НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 24–30 http://www.izdatgeo.ru

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 537.874

ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ ПРЕСНЫХ ЛЕДЯНЫХ ПОКРОВОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Г.С. Бордонский

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
672014, Чита, ул. Недорезова, 16а, Россия; lgc255@mail.ru*

Приведены результаты радиозондирования пресных ледяных покровов. Обнаружена чувствительность электромагнитных свойств льда к механическим напряжениям. Предполагается, что во льду при его течении возникают добавочные некогерентные волны, которые вызывают некоторое усиление интенсивности рассеянных и проходящих волн. Это предположение подтверждено экспериментально при создании в ледяном теле импульсного давления ~300 бар. Показано, что электромагнитные свойства льда необходимо изучать не только для статических случаев, но и с учетом динамических явлений, возникающих в процессе пластической деформации.

Пресный лед, течение льда, некогерентные добавочные волны, микроволновое излучение

MICROWAVE PROPERTIES OF FRESHWATER ICE COVERS UNDER PLASTIC DEFORMATION

G.S. Bordonskiy

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS,
672014, Chita, Nedorezova str., 16a, Russia; lgc255@mail.ru*

The results of freshwater ice cover radio sounding have been presented. The sensitivity of ice electromagnetic properties to mechanical stress has been established. Non-coherent additional electromagnetic waves are supposed to occur in ice during its flow, which somewhat increase the intensity of scattering and propagating waves. This assumption has been confirmed in the experiment with the impulse pressure (~300 bar) in ice body. It has been demonstrated that it is necessary to examine the electromagnetic properties of ice not only for static states but also for dynamic phenomena during the process of plastic deformation.

Freshwater ice, ice flowing, non-coherent additional waves, microwaves

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно 16 кристаллических модификаций и 3 вида аморфных льдов [*Loerting et al., 2011; Chaplin, 2013*]. Две кристаллические модификации Ih (обычный гексагональный лед) и Ic (кубический лед) существуют в природных условиях. Лед Ic обнаружен в холодной атмосфере [*Riikonen et al., 2000; Murray et al., 2005*]. Вода многообразна, и в поровом пространстве, например в порах многослойных углеродных нанотрубок, при охлаждении воды при атмосферном давлении обнаружили лед IX и VIII, которые ранее наблюдались при высоких давлениях [*Jazdzewska et al., 2011*]. Методами молекулярной динамики было обнаружено девять модификаций льда в углеродных трубках диаметром 0,9–1,7 нм при изменении температуры от 160 до 290 К [*Takaiwa et al., 2008*].

Многие свойства льда и мерзлых дисперсных сред, например электромагнитные, изучают в статических условиях при постоянных атмосферном давлении, температуре и геометрической форме образцов. Вместе с тем при изменении этих параметров, т. е. в динамических условиях и особенно при резких вариациях, электромагнитные свойства льда мало исследованы. Так, одной из особенностей льда Ih является его способность к пластической деформации (течению) под действием механических напряжений. Это состояние, при котором между частями кристаллов льда возникают квазижидкие слои, характерно для ледяных структур в природной среде. Течению под действием сил гравитации подвергаются материковые ледники и любые ледяные объекты при изменении температуры, ледяные покровы хо-

© Г.С. Бордонский, 2014

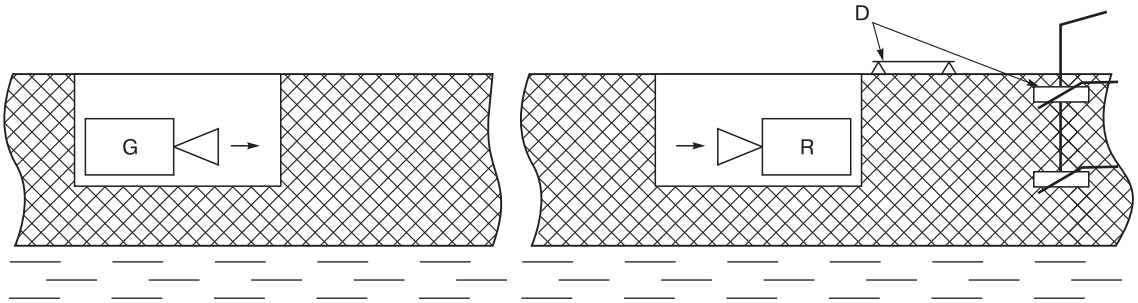

Рис. 1. Схема расположения аппаратуры для радиопросвечивания ледяного покрова.

G – микроволновый генератор, R – приемник излучения, D – датчики деформации льда и температуры.

лодных спутников планет – под действием приливных сил, и т. д. Однако при изучении электромагнитных свойств ледяных структур влияние пластической деформации, сопутствующее наблюдениям и измерениям параметров, далеко не всегда принимается во внимание [*Богородский, 1983*].

Цель настоящей работы – показать необходимость учета динамических явлений, в частности пластической деформации, на микроволновые свойства ледяных структур на примере пресных ледяных покровов. Эффект влияния пластической деформации на электромагнитные свойства льда, как будет показано ниже, проявляется даже при внешне слабом течении (ползучести) ледяного покрова. Этот вопрос имеет важное практическое значение для решения обратных задач при дистанционном зондировании мерзлых слоистых земных покровов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАНЕЕ ВЫПОЛНЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

За десятилетия исследований ледяных покровов и ледников при их радиозондировании накоплено много результатов, которые трудно интерпретировать в рамках обычных представлений о свойствах льда [*Богородский, 1983; Бордонский и др., 1999, 2006, 2011а,б; Drews et al., 2009*]. Так, в работах [*Бордонский и др., 1999, 2006, 2011а,б*] изучалось распространение микроволнового излучения в ледяных покровах пресноводных озер. Схема экспериментов представлена на рис. 1.

Выполненные эксперименты выявили чувствительность характеристик зондирующих сигналов, проходящих через лед, как к быстрым, так и к медленным волновым воздействиям на ледяной покров оз. Арахлей (вблизи Читы, Забайкальский край). Средняя минерализация льда порядка единиц миллиграмма на килограмм. В частности, была зарегистрирована приливная волна, т. е. весьма слабые и медленные деформации озерного льда, которые сложно регистрировать существующими методами (относительное растяжение земной коры имеет порядок величины 10^{-6}–10^{-7}) (рис. 2).

При наблюдениях выявлены две особенности. Первая – различный характер изменения мощности проходящего излучения на двух ортогональных линейных поляризациях. На вертикальной поляризации (ВП) наблюдали один суточный экстремум, который можно было объяснить суточным ходом изменения температуры среды. Вторая особенность в том, что на горизонтальной поляризации (ГП) отмечали два экстремума мощности сигнала в течение суток, которые совпали с максимумами приливных волн. Эксперименты были выполнены во время полнолуния, когда интенсивность приливных волн наибольшая. Заметим, что микроволновое излучение в данном эксперименте осуществляли на круговой поляризации, т. е. ис-

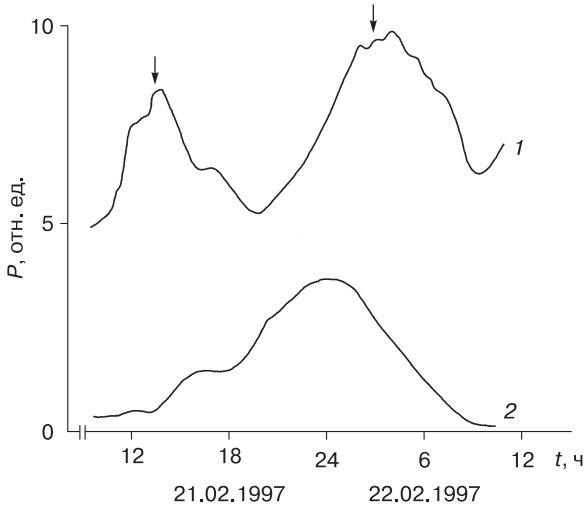

Рис. 2. Измеренная мощность излучения *P*, прошедшего через ледяной покров, на длине волны 2,3 см на двух ортогональных поляризациях:

1 – горизонтальной, *2* – вертикальной; стрелками отмечены моменты максимумов приливов, соответствующих экстремальным положениям Луны и Солнца для данной местности (на полнолуние 21–22 февраля 1997 г.). Время местное.

ходные мощности излучения на ВП и ГП были одинаковыми. Расстояние между излучателем и приемником около 40 м. Приборы располагали вблизи берега озера на расстоянии ~100 м от него при глубине в данном месте 3–4 м и толщине льда 1,4 м. Аппаратуру размещали на глубине 0,7 м. Ориентация осей антенн – по линии восток–запад. Среднее значение температуры льда в верхней части покрова составляло –10 °С с суточными колебаниями в пределах ±2 °С.

Относительно быстрые уединенные волны исследовались в экспериментах в сейсмичном районе на льду Баргузинского залива оз. Байкал в феврале 1998 г. Такие волны могут возникать в напряженном ледяном покрове при землетрясениях и других импульсных воздействиях на водную среду. Эффект проявления механических напряжений в плавающей напряженной ледяной пластине теоретически рассматривался, например, в [*Гольдштейн, Марченко, 1989*]. Отмечено, что при напряжениях, сравнимых с пределом прочности на сжатие ~10^6 Па, в пластине возникают новые типы изгибно-гравитационных волн, которые могут быть неустойчивыми в зависимости от параметров задачи. Получены решения, которые представляют собой солитоны и кноидальные волны. Возникающие нелинейные волны имеют характерные длины порядка 1000 м. В работе [*Гольдштейн, Марченко, 1989*] был сделан вывод, что волны создают дополнительные нагрузки и могут также приводить к возникновению и развитию трещин.

В экспериментах, проведенных в Баргузинском заливе, приборы располагали на льду залива в 5 км от с. Максимиха. Глубина погружения аппаратуры в лед 0,4 м; толщина льда 1 м. Ориентация приборов – по линии восток–запад. 26 февраля 1998 г. было зарегистрировано событие, относящееся к прохождению уединенной волны (рис. 3). Уединенная волна непосредственно ощущалась по резким кратковременным колебаниям ледяного покрова и сопутствующему звуковому эффекту в виде сильного гула над акваторией залива. Вероятное происхождение волны – разгрузка ледяного покрова от механических напряжений, вызванных тепловым расширением льда, в дни потепления. В этом эксперименте также использовали излучение с круговой поляризацией и регистрацию сигнала на двух ортогональных линейных поляризациях.

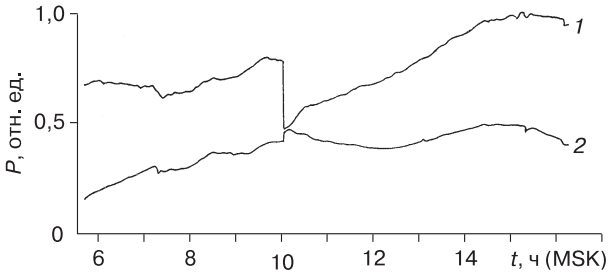

Рис. 3. Мощность проходящего СВЧ-излучения на длине волны 2,3 см на двух ортогональных полирязациях:

1 – горизонтальной, *2* – вертикальной.

Как и в предыдущем эксперименте (см. рис. 2), полученные результаты первоначально не удалось удовлетворительно объяснить. Необычность результатов заключалась в следующем: во-первых, сигнал на ГП в момент прохождения уединенной волны резко уменьшился, а затем стал медленно нарастать, достигнув исходного уровня; во-вторых, сигнал на ВП незначительно вырос и сигналы на двух поляризациях практически сравнялись по уровню. Если бы возникли разрушения ледяной структуры (с появлением жидкой воды в трещинах), можно было бы ожидать одновременного понижения уровня сигнала на двух поляризациях, но этого не наблюдалось.

КАЧЕСТВЕННАЯ ТЕОРИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ ЭФФЕКТОВ

В работах [*Бордонский и др., 2011а,б*] приведены аргументы, объясняющие аномалии электромагнитных свойств ледяных покровов, связанные с представлением о существовании в них когерентных и некогерентных добавочных волн. Когерентные добавочные волны – это такие волны, которые могут интерферировать между собой, создавая сильные пространственные периодические изменения интенсивности излучения; они возникают в средах с пространственной дисперсией [*Агранович, 1979*]. Для таких сред компоненты тензора диэлектрической проницаемости зависят от волнового вектора, и в среде появляются две волны с одинаковой поляризацией, но с различными их длинами, т. е. наряду с исходной возникает добавочная электромагнитная волна. Как оказалось, добавочные волны возникают не только в бесконечных средах с пространственной дисперсией (примером может быть среда с периодическим изменением диэлектрической проницаемости, период которой сравним с длиной волны проходящего излучения). Они возникают также в плоскослоистой среде в тонком слое между двумя полубесконечными средами [*Бреховских, 1957*], что было подтверждено нами для конкретного случая распространения микроволнового излучения в пресном ледяном покрове [*Бордонский и др., 2006, 2011а,б*].

Вместе с тем в эксперименте были обнаружены особые волны [*Бордонский и др., 2011а,б*]. Это некогерентные добавочные волны, сложение которых происходит некогерентно, т. е. в точке приема

регистрируется их суммарная интенсивность, а не суммарная амплитуда полей. На основе результатов [*Бордонский и др., 2006*] был сделан вывод, что некогерентные волны возникают из-за рассеяния излучения на пленках в областях, где происходит разрыв водородных связей при возникновении течения среды. При этом наблюдается возникновение отрицательной дифференциальной вязкости при превышении порога текучести. В эти моменты деформация резко нарастает, а напряжение падает [*Petrenko, 2002*]. Поскольку молекулы воды представляют собой электрические диполи, можно предположить и возникновение отрицательного дифференциального сопротивления в таких областях для токов, наведенных внешним переменным электрическим полем. Как известно, токи в цепи с отрицательным сопротивлением могут быть несколько усилены и вызывают рост интенсивности электромагнитного поля при его переизлучении. Из-за хаотического распределения областей течения кристаллов в объеме ледяного тела и беспорядочных величин фаз отдельных источников излучения возникает некогерентное поле.

В результате при распространении в ледяном покрове монохроматического излучения в нем появляется два типа волн: когерентные, связанные с многократными переотражениями от границ сред, и некогерентные, возникающие при пластической деформации льда. В последнем случае эффект может быть наиболее заметен для среды с ориентированными определенным образом в пространстве оптическими осями кристаллов льда. Пространственная упорядочность главных оптических осей кристаллов льда (С-осей) характерна для озерного льда [*Паундер, 1967*], что также наблюдали для объектов, используемых в экспериментах [*Бордонский и др., 1999, 2011а,б*]. Начиная с глубин 20–30 см для озерного льда, С-оси были ориентированы вертикально, т. е. базисные плоскости гексагональных кристаллов располагались параллельно поверхностям покровов. Известно, что кристаллы льда наиболее легко деформируются путем сдвига вдоль базисных плоскостей [*Petrenko, 2002*]. Следовательно, в изучаемых объектах при относительно слабых напряжениях должна возникать пластическая деформация преимущественно в плоскостях, параллельных границам раздела ледяного покрова с окружающей средой. В результате несколько усиливается проходящее излучение на горизонтальной поляризации, для которой направление вектора электрического поля волны совпадает с базисными плоскостями кристаллов льда.

Для проверки влияния течения среды на рассеяние микроволнового излучения были выполнены эксперименты по созданию импульсного давления в пресном ледяном покрове с использованием взрывов небольших пороховых зарядов. Детально постановка экспериментов аналогична представленной в работе [*Фомин, 1985*]. В эксперименте через область взрыва порохового заряда массой несколько граммов, предварительно вмороженного в ледяной покров, пропускали излучение на различных длинах волн. Создаваемое импульсное давление в среде для такого эксперимента в сфере, равной 10 диаметрам заряда, по данным [*Фомин, 1985*], достигает 340 бар. Диаметр заряда в эксперименте ~5 см. Расстояние между передатчиком и приемником составляло 5 м.

На рис. 4 представлены результаты одного из экспериментов для частоты излучения 13,7 ГГц. Эксперимент проводили на пресном ледяном покрове оз. Арахлей. Средняя минерализация льда порядка нескольких миллиграммов на килограмм. Минерализация исходной воды озера около 0,1 г/л; толщина льда 1,2 м. Глубина погружения аппаратуры в лед 0,5 м. Как видно на рис. 4, сразу после взрыва отмечен короткий импульс поглощения сигнала на время порядка 1 мс. При использовании порохового заряда массой 5 г разогрев льда в сфере диаметром 50 см не превышал 1 °С. Использовано значение удельной теплоты сгорания пороха 3,8 МДж/кг. Если бы вся энергия пошла на образование жидкости, то было бы растоплено около 70 г льда, что соответствует сфере с радиусом менее 3 см. По-видимому, энергия взрыва расходуется на нагревание среды, образование жидкости и совершение работы пластической деформации. На рис. 4 после короткого импульса поглощения излучения видно возрастание сигнала вдвое на время 30–40 мс, когда в среде был спад высокого давления, т. е. происходило ее “замерзание” в соответствии с фазовой диаграммой “давление–температура”. Этот эксперимент проводили при температуре льда на несколько градусов ниже 0 °С, когда предел текучести льда близок к наименьшим значениям [*Petrenko, 2002*].

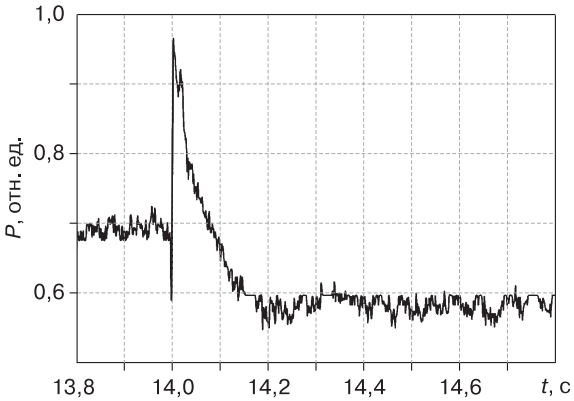

Рис. 4. Зависимость регистрируемой мощности излучения (на частоте 13,7 ГГц) от времени при инициировании взрыва во льду.

В аналогичном эксперименте изучали свойства льда соленого озера, основные соли которого – хлорид натрия и карбонат натрия. Общая концентрация солей во льду 3 г/кг. При температуре льда –10 °С эффект усиления проходящего излучения через область взрыва не был обнаружен. Тогда провели эксперимент с тем же льдом, охлажденным до температуры приблизительно –60 °С, которая существенно ниже температуры эвтектики солей, захваченных в лед. Для охлаждения участка льда в ледяном покрове были сделаны пропилы, в которые заливали жидкий азот. В этом эксперименте, как и в случае пресного льда, обнаружили импульс микроволнового излучения повышенной интенсивности при возникновении в среде высокого давления при взрыве заряда. Таким образом, можно сделать вывод, что рост регистрируемого излучения возникает при течении кристаллов льда. Для более теплого соленого льда, содержащего жидкие включения, деформации происходили преимущественно без смещения частей кристаллов льда относительно друг друга или же жидкие солевые включения подавляли электрическую активность среды.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленное описание возникновения некогерентных добавочных волн позволяет объяснить наблюдаемые явления при радиолокационном зондировании ледяных покровов. Так, на рис. 2 течение среды при экстремуме приливной волны также достигало максимума и порождало некоторое усиление сигнала на ГП, так как именно на этой поляризации вектор электрического поля волны совпадал с базисной плоскостью кристаллов среды, и, следовательно, электрические переменные токи также совпадали с плоскостями, по которым скользили части кристаллов. Поскольку экстремумов приливной волны два за сутки, наблюдали два максимума интенсивности проходящего излучения. Единственный экстремум на ВП объясняется суточным ходом температуры воздуха.

Особенности графиков, приведенных на рис. 3, объясняются следующим образом. При возникновении в ледяном покрове механических напряжений при суточных изменениях температуры и появлении течения кристаллов вдоль базисных плоскостей сигнал на ГП оказывался несколько выше по сравнению с сигналом на ВП. В момент разгрузки покрова от механических напряжений, который сопровождался прохождением уединенной волны, течение среды на некоторое время прекращалось, и сигналы на двух поляризациях выравнивались. Последующий медленный рост интенсивности излучения на ГП определялся медленным восстановлением напряжений на данном участке ледяного покрова. Таким образом, по характеру изменения сигнала на разных поляризациях при радиозондировании можно определять динамику механических напряжений в структурированном льде.

Аналогичные явления наблюдали и другие исследователи. Например, в [*Matsuoka et al., 2003*] выполнены радарные измерения рассеянных от различных слоев ледников Антарктиды излучений на двух ортогональных поляризациях. Обнаружено существенное превышение сигнала от некоторых слоев, достигающее 10 дБ, на поляризации, для которой вектор электрического поля перпендикулярен направлению течения ледника, по сравнению с другой поляризацией. При этом главные оптические оси кристаллов внутри ледника были преимущественно ориентированы в направлении его течения. Авторы не объясняют наблюдаемую аномалию [*Matsuoka et al., 2003*]. В данном случае объяснение эффекта можно связать с усилением рассеянного сигнала с пластической деформацией и совпадением базисных плоскостей кристаллов среды с направлением вектора электрического поля падающей волны.

В работе [*Drews et al., 2009*] приведены данные о слое EFZ (eho free zone – свободная от отражений зона) вблизи нижней границы массивных ледников. Появление такого слоя на записях при регистрации отражения радиолокационных сигналов авторы связывают с потерей когерентности при течении среды в придонной части ледника, однако подробно такое предположение не рассматривалось.

Отметим некоторые возможности применения некогерентных добавочных волн. Одна из них – детектирование механических волн, возникающих в водной среде и ледяных покровах (сейсмических, приливных, сейшевых, волн от искусственных источников). Отличительной особенностью такого детектирования является способность регистрации волн с большим периодом колебаний – порядка часов и суток. Такие измерения могут выполняться не только при разнесенных в разные точки пространства приемнике и передатчике, но и при установке их на одном носителе (автомобиле, самолете, искусственном спутнике Земли). Другая возможность определяется структурными особенностями ледяных объектов при упорядочении в них разнообразных включений (жидких, газовых, твердых частиц и кристаллов) и различиями механических свойств по направлениям. Анизотропия среды может выявляться спектральным многополяризационным зондированием таких объектов.

Следует обратить внимание на то, что течение среды может создавать добавочную волну и для акустических излучений, как было отмечено в [*Фомин, 1985*]. Этот вопрос требует дальнейшего исследования. Представляется необходимым также углубленное изучение физических свойств областей кристаллов, подвергающихся течению (из-за появления пленок, квазижидких слоев). Можно отметить, что в работе [*Рыбалко и др., 2008*], аналогично нашим результатам, было обнаружено усиление излучения миллиметрового диапазона, но в сверхтекучем жидком гелии. Считается, что в сверхтекучем гелии имеется неустойчивость вихревых структур на частотах, используемых в эксперименте. Можно предположить аналогичное состояние в пленках между частями кристаллов льда при возникновении отрицательной вязкости, когда достигается предел текучести. В таких пленках возможны процессы самоорганизации, например, возникновение сложных вихревых структур [*Старр, 1971*].

ВЫВОДЫ

1. На примере измерения микроволновых свойств пресного ледяного покрова впервые показано, что электромагнитные свойства льда необходимо изучать не только в статике (для объектов с неизменными геометрией и внутренними напряжениями), но и в динамике, при пластической деформации. При этом даже относительно слабое течение, с внешне не наблюдаемыми деформациями природных ледяных структур, может приводить к проявлению у них особых электромагнитных свойств, например, к возникновению некогерентных добавочных волн.

2. В экспериментах показана возможность регистрации волновых движений при возникновении уединенных и приливных волн в ледяных покровах, имеющих преимущественную пространственную ориентацию главной оптической оси кристаллов, при поляризационных измерениях проходящего через лед микроволнового излучения сантиметрового диапазона.

3. При измерениях проходящей мощности внешнего источника излучения через область в пресном льде, где создавали давление около 300 бар путем инициирования порохового заряда в среде, обнаружен эффект усиления микроволнового излучения. Установлено также, что этот эффект отсутствует в соленом льде (использовали образец с минерализацией 3 г/кг), но возникает в той же среде, если она охлаждена до температуры ниже температуры эвтектики солевых включений.

4. Полученные экспериментальные данные указывают на возможность создания новых методик изучения внутренних механических движений ледяных структур с использованием поляризационных микроволновых измерений, например регистрации начала движения ледников. В настоящее время для таких задач используются только оптические изображения [*Петраков и др., 2013*], не позволяющие непосредственно определять внутреннее состояние ледяных тел.

Литература

Агранович В.М. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов / В.М. Агранович, В.Л. Гинзбург. М., Наука, 1979, 432 с.

Богородский В.В. Радиогляциология / В.В. Богородский, Ч. Бентли, П. Гудмансен. Л., Гидрометеоиздат, 1983, 312 с.

Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыренжапов С.В. Влияние волновых движений на затухание СВЧ-излучения в пресном ледяном покрове // Естественные науки и экология: Сб. Омск, Омский гос. пед. ун-т, 1999, с. 34–37.

Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. и др. Обнаружение “новых” волн Гинзбурга–Пекара во льду в микроволновом диапазоне // Журн. техн. физики, 2006, т. 76, № 5, с. 94–97.

Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. и др. Поляризационные аномалии микроволнового излучения и добавочные электромагнитные волны в деформируемых ледяных покровах // Журн. техн. физики, 2011а, № 9, с. 93–99.

Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. и др. Добавочные электромагнитные волны в ледяных покровах // Лед и снег, 2011б, т. 81, № 9, с. 71–79.

Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. М., Изд-во АН СССР, 1957, 502 с.

Гольдштейн Р.В., Марченко А.В. О длинных волнах в системе ледяной покров–жидкость при наличии ледового сжатия // Электрофизические и механические свойства льда. Л., Гидрометеоиздат, 1989, с. 188–205.

Паундер Э.Р. Физика льда / Э.Р. Паундер. М., Мир, 1967, 192 с.

Петраков Д.А., Дробышев В.Н., Алейников А.А. и др. Изменения в зоне Геналдонской гляциальной катастрофы в период 2002–2011 гг.// Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 35–46.

Рыбалко А.С., Рубец С.П., Рудавский Э.Я. и др. Взаимодействие электромагнитных волн сверхвысокой частоты со сверхтекучим потоком в He II // Физика низких температур, 2008, т. 34, № 4/5, с. 326–336.

Старр В.П. Физика явлений с отрицательной вязкостью / В.П. Старр. М., Мир, 1971, 262 с.

Фомин В.А. Действие взрывов во льду, сопровождающееся таянием льда в волне сжатия: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1985, 23 с.

Chaplin M. Water structure and science. URL: http://www.lsbu.ac.uk/water/chaplin.html (дата обращения: 28.12.2013).

Drews R., Eisen O., Weikusat I. et al. Layer disturbances and the radar-echo free zone in ice sheets // The Cryosphere, 2009, vol. 3, No. 2, p. 195–203.

Jazdzewska M., Sliwinska-Bartkowiak M., Beskrovnyy A. et al. Novel ice structures in carbon nonopores: pressure enhancement effect of confinement // Phys. Chem. Chem. Phys., 2011, vol. 13, p. 9008–9013.

Loerting T., Winkel K., Seidl M. et al. How many amorphous ices are there? // Ibid., p. 8783–8794.

Matsuoka K., Furukawa T., Fujita S. et al. Crystal orientation fabrics within Antarctic ice sheet revealed by a multipolarization plane and dual-frequency radar survey // J. Geophys. Res., 2003, vol. 108, No. B10, p. 2499–2524.

Murray B.J., Knopf D.A., Bertman A.K. The formation of cubic ice under conditions relevant to Earth's atmosphere // Nature, 2005, vol. 434, p. 202–205.

Petrenko V. Physics of Ice / V. Petrenko, R.W. Whitworth. Oxford, Oxford Univ. Press, 2002, 347 p.

Riikonen M., Sillanpaa M., Virta L. et al. Halo observations provide evidence of airborne cubic ice in the Earth's atmosphere // Appl. Optics, 2000, vol. 39, No. 33, p. 6080–6085.

Takaiwa D., Hatano I., Koga K., Tanaka H. Phase diagram of water in carbon nanotubes // Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 2008, vol. 105, No. 1, p. 39–43.

Поступила в редакцию
25 июля 2013 г.