

Причины образования некогерентных добавочных волн в микроволновом диапазоне в пресном льду при пластической деформации

© Г.С. Бордонский

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
672014 Россия, Чита
e-mail: lgc255@mail.ru

(Поступило в Редакцию 8 июня 2015 г.)

Предположено, что некогерентные добавочные волны, обнаруженные в пресном льду в микроволновом диапазоне, связаны со спиноподобным распадом неустойчивой фазы. При таком распаде в среде образуются периодические структуры. Неустойчивая фаза может возникать при пластической деформации льда, конденсации паров воды на холодной подложке и при других воздействиях, приводящих к появлению спинодали. Приведены экспериментальные результаты, полученные на длинах волн миллиметрового и сантиметрового диапазонов, подтверждающие высказанное предположение о причинах образования некогерентных добавочных волн.

Введение

В работе [1] сообщалось об обнаружении в пресном ледяном покрове при распространении в нем микроволнового излучения на частоте 13 GHz добавочных электромагнитных волн. Такие волны возникают в средах с пространственной дисперсией. Они впервые были рассмотрены в работах [2,3]. Пространственная дисперсия связана с зависимостью тензора диэлектрической проницаемости ϵ_{ij} от волнового вектора \mathbf{k} . Эффекты пространственной дисперсии в среде определяются отношением a/λ , где a — некоторый размер, характеризующий среду, например параметр решетки и т.п., λ — длина волны в среде. Особенность добавочных волн заключается в том, что они имеют одинаковую поляризацию с исходной волной, но некоторое отличие волнового вектора. Этот эффект приводит к интерференционным биениям напряженности полей по мере удаления от излучателя. При $a/\lambda \rightarrow 0$ эффекты пространственной дисперсии исчезают.

Для ледяного покрова, в котором в [1] проявились добавочные волны, не было ясности с природой ожидаемой периодической структуры. Предполагали, что она связана с кристаллическим строением объекта. Однако кристаллиты, слагающие ледяной покров, не имеют строгой периодичности и не имеют отличий значения диэлектрической проницаемости. Кроме того, в некоторых экспериментах были обнаружены сильные искажения поляризационных диаграмм, принимаемого излучения, что могло бы иметь место для поля с двумя (или более) различными ортогональным базисными состояниями, поскольку искажения диаграмм не должны наблюдаться для когерентных полей с одной частотой. Возможное объяснение могло быть связано с возникновением излучений с отличающимися частотами. Однако это исключалось из-за применения относительно узкополосных приемников. С другой стороны, выпол-

ненные измерения спектра проходящего излучения с точностью 10^{-3} не выявили его расширения.

При последующем исследовании стало ясно, что добавочные волны возникают в однородных изотропных средах, если они образуют плоскоструктурную структуру в виде тонкого слоя толщиной от единиц до сотен длин волн, расположенного между двумя полубесконечными средами [4]. Их теоретическое описание было ранее представлено в монографии [5]. Вместе с тем до работ [1,4] отсутствовало экспериментальное подтверждение их существования. Фактически, структура в виде тонкого плоского слоя, заключенного между двумя полубесконечными средами, эквивалентна среде с пространственной дисперсией, как и в волноводах с неоднородным заполнением [6].

Что касается сильных искажений поляризационных диаграмм интенсивности излучения, которые обнаружили в [1,4], то они на основе анализа экспериментов были отнесены к проявлению некогерентных добавочных волн. Для этих волн складываются не напряженности, а интенсивности полей, которые создаются независимыми анизотропными источниками. Искажения диаграмм исследовали при поляризационных измерениях на 12 линейных поляризациях, полученных с шагом 15° . Для любого числа чисто синусоидальных волн с одной частотой при их сложении в приемном устройстве такие искажения не должны иметь место (для когерентного поля должны наблюдаться диаграммы интенсивности, имеющие вид „восьмерки“ или „круга“ с промежуточными формами). Замечание о возможности возникновения двух независимых эллипсов поляризации (т.е. четырех базисных состояний поля) высказывалось в [2]. Однако такие излучения не описываются классической электродинамикой, а должны рассматриваться на основе квантовой механики [7].

Появление некогерентных волн было отнесено к возникновению текучести (пластической деформации) льда,

когда в среде возникают нелинейные свойства [4]. Было высказано предположение, что областями нелинейности являются квазижидкие слои, по которым происходит скольжение частей кристаллов, преимущественно вдоль базисных плоскостей. При рассеянии излучения на них и возникает некогерентная компонента добавочных волн. Эффект из-за определенной преимущественной пространственной ориентации главной оптической оси „С“ кристаллов в ледяном покрове имеет и поляризационную анизотропию. Данное представление качественно объясняло результаты выполненных экспериментов на ледяных покровах пресных озер [8].

Вместе с тем для некогерентных добавочных волн были не совсем ясны детали механизма их образования. Например, для изменения длины волны рассеянного излучения необходима периодическая решетка из участков среды, подвергающейся пластической деформации. Если же области течения в пространстве носят хаотичный характер, то будет наблюдаться рассеяние без изменения длины волны. Кроме того, в экспериментах [9] образование некогерентных волн наблюдали в близких по времени измерениях на двух частотах 13.7 и 34 GHz, т.е. эффект носил широкополосный характер и обнаруживался для некратных частот. В другом эксперименте с последовательным изменением частоты излучения в интервале 13–14 GHz с шагом 0.1 GHz искажения диаграммы наблюдали лишь на некоторых частотах, причем искажения перемещались по частоте с течением времени с интервалом порядка часа [4].

Теоретические предпосылки

Для объяснения формирования среды, обладающей пространственной дисперсией, рассмотрен особый механизм ее образования — спиноподальный распад неустойчивых фаз с образованием периодических пространственно разделенных фаз веществ. Этот процесс в настоящее время хорошо изучен для сплавов [10], но он имеет и общий характер, например, он исследован в водородных подсистемах в водород-вмещающей среде [11].

Известно, что пластическая деформация в физике твердого тела рассматривается на основе дислокационной теории. Однако непосредственное применение этой теории для решения конкретных задач, например нахождения радиофизических свойств среды при пластическом течении, достаточно сложно [12]. Поэтому в настоящей работе сделано предположение о том, что при пластической деформации макроскопические объемы льда переходят в неустойчивое состояние, которое на фазовой диаграмме отделяется от стабильной фазы спиноподально. Само вещество в неустойчивом состоянии можно отождествить с квазижидкими слоями, находящимися внутри кристаллов льда.

При спиноподальном распаде квазижидких слоев в ледяных телах возникают изменения концентрации с

разделением среды на две фазы с характерным размером λ_m . При этом распределение плотности фаз в первом приближении на начальной стадии распада можно представить как суперпозицию синусоидальных волн без резких фазовых границ [10]. Спектр этих волн непрерывный с последующей эволюцией к характерной длине волны λ_m . Существенное различие электромагнитных свойств воды в жидком и твердом состояниях в микроволновом диапазоне приводит к эффективному взаимодействию внешней волны с возникающими периодическими структурами.

Эксперименты

Достижение условий спиноподального распада можно осуществить двумя способами. В одном — неустойчивая новая фаза создается особым воздействием на стабильную исходную фазу, например, резким изменением температуры или давления [10]. В другом, по нашему предположению, — переносом вещества в неоднородной структуре, где оно попадает в область неустойчивости.

К первому способу относится создание пластической деформации в массивном теле с образованием квазижидкости. Такие эксперименты выполнялись в работах [1,4]. Для второго способа — это эксперименты с конденсацией паров воды на поверхность кристаллов льда с последующим их замерзанием при температурах ниже температуры нуклеации — -41°C [13]. При температурах ниже -41°C жидкость существовать не может и находится в неустойчивом состоянии, т.е. на границе со спиноподалью. Реализация таких условий возможна, например, в верхних слоях тропосферы и в стратосфере при конденсации пара на кристаллах льда. Можно использовать собственное радиотепловое излучение кристаллических облаков для поиска эффектов пространственной дисперсии. Измерения с использованием микроволновых радиометров миллиметрового диапазона были выполнены нами в работе [14], однако интерпретация результатов эксперимента в свете идеи настоящей работы не была представлена.

Новые эксперименты по радиопросвечиванию ледяного покрова при достижении текучести среды при температурных деформациях

В отличие от других кристаллических сред лед может течь при относительно небольших механических нагрузках. Поэтому такое состояние льда возникает достаточно часто для природных объектов, например, при изменениях температуры окружающей среды. Это свойство проявлялось при проведении экспериментов в натуральных условиях.

Кроме того, для регистрации некогерентных добавочных волн в настоящей работе была опробована специальная методика их выявления с измерением первого параметра Стокса (S_1) в двух различных ортогональных

базисах. Методика заключалась в измерениях интенсивности принимаемого сигнала по схемам, используемым в [1,4]. В них передатчик и приемник размещали на некоторую глубину в ледяной покров на расстояниях в десятки метров и измеряли характеристики принимаемого сигнала на четырех линейных поляризациях: вертикальной (VP), горизонтальной (HP) и под углами $(+45^\circ)$ и (-45°) к вертикальной линии. S_1 определяли через интенсивность прошедших сигналов (I_i): $S'_1 = I_{VP} + I_{HP}$; $S''_1 = I_{-45} + I_{+45}$. Для обычных монохроматических волн $S'_1 = S''_1$, т.е. S_1 не зависит от выбора базиса и характеризует полную интенсивность излучения. При появлении некогерентных волн $S'_1 \neq S''_1$. Данная методика достаточно просто осуществляется при радиофизических измерениях.

В новых экспериментах измерения выполняли на частоте 13.7 GHz. Излучение осуществляли на круговой поляризации, а прием последовательно на четырех линейных поляризациях со временем опроса ~ 1 min. Генератор на диоде Ганна и микроволновый модуляционный приемник размещали в углублениях в ледяном покрове на глубине 0.5 m при толщине льда 1.1 m. Использовали небольшие рупорные антенны, помещенные вплотную к стенкам углублений. Эксперименты проведены на пресноводном водоеме с минерализацией воды 0.1 g/l; минерализация льда — 5 mg/kg. Расстояние между генератором и приемником составляло ~ 40 m. Был выбран участок ледяного покрова вблизи береговой зоны озера, где по данным оптических поляризационных измерений имела место преимущественная ориентация главной оптической оси „С“ кристаллов льда в направлении, перпендикулярном поверхностям раздела. Такая анизотропная структура льда обеспечивала преимущественную сдвиговую пластическую деформацию в плоских горизонтальных слоях (в базисной плоскости кристаллов). Появление добавочных некогерентных волн в анизотропной структуре выявлялось предложенной выше методикой.

На рис. 1 приведены результаты измерений разности $\Delta S_1 = S'_1 - S''_1$ и температуры ледяного покрова на глубине 10 см в течение нескольких суток перед началом таяния льда. Из графика рис. 1, а видно, что ΔS_1 отлична от нуля при возникновении механических напряжений, вызванных суточным изменением температуры льда — рис. 1, b. Сдвиговые деформации оказывали на ΔS_1 наибольшее влияние при изменении знака приращения температуры от времени, а величина $\Delta S_1/S_1$ достигала 25% в данном эксперименте.

Эксперименты по изучению добавочных волн при конденсации пара на холодную поверхность ледяных кристаллов

Неустойчивое состояние воды должно возникать при конденсации пара на холодную подложку при температурах ниже -41°C . Известно, что выше этой температуры жидкая вода может некоторое время находиться

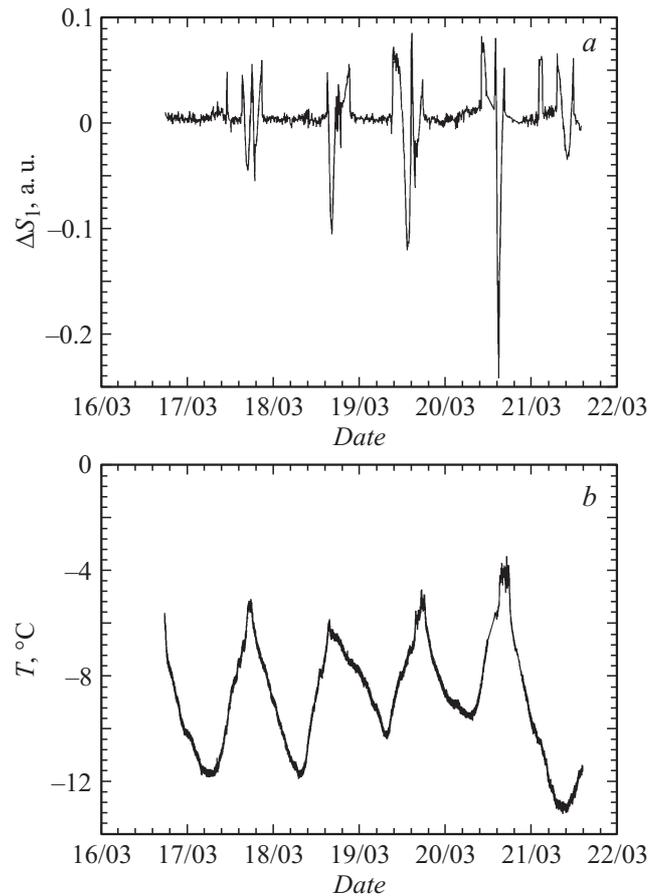


Рис. 1. а — зависимость от времени разности значений первого параметра Стокса по измерениям в двух ортогональных поляризационных базисах (VP, HP) и $(-45^\circ; +45^\circ)$ для микроволнового излучения, распространяющегося в ледяном покрове (исходное излучение имеет круговую поляризацию). б — изменение температуры льда на глубине 10 см от поверхности; толщина снежного покрова 2–5 см. Дата измерений: 16–21 марта 2015 г.

в переохлажденном (метастабильном) состоянии [15], однако ниже -41°C жидкая вода не существует. Область температур от -37°C до -120°C называют по этой причине „no mans land“ [16] (недоступная область).

Ранее в [14] нами выполнены измерения радиотеплового излучения зимних облаков на двух длинах волн в миллиметровом диапазоне 3.3 и 8.5 mm. Исследовали неплотные кристаллические облака при температурах от -30°C до -60°C . Определяли коэффициент корреляции между значениями радиояркостной температуры, который, как ожидалось, должен иметь высокие положительные значения (что определяется синхронным изменением электромагнитных потерь при вариациях толщины слоя ледяных частиц). Результаты, не вошедшие в [14], приведены на рис. 2. Из них, а также из ранее опубликованных данных следует, что в некоторые интервалы времени коэффициент корреляции оказывался невысоким и даже приобретал отрицательные значения (рис. 2, а).

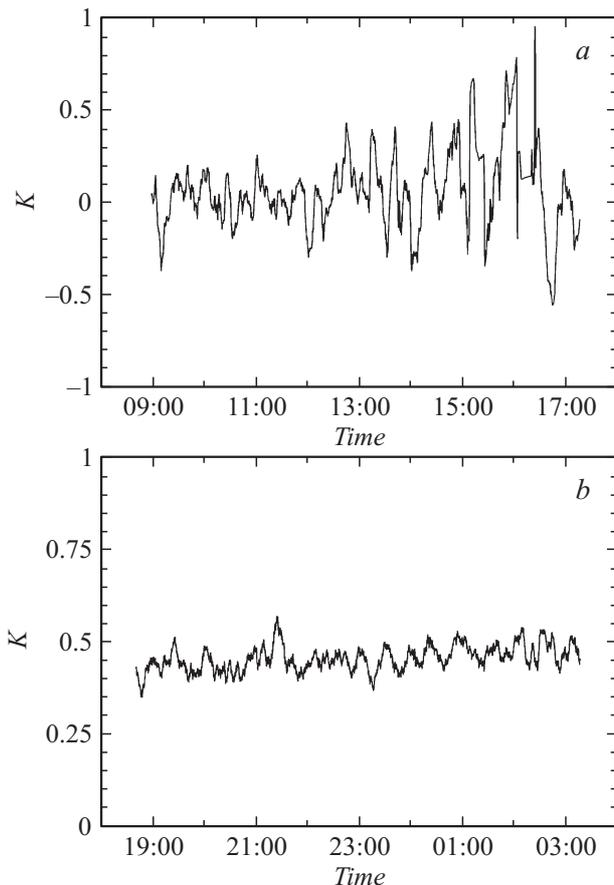


Рис. 2. Измеренный коэффициент корреляции радиояростной температуры от времени (t) для двух длин волн 3.3 мм и 8.6 мм в ночные и утренние часы: *a* — зимняя атмосфера (дата: 22 декабря 2006), *b* — атмосфера в теплый период времени (дата: 24–25 апреля 2007). Забайкальский край, Чита.

Для сравнения укажем, что наблюдения, выполненные в весеннее время, дали слабо изменяющиеся только положительные значения $K \sim 0.5$ (рис. 2, *b*).

Поэтому в работе [14] был сделан вывод о наблюдении в тепловом излучении холодных облаков добавочных волн в миллиметровом диапазоне, однако механизм их появления был не вполне ясен.

Обсуждение полученных результатов

Представление о появлении во льду особой фазы при его течении позволяет качественно объяснить микроволновые свойства среды при пластической деформации. Это представление поддерживается ранее выполненными экспериментами по изучению свойств резонатора, полностью заполненного льдом и подвергающегося быстрым изменениям температуры [17]. В этих экспериментах обнаружено раздвоение резонансной кривой пропускания резонатора, которое определяется температурными напряжениями в среде и появлением особой фазы (квазижидкости) при пластической деформации.

Известно, что раздвоение резонансной кривой связано с колебаниями в системе двух связанных осцилляторов. В случае мелкодисперсных сред с не взаимодействующими частицами ее диэлектрическую проницаемость можно представить в виде эффективного значения, такая среда не показывает эффекта связанных осцилляторов. Следовательно, в случае льда, подвергающегося пластической деформации, при измерениях в резонаторе выявились две разные фазы вещества.

Гипотеза о спиноподальном распаде неустойчивой фазы, образующейся при пластическом течении пресного льда, объясняет появление добавочных волн из-за образования синусоидальной решетки из неустойчивой фазы. Наличие характерной длины волны с ее изменением в широких пределах при вариациях свойств объекта (температуры, механических напряжений, свойств квазижидкой фазы) объясняет существование эффекта для электромагнитных волн различной длины в выполненных экспериментах от 2.3 см до 3.3 мм. Параметры волновых структур в среде, с которыми взаимодействует внешняя волна: их амплитуда, фазы, направления носят хаотический характер [10], что приводит в конечном итоге к некогерентным добавочным волнам.

Эксперимент с изменением знака коэффициента корреляции радиотепловых излучений холодных кристаллических облаков в миллиметровом диапазоне может быть понят на основе представления о спиноподальном распаде жидкой фазы. Она появляется на поверхности кристалликов льда в атмосфере при конденсации пара, если температура воздуха падает ниже значения температуры гомогенной нуклеации. Предполагаемый каскад фазовых превращений: пар—неустойчивая жидкость—твердое тело. При конденсации паров воды на холодную поверхность процесс роста кристаллов проходит через кратковременную стадию жидкого состояния осаждаемой пленки с ее спиноподальным распадом. Время распада жидкой пленки должно быть больше периода колебаний регистрируемых излучений. Период колебаний излучения имеет в данном эксперименте значения $(1-3) \cdot 10^{-11}$ с. По данным, приведенным в [10], время спиноподального распада в жидкости $\sim 5 \cdot 10^{-11}$ с. Размеры кристаллов должны быть соизмеримы с длинами волн излучения в среде, т.е. иметь значение порядка единиц миллиметра. Это условие также выполняется.

Аномалии электромагнитных свойств в оптических измерениях для сильно переохлажденных облаков были обнаружены в [18] при самолетном лазерном зондировании. Автор [18] выдвинул гипотезу о существовании в облаках нового вида воды (*A*-воды), которая находится в жидком состоянии даже при -50°C . Однако, несмотря на интенсивные экспериментальные исследования и компьютерное моделирование, до настоящего времени не получено каких-либо подтверждений существования такой переохлажденной воды другими авторами [19]. Возможно, что в [18] наблюдали проявление эффектов пространственной дисперсии при спиноподальном распаде неустойчивой фазы. Такой распад наблюдали, например,

для системы метанол–циклогексан в окрестности критической точки при рассеянии монохроматического света [10]. На фотопленке, установленной перпендикулярно падающему пучку, наблюдали появление кольца, отвечающего максимальной интенсивности рассеяния. Радиус кольца соответствовал углу рассеяния 0.05 rad . Кольцо существовало с неизменным диаметром в течение времени порядка минут, затем его диаметр уменьшился и оно исчезло.

Образование регулярных структур может происходить и по другим сценариям. Например, в работах [12,20] пластическая деформация твердых тел рассматривается как процесс формирования и распространения автоволн различного типа, т.е. в этом случае среда считается активной. Причем наблюдаемые длины волн пластической деформации для любых сред находятся в интервале $5\text{--}20 \text{ mm}$, а скорость распространения волн течения порядка $10^{-4}\text{--}10^{-5} \text{ m/s}$. Значения длин волн текучей компоненты среды совпадают с интервалом длин волн микроволнового изучения, использованных в наших экспериментах, где наблюдали добавочные некогерентные волны.

Проявления активности среды для микроволнового излучения обнаружены в [21]. Наблюдали усиление микроволнового излучения при импульсном давлении, создаваемом во льду. Это можно объяснить, с одной стороны, возникновением интенсивных автоволн течения. С другой стороны, молекулы воды имеют дипольный момент, поэтому возникновение волн пластической деформации в такой среде должно сопровождаться выраженными электромагнитными эффектами.

Разнообразные автоволновые явления отмечены в [11] для сплавов, содержащих водородную подсистему, например, ускоренный транспорт водорода в поле акустической волны, движение солитоноподобных неоднородностей, фазовое расслоение при деформационных воздействиях, инверсная населенность энергетических уровней атомов внедрения и ряд других, многие из которых еще экспериментально не изучены. Очевидно, что вопрос об автоволнах при тении твердых сред и их взаимодействии с микроволновым излучением требует специального исследования.

Близкие явления, как это следует из [12,20], должны наблюдаться при акустическом зондировании. В [22] наблюдали появление второй (т.е. добавочной) продольной акустической волны при просвечивании области льда при инициировании взрыва, замороженного в образец порохового заряда. При этом происходил фазовый переход твердое тело–жидкость с последующим ее замерзанием. Однако в [22] не было сделано выводов о причинах такого эффекта.

Выводы

1. Использование представления о неустойчивой фазе в пресном льду, подвергающемся пластической деформации, позволило предложить основы простой радиофизической модели его свойств без использования

дислокационной теории. Неустойчивая фаза связывается с квазижидкими слоями, возникающими при разрыве водородных связей при тении льда по базисным плоскостям кристаллов. Такая фаза может также возникать при конденсации водяного пара на глубоко переохлажденные, ниже температуры метастабильного состояния для жидкой фазы, поверхности кристаллов льда.

2. Неустойчивая фаза, подвергаясь спиновальному распаду, образует периодическую решетку, что приводит к появлению пространственной дисперсии. Решетка на начальной стадии распада представляет собой набор синусоидальных структур с хаотическими амплитудами, фазами и направлениями и последующей их эволюцией к определенному волновому числу. При модуляции внешней волны на такой решетке возникают некогерентные добавочные волны, которые требуют для своего описания нескольких базисных состояний.

3. Для обнаружения некогерентных добавочных волн использована методика их регистрации по измерениям разности первого параметра Стокса в двух различных ортогональных поляризационных базисах. Несовпадение этой разницы с нулевым значением указывает на особые свойства излучения, т.е. появление некогерентных добавочных волн.

4. В общем случае для пресного льда, подвергающегося механическим воздействиям, по-видимому, возможно одновременное проявление спиновального распада и автоволн, генерируемых при интенсивном тении среды. При взаимодействии электромагнитного излучения с регулярной решеткой возникает добавочная волны, а при взаимодействии излучения с автоволнами течения полярной среды возможно усиление электромагнитных волн.

Дальнейшее изучение свойств добавочных некогерентных волн во льду требует исследования электрофизических свойств неустойчивой фазы вблизи спинодали. Необычные электромагнитные свойства, которые могут проявиться в этом случае, относятся к области, которую изучают в неклассической оптике [7].

Список литературы

- [1] Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыбикжапов А.Ц., Цыренжапов С.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 94–97.
- [2] Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллоптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1979. 432 с.
- [3] Лекар С.И. Кристаллоптика и добавочные световые волны. Киев: Наукова думка, 1982. 294 с.
- [4] Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 9. С. 93–99.
- [5] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 502 с.
- [6] Силин Р.А. Периодические волноводы. М.: ФАЗИС, 2002. 432 с.
- [7] Быков В.П. Лазерная электродинамика. Элементарные и когерентные процессы при взаимодействии лазерного излучения с веществом. М.: Физматлит, 2006. 384 с.

- [8] Бордонский Г.С. // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 2. С. 24–30.
- [9] Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 93–200.
- [10] Скрипов В.П., Скрипов А.В. // УФН. 1979. Т. 128. Вып. 2. С. 193–231.
- [11] Смирнов Л.И., Гольцов В.А. // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 01 (141). С. 111–137.
- [12] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Горбатенко В.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. № 5. С. 91–103.
- [13] Franzese G., Hernando-Martinez A., Kumar P. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2010. N 22. P. 2880–2889.
- [14] Бордонский Г.С., Гурулев А.А. // Исследование Земли из космоса. 2008. № 3. С. 11–17.
- [15] Вода и водные растворы при температурах ниже 0°C / Ред. Ф. Франкс. Киев: Наукова думка. 1985. 388 с.
- [16] Stanley H.E., Buldyrev S.V., Franzese G., Havlin S., Mallamace F., Kumer P., Plerou V., T. Preis // Physica. A. 2010. V. 389. P. 2880–2893.
- [17] Бордонский Г.С. // ФТТ. 2005. Т. 47. № 4. С. 691–695.
- [18] Невзоров А.Н. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 8. С. 674–680.
- [19] Chaplin M. Water structure and science.
URL: http://www.lsbu.ac.uk/water/martin_chaplin.html
(дата обращения 25.05.2015).
- [20] Зуев Л.Б., Хон Ю.А., Баранникова С.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 7. С. 53–59.
- [21] Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 19. С. 30–36.
- [22] Фомин В.А. Действие взрывов во льду, сопровождающееся таянием льда в волне сжатия. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. М.: МФТИ, 1985. 23 с.