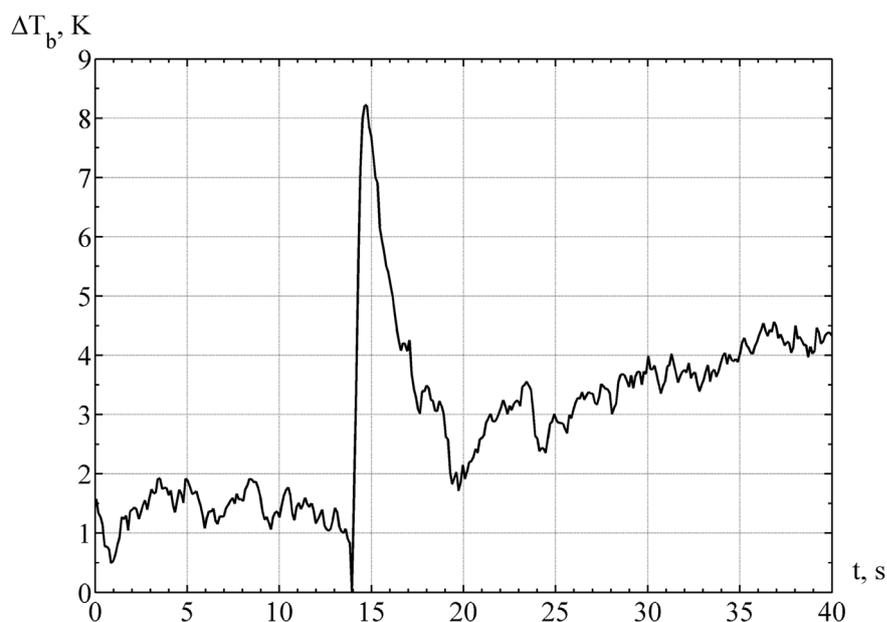


Рис. 3. Результаты измерений радиояркостной температуры в трехсантиметровом диапазоне, соответствующих экспериментальным данным (рис. 2). Угол наблюдения 45° на вертикальной поляризации

В различных выполненных экспериментах в конфигурации *рис. 1* усиление сигнала на частотах 10 и 13,7 ГГц составляло значение от 0,5 дБ до 1,3 дБ. На частоте 34 ГГц усиление наблюдали не во всех экспериментах. Возможное объяснение этому различию следующее. При возникновении течения среды по плёнкам в базисных плоскостях кристаллов льда усиление электромагнитных волн можно связать с отрицательным дифференциальным электрическим сопротивлением. Токи, наводимые внешним полем падающей волны, зависят от импеданса пленки, реактивная составляющая которого растёт с частотой. Это приводит к уменьшению тока в активной структуре и, следовательно, интенсивности переизлученных волн. По-видимому, эффект усиления будет иметь резонансный характер в зависимости от размера кристаллов и структуры плёнок. В наших исследованиях эффект был более выражен в сантиметровом диапазоне, длины волн которого по порядку величины близки к размерам кристаллов льда в исследуемой среде.

Некогерентные добавочные волны могут использоваться в дистанционном зондировании. Они, по результатам исследований, заметны в крупных ледяных телах, когда их размеры значительно превосходят длину волны излучения. Таким объектом могут являться ледники, особенно в нижней части вблизи ложа, где возникают значительные механические напряжения. Например, в (Matsuoka et al., 2003) наблюдали существенную разницу рассеянного излучения от внутренних слоев ледников Антарктиды при зондировании движущегося ледника на двух ортогональных линейных поляризациях в УКВ диапазоне. Разница принимаемых сигналов достигала 10 дБ; причем максимальная интенсивность наблюдалась для поляризации, для которой направления вектора электрического поля и движения ледника были перпендикулярны. Авторы (Matsuoka et al., 2003) не объясняли данную особенность, но отмечали, что оптические оси кристаллов льда были ориентированы вдоль

направления движения. По нашему мнению здесь наблюдалось появление некогерентных добавочных волн при их генерации в базисных плоскостях кристаллов льда при их течении.

Добавочные электромагнитные волны могут возникать в ледяных телах при любых механических движениях, например при сейсмической активности, сходах лавин, гравитационных воздействиях (например, приливных сил, они особенно велики для холодных спутников Сатурна), а также при резких изменениях температуры.

Интересно отметить, что в работе (Фомин, 1985) наблюдали добавочные волны при акустических измерениях (две волны с разными скоростями при одной поляризации) областей взрыва в пресном поликристаллическом льду. Оценка давления в среде в экспериментах давала значение 340 бар при размере области в 10 диаметров заряда. В природных условиях это давление достигается у ложа ледяного щита Антарктиды.

Можно предположить, что ледяная среда сама может создавать шумовое излучение повышенной интенсивности в микроволновом диапазоне при достижении напряжений, превышающих предел текучести, особенно при ее разрушении. Такие эффекты исследовались в мегагерцовом диапазоне (Гордеев и др., 1994; Shibkov et al., 2002). Известно, что при хрупком разрушении диэлектриков наблюдается электромагнитная эмиссия из-за электризации трещин с последующей релаксацией зарядов. Такое излучение слабое, как показывают эксперименты, и спадает с ростом частоты. Однако в случае льда, если при разрушении кристаллов эмиссия будет сопровождаться усилением электромагнитного поля, то разрушающиеся структуры могут быть источниками шумов в микроволновом диапазоне. Возможно, такой эффект наблюдали при спутниковых микроволновых радиометрических измерениях вблизи границ Антарктиды (Смирнов, Халдин, 2012). Он может быть учтен как для выбора времени спутниковых радиометрических измерений ледников (когда отсутствуют подвижки объекта), так и для регистрации их движений.

Выводы

Выполненные эксперименты по созданию импульсного давления в небольших объемах пресного льда, достигающего значений порядка 100 бар и превышающего предел текучести льда, показывают рост интенсивности проходящего излучения в сантиметровом диапазоне, составляющий приблизительно 1 дБ/м.

Механизм усиления излучения связывается с рассеянием излучения на неоднородностях в виде квазижидких пленок, возникающих в базисных плоскостях кристаллов льда, когда проявляется отрицательная дифференциальная вязкость (кристаллы начинают течь) и появляется отрицательное сопротивление. Длины волн, на которых достаточно эффективно возрастает интенсивность излучения, должны быть сопоставимы с размерами кристаллов льда в базисных плоскостях. Для различных природных объектов этот размер составляет от 0,1 мм (снежинки) до 1 м (кристаллы в донных слоях льдов Антарктиды).

Необходимо продолжить изучение природы некогерентных добавочных волн. В (Бордонский и др., 2011а) высказывалось предположение об особой квантовой природе

эффекта и свойствах излучения («неклассическое» излучение (Быков, 2006)). Для проверки такого предположения требуются специальные эксперименты. Кроме того, интерес представляют акустические измерения во льду при импульсных давлениях для подтверждения наблюдения работы (Фомин, 1985) о появлении двух звуковых волн с разными скоростями на одной поляризации.

Таким образом, учет некогерентных добавочных электромагнитных волн может быть основой новых методик как радарных, так и радиометрических измерений мёрзлых структур в атмосфере и приповерхностных слоях при их пластической деформации и разрушении под действием сил любой природы (сейсмических, гравитационных, теплового расширения и сжатия), а также вблизи температуры фазового перехода.

Литература

1. *Бордонский Г.С.* Диэлектрические потери пресного льда на СВЧ // Радиотехника и электроника. 1995. № 11. С. 1620–1622.
2. *Бордонский Г. С.* Возможность наблюдения механических напряжений в ледяных покровах радиолокационным методом // Ученые записки ЗабГГПУ. Серия физика, математика, техника, технология. 2012. № 3 (44). С. 13–17.
3. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В.* Поляризационные аномалии микроволнового излучения и добавочные электромагнитные волны в деформируемых ледяных покровах // Журнал технической физики. 2011а. Т. 81. № 9. С. 93–99.
4. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В.* Добавочные электромагнитные волны в ледяных покровах // Лед и снег. 2011б. № 4. С. 71–79.
5. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В.* Многочастотные микроволновые измерения распространения поляризованного излучения внутри ледяного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 275–280.
6. *Быков В.П.* Лазерная электродинамика. Элементарные и когерентные процессы при взаимодействии лазерного излучения с веществом. М.: Физматлит. 2006. 384 с.
7. *Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., Фурса Т.В., Биллер В.К., Елисеев В.П.* Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом нагружении // Журнал технической физики. 1994. Т. 64. Вып. 4. С. 57–67.
8. *Клепиков И.Н., Шарков Е.А.* Теоретическое исследование собственного излучения резконеоднородных неизотермических сред // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3–15.
9. *Смирнов М.Т., Халдин А.А.* Предварительные результаты экспериментов с СВЧ радиометрическим комплексом L-диапазона на РС МКС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 160–166.
10. *Фомин В.А.* Действие взрывов во льду, сопровождающееся таянием льда в волне сжатия: Автореферат дисс. ... канд. физико-математических наук. М.: МФТИ. 1985. 23 с.

11. *Matsouka K., Furukawa T., Fujita S., Maeno H. et al.* Crystal orientation fabrics within Antarctic ice sheet revealed by a multipolarization plane and dual-frequency radar survey // *J. of Geophysical Research*. 2003. V. 108. No. B10. P. 2499–2524.
12. *Petrenko V.M., Whitworth R.W.* *Physics of ice*. Oxford Univ. Press. 2002. 347 p.
13. *Shibkov A.A., Golovin Yu.I., Zheltoov M.A., et al.* In situ monitoring of growth of ice from supercooled water by a new electromagnetic method // *Journal of Crystal Growth*. 2002. V. 236. No. 1–3. P. 434–440.

Study of the mechanism of additional electromagnetic waves generation in ice structures and the possible tasks of remote sensing

G.S. Bordonskiy, A.A. Gurulev, A.O. Orlov, S.V. Tsyrenzhapov

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia
E-mail: lgc255@mail.ru*

The experiments for studying a mechanism of generation of non-coherent additional electromagnetic waves in ice under pulse of pressure in order 100 bar and microwaves propagated from this area were carried out. The gain of propagated radiation at 1 dB/m was founded. The experiments confirmed the possibility of the appearance of non-coherent secondary waves in field of primary wave, if the medium is under flowing (plastic deformation). The possible tasks of remote sensing where may exist non-coherent additional electromagnetic waves were considered.

Keywords: microwave radiation, freshwater ice, non-coherent additional waves, ice flowing.