

Оценка влияния «просветления» льда вблизи 0 °С на радиояркостную температуру снежных и ледяных покровов в длинноволновой части сантиметрового диапазона

В. А. Казанцев, Г. С. Бордонский

*Институт природных ресурсов экологии и криологии СО РАН
Чита, 672002, Россия
E-mail: lgc255@mail.ru*

На основе лабораторных измерений диэлектрической проницаемости льда и снега в резонаторе на частотах 3,4 и 5,5 ГГц вблизи 0 °С выполнены расчёты радиояркостной температуры снежного и ледяного покрова. Полученные результаты показали, что в интервале температуры $-0,3...-0,1$ °С имеет место уменьшение мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда и снега. Это приводит к эффекту «просветления» льда (уменьшению его электромагнитных потерь) и понижению радиояркостной температуры таких образований, как снежные и ледяные покровы. Максимальное значение уменьшения мнимой части относительной диэлектрической проницаемости возникало в случае, когда вектор напряжённости электрического поля был направлен параллельно базисным плоскостям кристаллов льда. В лабораторных измерениях в резонаторе было установлено пятикратное его уменьшение при температуре около $-0,2$ °С. Из расчётов следует, что при изотермических условиях, когда эффект просветления происходит по всей толщине ледяного покрова, это может приводить на исследуемых частотах к уменьшению радиояркостной температуры данного объекта на ~ 30 К при толщине льда 1,5 м. Просветление снега оказалось меньше по сравнению со льдом. В этом случае изменение радиояркостной температуры составляет ~ 6 К при толщине снега 0,25 и 0,5 м, что связывается с меньшим значением диэлектрических потерь снега и хаотическим пространственным расположением главной оптической оси кристаллов льда. Рассмотрены возможные экспериментальные доказательства проявления эффекта при дистанционном зондировании и его физические причины.

Ключевые слова: микроволновый диапазон, диэлектрическая проницаемость, ледяной покров, снег, просветление, микроволновая радиометрия

Одобрена к печати: 09.01.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-259-267

Введение

Температурные области, в которых проведены микроволновые исследования диэлектрических характеристик льда, представлены не в полном объёме. Так, остаётся сложна в исследовании область вблизи фазового перехода «лёд – вода» при 0 °С. В работах (Бордонский и др., 2009, 2014) получены экспериментальные данные, в которых был обнаружен эффект понижения затухания при просвечивании льда в микроволновом диапазоне вблизи 0 °С. Он был назван «просветлением», ввиду того, что в среде уменьшалось затухание проходящей мощности излучения. Аномалия была выявлена на различных частотах, от сантиметрового до миллиметрового диапазона. Позднее эффект был обнаружен в видимой и ультрафиолетовой области спектра (Бордонский и др., 2023).

Для решения задач дистанционного зондирования требуется выполнить оценки возможных наблюдаемых величин, например радиояркостной температуры ($T_{я}$) природных криогенных образований в случае проявления в них эффекта просветления. Для получения расчётных значений изменений радиояркостности требуется знать температурные изменения относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда $\hat{\epsilon}$ ($\hat{\epsilon} = \epsilon' + i\epsilon''$, где ϵ' — действительная часть $\hat{\epsilon}$; ϵ'' — мнимая часть $\hat{\epsilon}$) на различных частотах (Шарков, 2014). Наиболее точные измерения диэлектрической проницаемости ($\sim 0,1$ %) могут быть выпол-

нены с использованием резонаторов, особенно в случае их полного заполнения (Гурулев, 2005).

Цель настоящей работы заключается в оценке влияния эффекта просветления на радиояркостную температуру пресного ледяного и снежного покрова на основе резонаторных измерений диэлектрической проницаемости льда при его нагревании и при приближении к 0 °С.

Методика эксперимента

Для исследования влияния просветления на $T_{я}$ были проведены эксперименты по определению диэлектрических характеристик пресного природного льда при его нагревании до начала таяния. Лёд отбирался на пресном озере Кенон (Забайкальский край). Его минерализация составляла ~1 мг/кг. Были проведены измерения действительной и мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости чистого льда, а также свежевыпавшего снега. Объёмная плотность образца снега составляла 0,156 г/см³, а минерализация ~1 мг/кг.

Измерение диэлектрических характеристик осуществлялось с помощью прямоугольного резонатора типа Н₁₀₁ с внутренними размерами 58×26×25 мм при полном его заполнении исследуемой средой. Собственная частота пустого медного резонатора составляла 6,2 ГГц. При измерении изъятые образцы помещали в полость резонатора таким образом, чтобы базисные плоскости кристаллов льда были перпендикулярны или параллельны вектору напряжённости электрического поля. Сильное влияние такого условия расположения вектора излучения электрического поля на затухание было установлено в работах (Бордонский и др., 2009, 2014, 2023). На *рис. 1* приведена схема экспериментальной установки.

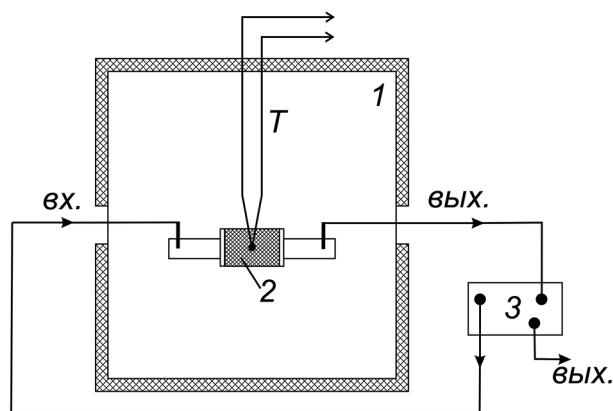


Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию диэлектрических характеристик льда и снега в резонаторе: 1 — климатическая камера, 2 — резонатор, 3 — скалярный анализатор, «Т» — датчик температуры

Резонатор с образцом помещался в климатическую камеру фирмы Espres, в которой изменяли температуру со скоростью нагревания порядка нескольких градусов в час. Измерение термодинамической температуры (T) осуществлялось при помощи термопарного датчика с абсолютной точностью 0,2 К. Эксперимент начинался при температуре льда около -30 °С и снега приблизительно -10 °С. Резонатор подключался к скалярному анализатору цепей Микран РМ4-18/2. По наблюдаемой резонансной кривой резонатора с образцом определяли резонансную частоту (f_p) и ширину линии резонанса (Δf_p) на уровне половинной мощности, из которых вычисляли ϵ' и ϵ'' по стандартной методике микроволновых измерений диэлектриков (Брандт, 1963; Гурулев, 2005). Точность определения $\epsilon' \sim 0,1\%$, $\epsilon'' \sim 1\%$. В эксперименте необходимо было получить ϵ' и ϵ'' до возникновения таяния образца льда, т.е. его деструкции. Это достигалось анализом изменений измеряемых величин от времени нагрева-

ния. Начало таяния приводило к росту Δf_p из-за появления жидкой воды, диэлектрическая проницаемость которой значительно выше, чем у льда и снега. Особенно это имеет место для ϵ'' , что проявляется в возрастании Δf_p .

По найденным значениям ϵ' и ϵ'' в области термодинамической температуры от приблизительно -10 до 0 °С проводились расчёты радиояркостной температуры льда по модели многослойной плоскостройной структуры (Клепиков, Шарков, 1992). В настоящей работе использовались чистые образцы льда без загрязнений и видимых включений газа.

Полученные результаты и их обсуждение

На *рис. 2а* представлен график изменения диэлектрических характеристик льда от температуры. В данном случае вектор электрического поля в резонаторе был перпендикулярен ориентации главной оптической оси «С» кристаллов льда, т. е. был параллелен их базисным плоскостям. Стоит отметить, что уменьшение ϵ'' происходит и для дисперсной среды при различных отклонениях направления оптических осей кристаллов относительно вектора напряжённости электрического поля. Это следует из *рис. 2б* для снега, для которого ориентация оптических осей кристаллов льда снежинок в объёме резонатора имеет хаотический характер. В этом случае эффект понижения ϵ' и ϵ'' меньше, чем у льда. Частота заполненного резонатора для случая льда $\sim 3,4$ ГГц, для снега $\sim 5,5$ ГГц.

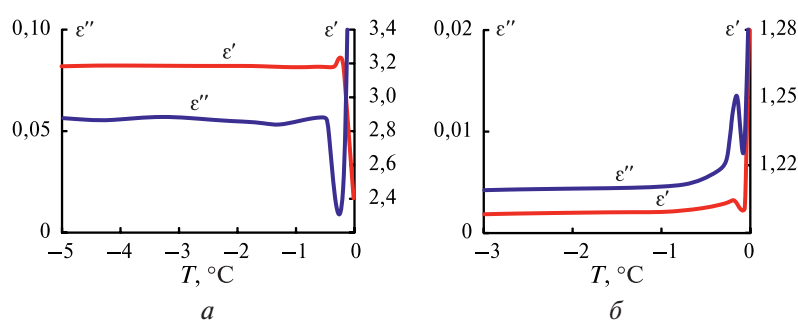
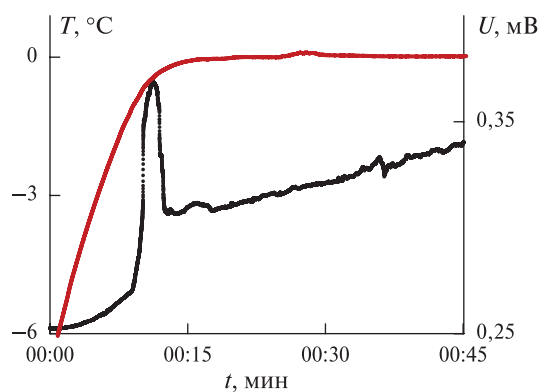


Рис. 2. Действительная и мнимая часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда (а) и снега (б) в зависимости от температуры (T) в резонаторе

Как видно из графиков, при приближении температуры образца к 0 °С происходит изменение его диэлектрической проницаемости. Особенно интересным является понижение ϵ'' , что является уникальным явлением, так как при таянии льда всегда должен наблюдаться её рост. Относительное изменение ϵ' выражено слабее. При дальнейшем нагревании образцов происходит увеличение ϵ'' , что связано с появлением воды, диэлектрические потери которой значительно выше, чем у льда. Уменьшение ϵ' на *рис. 2а* объясняется тем, что в процессе таяния льда в резонаторе начали образовываться пустоты. Из-за небольшого отверстия в боковой стенке резонатора происходил отток жидкой воды, что и привело к падению ϵ' . В случае, если жидкость не уходила, как в некоторых других экспериментах, ϵ' резко возрастала. После эксперимента, когда гауссовская кривая уже не наблюдалась, резонатор открывали и обнаруживали, что лёд на верхней границе имеет небольшие трещины и что размеры образца были несколько меньше полости резонатора.

В работе (Бордонский и др., 2023) было высказано предположение, которое объясняет причины наблюдаемого просветления. Оно связано с тем, что при пластической деформации, облегчённой при сдвиговых напряжениях вдоль базисных плоскостей кристаллов льда, происходит образование проводящих наноструктур. При этом появляются квазижидкие слои с высокой электропроводностью (Бордонский, 2024). Это может приводить к плазмонным эффектам и к усилению электромагнитного поля, что сказывается на эффективных значениях диэлектрических характеристик в исследуемой среде (Климов, 2009).

Рис. 3. Температура льда (красная пунктирная линия) и мощность проходящего линейно поляризованного видимого излучения через образец (в единицах напряжения фотодетектора (U)) в зависимости от времени на длине волны 535 нм



Данное предположение поддерживается результатами измерений в оптическом диапазоне, где просветление наблюдали в видимом и ультрафиолетовом диапазонах шкалы электромагнитного излучения на длинах волн 535 и 370 нм (рис. 3) (Бордонский и др., 2023).

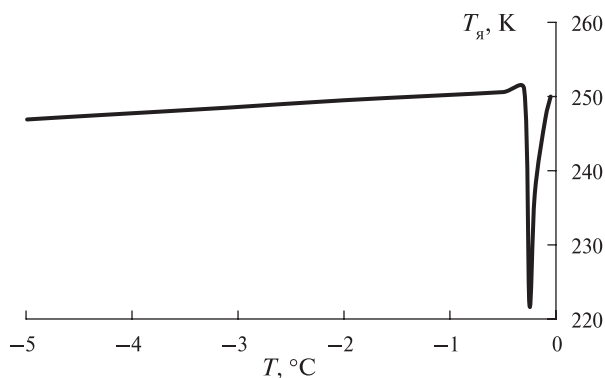
Очевидным следствием такого явления может быть не только существенное изменение передаточных характеристик сред, содержащих лёд, но и вариации их собственного теплового излучения. Это в наибольшей степени должно проявляться в микроволновом диапазоне, где глубина проникновения (скин-слой) в пресный лёд может достигать десятков метров (в зависимости от длины волны излучения). Эффект изменения излучательных характеристик может быть зарегистрирован с использованием микроволновой радиометрии при изменениях радиояркой температуры. Поэтому была выполнена теоретическая оценка влияния изменения ϵ'' при нагревании кристаллов льда в пресном ледяном и снежном покрове. Эти объекты выбраны как наиболее простые для расчётов, но являющиеся достаточно интересными для ряда практических применений (Шарков, 2014).

Полученные в экспериментах ϵ' и ϵ'' использовались в вычислениях радиояркой температуры льда пресного ледяного покрова при следующих условиях: толщина льда составляла 1,5 м, лёд находился на воде с температурой 1 °С. Толщина слоя воды выбрана равной 1 м, такой слой непроницаем в микроволновом диапазоне на частоте выше единиц гигагерц. Вычисления выполнены для угла зондирования от вертикали 0°, на рис. 4 представлены его результаты. Расчёты проведены при условии, что вся толщина льда будет иметь одинаковые значения ϵ' и ϵ'' и одно значение температуры. Вычисленные значения $T_{я}$ при полосе пропускания радиометра 100 и 300 МГц совпадают.

Для воды расчётная величина радиояркой температуры составила 97,9 К. Средняя частота радиотеплового излучения 3,4 ГГц. Так как в ходе эксперимента ϵ' уменьшалась после просветления, то для более корректного вычисления $T_{я}$ использовалось её значение, равное 3,15, в температурном интервале выше -0,2 °С. Из графика на рис. 4 видно, что при достижении льдом термодинамической температуры около -0,2 °С наблюдается наименьшее значение $T_{я}$. Это уменьшение составляет ~30 К по сравнению с температурами ниже -0,5 °С и выше -0,2 °С.

По данным, представленным на рис. 2б, выполнены расчёты $T_{я}$ снежного покрова в условиях, что снег с различной толщиной лежит на льду ($h_{\text{льда}} = 1 \text{ м}$, $T = -1 \text{ °С}$), под которым располагается слой воды толщиной 1 м с $T = 1 \text{ °С}$. Угол наблюдения выбран равным 45°. Средняя частота 5,5 ГГц. Полоса частоты пропускания радиометра 300 МГц. Расчёты выполнены для двух линейных ортогональных поляризаций. Просветление во льду не учитывалось с целью определения эффекта в снежном покрове.

Рис. 4. Расчётные значения радиояркой температуры льда толщиной 1,5 м на воде на частоте 3,4 ГГц в зависимости от термодинамической температуры при полосе пропускания радиометра 100 МГц



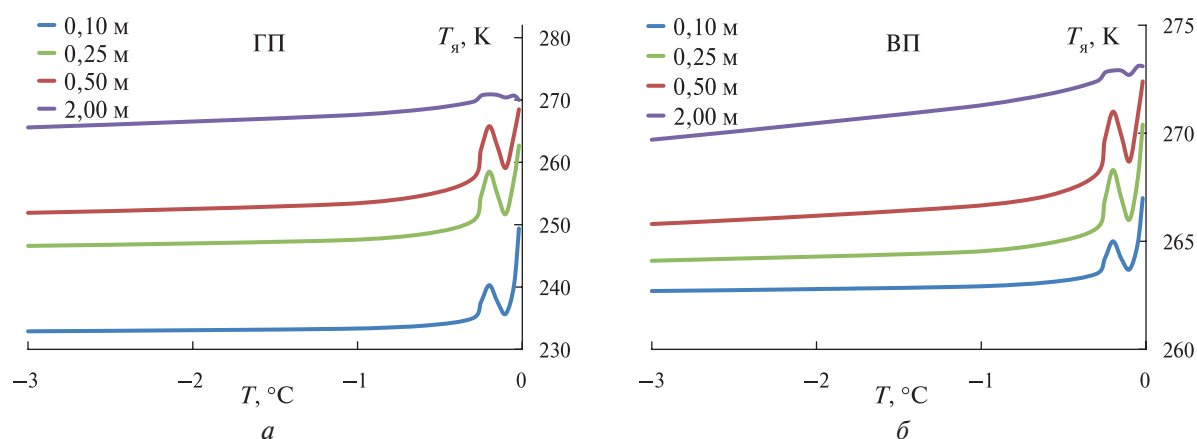


Рис. 5. Расчётная радиояркая температура слоистой структуры с просветлением снега при его различной толщине на горизонтальной (ГП) (а) и вертикальной (ВП) (б) поляризации

На рис. 5 представлены результаты расчётов радиояркой температуры при изменении термодинамической температуры и диэлектрической проницаемости снега для различной толщины снежного покрова, лежащего на льду с неизменной температурой.

Из полученных результатов видно, что значение $T_{я}$ на ортогональной поляризации имеет отклик в виде просветления вблизи $-0,1$ °С. В зависимости от толщины снега наблюдается изменение эффекта заснеженного ледяного покрова. Максимальное изменение $T_{я}$ наблюдается при толщине снежного покрова 0,25 и 0,5 м и соответствует ~ 6 К. При толщине 2 м просветление практически исчезает. При нагревании первоначально наблюдается возрастание радиояркости, которое можно связать с влиянием квазижидкого слоя, возникающего на поверхности снежинок свежеснежавшего снега. Эффект просветления для «старого» снега меньше по сравнению со свежеснежавшим и соответствует понижению ϵ'' в 1,2 раза. Данный факт может быть связан с изменением площади снежинок при их старении. В работе (Burniston et al., 2007) были представлены данные об изменении площади поверхности снежинок в зависимости от времени. Показано, что по мере старения снега его площадь поверхности в среднем уменьшается на 13 % в день при средней температуре -3 °С. Стоит отметить, что данный параметр сильно зависит от параметров снега и температуры воздуха.

В работе (Бордонский и др., 2023) было показано влияние расположения главной оптической оси кристалла льда относительно вектора напряжённости электрического поля на уменьшение потерь в оптическом диапазоне. При условии, если вектор электрического поля волны находился в базисной плоскости кристаллов льда, увеличение мощности проходящего сигнала достигало 25 % на длине волны 535 нм для образца толщиной ~ 10 см. В миллиметровом диапазоне на частоте 90 и 34 ГГц приращение мощности проходящего сигнала составляло около 20 % для образцов толщиной 15 см (Бордонский и др., 2014). В настоящей работе на частоте 3,4 ГГц было проведено несколько экспериментов при различной ориентации вектора электрического поля относительно базисных плоскостей кристаллов льда. Максимальное увеличение мощности проходящего сигнала при перпендикулярном к базисным плоскостям кристаллов льда направлении вектора электрического поля достигало $\Delta P_{\perp} = 7$ дБ для льда при толщине образца 2,6 см, что соответствует уменьшению мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости в 2 раза. В случае, когда вектор электрического поля был направлен параллельно базисным плоскостям кристаллов льда, приращение мощности проходящего излучения достигало $\Delta P_{\parallel} = 12$ дБ, что соответствует понижению ϵ'' в 5 раз. В выполненных измерениях просветление изменялось в широких пределах. Уменьшение ϵ'' для различных образцов льда составляло от 5 до 1,8 раза, что можно связать с различием их структуры — как с особенностями расположения главных оптических осей и геометрией кристаллов, так и влиянием примесей, которые располагаются по поверхностям кристаллов. Это также может быть связано с условиями измерений, например вариациями скорости нагревания. Уменьшение ϵ'' для снега варьируется в пределах

от 1,8 до 1,2 раза. Ввиду данных особенностей в настоящей работе расчёт радиояркостной температуры для ледяного покрова проводился для угла наблюдения 0° к поверхности. Этому соответствуют значения диэлектрической проницаемости для случая, когда вектор напряжённости электрического поля расположен параллельно базисным плоскостям. Отмеченная особенность имеет место, когда в ледяном покрове присутствует выделенное направление главной оптической оси кристаллов льда в вертикальном направлении. Такой лёд характерен для небольших пресных водоёмов и по классификации Черепанова относится ко льду типа А1 (Богородский, Гаврило, 1980).

Таким образом, при обнаруженном в лабораторных измерениях уменьшении ε'' на частоте 3,4 ГГц в ~5 раз понижение радиояркостной температуры пресного ледяного покрова толщиной 1,5 м должно достигать ~30 К. Это возможно в идеальной многослойной структуре, а также при изотермических условиях. В реальных условиях подобные процессы в определённой степени нивелируются, хотя тающий лёд и снег достаточно распространены на планете в то или иное время года. Трудности связаны, в первую очередь, с низким пространственным разрешением микроволновых радиометрических спутниковых систем. В этих измерениях происходит усреднение значений радиояркостной температуры подстилающей поверхности на больших площадях. С другой стороны, мало объектов, которые находятся в изотермических условиях и не все состоят из идеального льда типа А1. Ледяные покровы также покрыты неоднородным снежным покровом. В результате можно ожидать некоторое уменьшение эффекта, вызванного просветлением льда.

Несмотря на эти факторы, в отдельных исследованиях обнаружены признаки эффекта просветления. Например, в работе (Tikhonov et al., 2022) были приведены графики радиояркостной температуры ледяного покрова Обской губы. На этих графиках перед деструкцией ледяного покрова в некоторые годы наблюдается кратковременное понижение $T_{я}$ приблизительно на 10 К на частоте 1,4 ГГц. Необычность наблюдения в том, что при увеличении температуры окружающей среды и появлении начальных признаков таяния ледяного покрова должно возникать повышение $T_{я}$ из-за перехода некоторых областей льда в воду. Проявление эффекта просветления отмечалось и ранее в работе тех же авторов (Тихонов и др., 2019) при исследовании радиояркостной температуры льдов Антарктиды. Было выявлено, что при достижении льдом термодинамической температуры, близкой к 0 °С, возникает понижение радиояркостной температуры, причиной чему, по мнению авторов, может быть просветление. Также в публикации (Бычкова и др., 2023) упоминается о проблеме обнаружения айсбергов на радиолокационных снимках. Ещё один из примеров — работа (Li et al., 2024), где исследовалось обратное рассеяние от поверхности ледников Гренландии на частоте 5,5 ГГц. В период повышения температуры воздуха >0 °С появляются флуктуации в величине обратного рассеяния. Это можно объяснить тем, что при локальном уменьшении мнимой части относительной диэлектрической проницаемости льда интенсивность отражённого сигнала от некоторых участков будет значительно изменяться. В работе (Kunz, David, 2006) при исследовании излучательных и отражательных характеристик ледяного покрова Антарктики в период начала таяния было также обнаружено понижение радиояркостной температуры и обратного рассеяния. Ранее упоминание о сильном уменьшении погонного затухания в пресном льду было представлено в публикации (Глушнев и др., 1976), где было обнаружено, что погонное затухание на длине волны 0,8 м в кернах изменялось от 13 до 0 дБ/м. Таким образом, вариации локальных сигналов могут быть связаны с эффектом просветления льда и могут использоваться при расшифровке рассеянных сигналов от «тёплого» льда.

Понижение радиояркости в природной среде может существенно изменяться из-за влияния примесей и процессов рекристаллизации, особенно для снежного покрова. Например, в работе (Бордонский и др., 1988) было показано, что увеличение минерализации снежно-ледяного покрова при изменении его температуры может приводить к уменьшению излучения в инфракрасной области спектра до 20 К. Поэтому для практических целей требуется выполнение специальных исследований радиотеплового излучения снежных и ледяных покровов перед началом их таяния и разработка соответствующих методик обработки данных ДЗЗ.

Выводы

1. В выполненных измерениях действительной и мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда и снега в резонаторе при его нагревании до 0 °С было подтверждено уменьшение ϵ' и ϵ'' с экстремумом около $-0,45$ °С. Наблюдаемое просветление связывается с возникновением пластического течения нагреваемого льда, особенно для образцов с выделенным направлением главной оптической оси кристаллов из-за термических напряжений.
2. На основе измерений диэлектрической проницаемости и расчётов радиояркостной температуры ледяного покрова с преимущественной ориентацией главной оптической оси кристаллов при изотермических условиях, когда понижение ϵ'' может возникнуть по всей толщине льда, было показано, что уменьшение $T_{\text{я}}$ может достигать ~ 30 К (на частоте 3,4 ГГц для толщины льда 1,5 м вблизи 0 °С). Выполненная оценка продемонстрировала, что эффект просветления льда может использоваться для микроволновой радиометрии объектов криосферы перед началом их таяния.
3. Понижение радиояркости снежного покрова из свежеснежного снега в разы меньше, по сравнению с ледяным покровом для рассмотренной модели снежно-ледяного покрова. Это связано с меньшим значением диэлектрических потерь в снеге, отсутствием в нём выраженной пространственной ориентации кристаллов льда, а также с ослаблением температурных механических напряжений и пластической деформации в кристаллах снега из-за их релаксации на поверхности снежинок.
4. Установлено, что уменьшение радиояркостной температуры льда связано с существенным понижением мнимой части диэлектрической проницаемости, которая может падать в длинноволновом участке микроволнового диапазона в несколько раз вблизи 0 °С. Изменение действительной части слабое и существенно не влияет на радиояркостную температуру рассмотренных структур.

Литература

1. Богородский В. В., Гаврило В. П. Лёд: Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
2. Бордонский Г. С. Возможный механизм просветления льда в микроволновом диапазоне вблизи 0 °С // Письма в Журн. техн. физики. 2024. Т. 50. № 9. С. 35–38. DOI: 10.61011/PJTF.2024.09.57567.19587.
3. Бордонский Г. С., Крылов С. Д., Поляков С. В., Рябова Л. Д. О вариациях инфракрасного излучения снежно-ледяного покрова // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 6. С. 83–87.
4. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д. «Просветление» льда в микроволновом диапазоне при текучести // Письма в Журн. техн. физики. 2009. Т. 35. № 22. С. 46–54.
5. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д. Электромагнитные потери пресного льда в микроволновом диапазоне при 0 °С // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 6. С. 587–592. DOI: 10.7868/S0033849414060060.
6. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Казанцев В. А., Середин Д. В. Экспериментальное обнаружение просветления пресного льда в оптическом диапазоне вблизи 0 °С // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. № 10. С. 1374–1379. DOI: 10.61011/OS.2023.10.56889.5302-23.
7. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М: Физматгиз, 1963. 403 с.
8. Бычкова И. А., Платонова Е. В., Смирнов В. Г. Особенности совместного использования спутниковых данных видимого диапазона и радиолокационных данных для мониторинга арктических айсбергов на примере района Земли Франца-Иосифа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 2. С. 191–205. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205.
9. Глушнев В. Г., Слущер Б. Д., Финкельштейн М. И. Об изменении затухания радиоволн восьмимиллиметрового диапазона в морском и пресноводном льдах и снеге // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19. № 9. С. 1305–1307.
10. Гурулев А. А. Радиотепловое излучение ледяных покровов пресных и слабосоленых водоемов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2005. 125 с.
11. Клепиков И. Н., Шарков Е. А. Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных неизотермических сред // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3–15.
12. Климов В. В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009. 480 с.

13. Тихонов В. В., Раев М. Д., Хвостов И. В. и др. Анализ сезонной зависимости яркостной температуры ледового щита Антарктиды по микроволновым спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 14–28. DOI: 10.31857/S0205-96142019114-28.
14. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
15. Burniston D. A., Strachan W. J. M., Hoff J. T., Wania F. Changes in surface area and concentrations of semi-volatile organic contaminants in aging snow // Environmental Science and Technology. 2007. V. 41. No. 14. P. 4932–4937. DOI: 10.1021/es0706450.
16. Kunz L., David G. L. Melt detection in Antarctic ice shelves using scatterometers and microwave radiometers // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. No. 9. P. 2461–2469. DOI: 10.1109/tgrs.2006.874138.
17. Li G., Chen X., Lin H. et al. Glacier melt detection at different sites of Greenland ice sheet using dual-polarized Sentinel-1 images // Geo-spatial Information Science. 2024. V. 27. No. 3. P. 728–743. DOI: 10.1080/10095020.2023.2252034.
18. Tikhonov V. V., Romanov A. N., Khvostov I. V. et al. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // Russian Arctic. 2022. V. 2. No. 17. P. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71.

Assessment of the effect of ice “bleaching” near 0 °C on brightness temperature of snow and ice covers at long centimeter wavelengths

V. A. Kazantsev, G. S. Bordonskiy

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita 672002, Russia
E-mail: lgc255@mail.ru*

Calculations of brightness temperature of snow and ice covers have been performed based on laboratory measurements of the dielectric constant of ice and snow in a resonator at frequencies of 3.4 GHz and 5.5 GHz near 0 °C. The obtained results show a decrease in the imaginary part of the relative complex dielectric constant of ice and snow in the temperature range of –0.3...–0.1 °C. This leads to the effect of “bleaching” of ice (reduction of its electromagnetic losses) and a decrease in the brightness temperature of formations such as snow and ice covers. The maximum value of the decrease in the imaginary part of relative dielectric constant occurred in the case when the electric field intensity vector was parallel to the basic planes of ice crystals. In laboratory measurements, a fivefold decrease was found in the resonator at a temperature of –0.2 °C. It follows from the calculations that under isothermal conditions, when the effect of “bleaching” occurs throughout the entire thickness of the ice cover, the result can be a decrease in brightness temperature of the object by ~30 K at an ice thickness of 1.5 m at the studied frequencies. The “bleaching” of snow turned out to be less compared to ice. In this case, the change in brightness temperature is ~6 K at snow thickness of 0.25 m and 0.5 m, which is associated with lower dielectric losses of snow and chaotic spatial arrangement of the main optical axis of ice crystals. Possible experimental evidence of the effect in remote sensing data and its physical causes are considered.

Keywords: dielectric constant, brightness temperature, ice, snow, bleaching, radiometry

Accepted: 09.01.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-259-267

References

1. Bogorodsky V. V., Gavrilov V. P., *Led: Fizicheskie svoystva. Sovremennye metody glyaciologii* (Ice: Physical properties. Modern methods of glaciology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980, 384 p. (in Russian).
2. Bordonskiy G. S., Possible mechanism of ice clarification in the microwave range near 0 °C, *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2024, V. 50, No. 9, pp. 35–38 (in Russian), DOI: 10.61011/PJTF.2024.09.57567.19587.

3. Bordonskiy G. S., Krylov S. D., Polyakov S. V., Ryabova L. D., On variations of infrared radiation of the snow and ice cover, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1988, No. 6, pp. 83–87 (in Russian).
4. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D., Ice clarification in the microwave range near the yield point, *Technical Physics Letters*, 2009, V. 35, No. 11, pp. 1047–1050, DOI: 10.1134/S1063785009110224.
5. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D., Electromagnetic loss of fresh ice in microwave range at a temperature of 0 °C, *J. Communications Technology and Electronics*, 2014, V. 59, No. 6, pp. 536–540, DOI: 10.1134/S1064226914060060.
6. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Kazantsev V. A., Seredin D. V., Experimental detection of bleaching of fresh ice in the optical range near 0 °C, *Optics and Spectroscopy*, 2023, V. 131. No. 10, pp. 1306–1310, DOI: 10.61011/EOS.2023.10.57760.5302-23.
7. Brandt A. A., *Issledovanie dielektrikov na sverhvyssokih chastotah* (Research of dielectrics at ultrahigh frequencies), Moscow: Fizmatgiz, 1963, 403 p. (in Russian).
8. Bychkova I. A., Platonova E. V., Smirnov V. G., Features of the joint use of visible-range satellite and satellite radar data for monitoring arctic icebergs based on data from Franz Josef Land area, *Arctic and Antarctic Research*, 2023, V. 69, No. 2, pp. 191–205 (in Russian), DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205.
9. Glushnev V. G., Slutsker B. D., Finkelshtein M. I., On the change in attenuation of radio waves of the eight-millimeter range in marine and freshwater ice and snow, *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 1976, V. 19, No. 9, pp. 1305–1307 (in Russian).
10. Gurulev A. A., *Radioteplovoe izluchenie ledyanykh pokrovov presnykh i slabosolenykh vodoemov: Diss. kand. fiz.-mat. nauk* (Radiothermal radiation of ice sheets of fresh and slightly saline reservoirs, Cand. ph.-math. sci. thesis), Moscow, 2005, 125 p. (in Russian).
11. Klepikov I. N., Sharkov E. A., Theoretical studies of intrinsic radiation of inhomogeneous nonisothermal media, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1992, No. 6, pp. 3–15 (in Russian).
12. Klimov V. V., *Nanoplazmonika* (Nanoplasmonics), Moscow: Fizmatlit, 2009, 480 p. (in Russian).
13. Tikhonov V. V., Raev M. D., Khvostov I. V. et al., Analysis of the seasonal dependence of the brightness temperature of the ice sheet of Antarctica by microwave satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 1, pp. 14–28 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205-96142019114-28.
14. Sharkov E. A., *Radioteplovoe distancionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy: v 2 t.* (Radiothermal remote sensing of the Earth: physical foundations: in 2 V.), V. 1, Moscow: IKI RAN, 2014, 544 p. (in Russian).
15. Burniston D. A., Strachan W. J. M., Hoff J. T., Wania F., Changes in surface area and concentrations of semivolatile organic contaminants in aging snow, *Environmental Science and Technology*, 2007, V. 41, No. 14, pp. 4932–4937, DOI: 10.1021/es0706450.
16. Kunz L., David G. L., Melt detection in Antarctic ice shelves using scatterometers and microwave radiometers, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, V. 44, No. 9, pp. 2461–2469, DOI: 10.1109/tgrs.2006.874138.
17. Li G., Chen X., Lin H. et al., Glacier melt detection at different sites of Greenland ice sheet using dual-polarized Sentinel-1 image, *Geo-spatial Information Science*, 2024, V. 27, No. 3, pp. 728–743, DOI: 10.1080/10095020.2023.2252034.
18. Tikhonov V. V., Romanov A. N., Khvostov I. V. et al., Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data, *Russian Arctic*, 2022, V. 2, No. 17, pp. 44–71, DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71.