

УДК 528.88

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-532-541

Для цитирования: Изучение фактора потерь льда наледи из пресной воды в миллиметровом диапазоне / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, А. О. Орлов, С. В. Цыренжапов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 3. С. 532–541. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-532-541.

For citation: Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V. [Studying the factor of ice of icing field loss from fresh water in the millimeter range]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 3, P. 532–541. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-532-541.

Изучение фактора потерь льда наледи из пресной воды в миллиметровом диапазоне

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

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Российская Федерация, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а
*E-mail: lgc255@mail.ru

В работе измерено затухание микроволнового излучения в искусственно образованной наледи на ледяном покрове пресноводного озера в миллиметровом диапазоне. Измерения выполнены с использованием микроволновой радиометрии на частотах 22, 34, 90 и 125 ГГц при циклическом изменении температуры окружающей среды в интервале от -19 до -31 °С. Использована специальная методика, позволяющая по приращениям радиояркостной температуры между наледью и покровом без наледи определить затухание в ней микроволнового излучения. В предложенной методике находили фактор потерь при условии, если затухание в наледи определяется электромагнитными потерями в среде. Измерения проводили на ледяном покрове пресного озера с минерализацией вод около 100 мг/л. В результате исследования установлено, что на формирование излучения наледью сильно влияет рассеяние на неоднородностях среды. Этот вывод сделали из сравнения расчетов ожидаемого фактора потерь льда наледи и полученных данных из измерений по используемой методике. Наибольшее различие фактора потерь (в несколько десятков раз) обнаружено на частотах 90 и 125 ГГц. Высказано предположение, что рассеяние излучения возникает на кристаллогидратах солей и может быть вызвано повышенной электропроводностью тонких пленок воды на поверхности кристаллов. Эта особенность может возникать, как было недавно установлено, при образовании в среде кристалликов льда 0. Этот лед образуется из глубоко переохлажденной воды при температурах ниже -23 °С. Обнаруженный эффект представляет интерес для развития радарных измерений пресных природных льдов при низких температурах и малых концентрациях в них солей (порядка 100 мг/кг). Такие льды могут образовываться из слабосоленой воды с содержанием солей до нескольких граммов на литр или при замерзании воды с минерализацией ~ 100 мг/л в замкнутом пространстве. Полученные результаты интересны для микроволнового аэрокосмического определения областей ледяного покрова с его нарушениями структуры, через которые вода водоема может проникнуть на поверхность льда с последующим замерзанием. При этом радары могут быть эффективными при температурах наледей ниже -20 °С, когда жидкие включения практически полностью вымерзают. Для области температур выше точки эвтектики, где появляются жидкие включения, достаточно эффективными могут быть пассивные радиометрические измерения.

Ключевые слова: наледь, микроволновая радиометрия, радарные измерения, диэлектрическая проницаемость, лед 0.

Studying the factor of ice of icing field loss from fresh water in the millimeter range

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

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS
16a, Nedorezova St., Chita, 672014, Russian Federation
*E-mail: lgc255@mail.ru

In this work, the attenuation of microwave radiation in an artificially formed icing field on the ice cover of a freshwater lake was measured in the millimeter range. The measurements were made using microwave radiometry at frequencies of 22, 34, 90, and 125 GHz with a cyclic change in the ambient temperature in the range from -19 to -31 °C. A special technique was used, which makes it possible to determine the attenuation of microwave radiation in it from the increments of radio brightness temperature between ice cover and without icing field. In the proposed method, the loss factor was found under the condition that attenuation in ice is determined by electromagnetic losses in the medium. The measurements were carried out on the ice cover of a fresh lake with a water salinity of about 100 mg/l. As a result of the study, it was found that the formation of radiation by ice is strongly influenced by scattering on inhomogeneities of the medium. This conclusion was made from a comparison of the calculations of the expected ice loss factor of icing field and the data obtained from measurements by the method used. The greatest difference in the loss factor (several tens of times) was found at frequencies of 90 and 125 GHz. It has been suggested that radiation scattering occurs on crystalline hydrates of salts and can be caused by increased electrical conductivity of thin water films on the surface of crystals. This feature can arise, as was recently established, during the formation of ice 0 crystals in the medium. This ice is formed from deeply supercooled water at temperatures below -23 °C. The observed effect is of interest for the development of radar measurements of fresh natural ice at low temperatures and low concentrations in salts (about 100 mg/kg). Such ice can form from slightly salty water with a salt content of up to several grams per liter or when water with a salinity of ~ 100 mg/l freezes in a confined space. The results obtained are of interest for microwave aerospace determination of areas of the ice cover with its structural disturbances, through which the water of the reservoir can penetrate to the ice surface with subsequent freezing. At the same time, radars can be effective at icing field temperatures below -20 °C, when liquid inclusions almost completely freeze out. For the temperature range above the eutectic point, where liquid inclusions appear, passive radiometric measurements can be effective.

Keywords: icing field, microwave radiometry, radar measurements, permittivity, ice 0.

Введение

Изучение характеристик природной среды с использованием аэрокосмических методов измерений в миллиметровом диапазоне представляется перспективным из-за достижения более высокого пространственного разрешения по сравнению с широко используемыми системами дециметровых и сантиметровых волн [1]. Большой интерес представляет знание характеристик льда и мерзлых структур в связи с их быстрой изменчивостью и возможностью определения динамики природных структур, в том числе их использования как индикаторов состояния природной среды [2]. При этом изменение электромагнитных характеристик, определяемых значениями диэлектрической проницаемости льда, позволяет определить влияние температуры среды, диффузию загрязнений, характеристики включений и иных воздействий на объект исследования и, следовательно, его более разнообразные характеристики (предысторию роста и деградации структуры, фазовый состав, влияние метеорологических параметров и др.).

Частным примером являются характеристики замерзших слоев ледяных образований – ледяных и снежных покровов, а также наледей на реках, водохранилищах, карьерах и иных образований, где наблюдаются выходы подземных вод [3].

Микроволновые характеристики льда в зависимости от частоты и температуры достаточно хорошо исследованы [4–6]. Изучено влияние минерализации на относительную диэлектрическую проницаемость (ϵ'). Вместе с тем исследование изменений ее мнимой части, фактора потерь (ϵ'') для разнообразных объектов изучено недостаточно. В работе [7] было замечено, что при циклическом изменении температуры пресного льда от -5 до -24 °С за три месяца измерений значение фактора потерь пресного льда на частотах 13 и 37 ГГц испытывало гистерезис. Эта величина могла медленно изменяться в 1,5 раза, что связано с трансформацией жидких солевых включений в среде. Однако детально этот механизм не исследован. Вопрос о значении потерь свежобразованного льда в микроволновом диапазоне представляет особый интерес для радиометрии ледяных структур (наледей, ледяных покровов в начальной стадии их образования, при перемерзании талых структур) из-за сильного влияния малых концентраций жидкости на радиояркостную температуру [4; 6; 8]. Особенно сильные вариации фактора потерь можно ожидать в миллиметровом диапазоне из-за повышенного погонного затухания излучения и влияния на него структурной трансформации солевых включений.

В настоящей работе выполнено измерение затухания микроволнового излучения в миллиметровом диапазоне искусственной наледи, образованной в зимнее время на поверхности пресного ледяного покрова озера (с минерализацией вод водоема около 100 мг/л) при экстремально низкой температуре. Такие исследования, насколько нам известно, ранее не выполнялись. Наблюдения проводили в течение двух суток с момента образования наледи при температуре воздуха ниже -19 °С и при циклическом суточном изменении температуры льда с минимальным значением -31 °С.

Методика измерений

На рис. 1 представлена схема измерений фактора потерь искусственной наледи (1) на поверхности ледяного покрова (2) с использованием измерений радиояркостной температуры микроволновым радиометром (3). Особенность методики заключалась в том, что из-за равенства действительной части диэлектрической проницаемости льда ледяного покрова и наледи коэффициент отражения мощности излучения (R) одинаков от поверхностей раздела (4) и (5). В результате имеется возможность достаточно точно определять электромагнитные потери и их изменение от температуры и во времени льда наледи по измерениям приращений радиояркостной температуры.

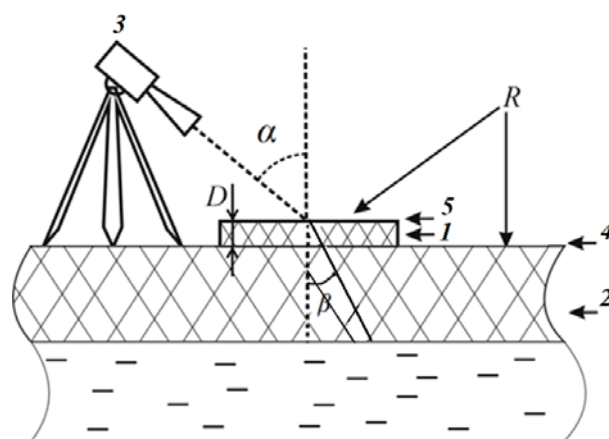


Рис. 1. Схема измерений фактора потерь искусственной наледи на поверхности ледяного покрова:

D – толщина наледи; α – угол наблюдения, равный углу преломления;
 β – угол падения теплового излучения из льда на границу наледи – воздух

Fig. 1. Scheme for measuring the loss factor of artificial icing field on the surface of the ice cover:

D is the icing field thickness; α is the observation angle equal to the angle of refraction;
 β is the angle of incidence of thermal radiation from ice onto the ice – air boundary

Наледь образовывали из воды озера путем заливки водой соответствующего ограждения. Для этого устанавливали ограничители по периметру квадрата, на дно которого помещали полиэтиленовую пленку для предотвращения миграции солевых включений из воды наледи при их возможной миграции в нижележащий слой. Сигналы приборов и температуру наледи (T_0) регистрировали при помощи системы сбора информации Agilent. Точность измерения температуры составляла 1°C .

Измерения выполнены на частотах 22, 34, 94, 125 ГГц на наледи с плоскими границами и площадью поверхности 1 м^2 . При этом минерализация верхнего слоя ледяного покрова озера составляла значение порядка 10 мг/кг . Четыре радиометра с флуктуационной чувствительностью $0,05\text{ К}$ при постоянной времени 4 с размещали на передвижной платформе, которую последовательно передвигали между участками с наледью, ледяным покровом без снега и металлическим листом. Для калибровки радиометров использовали открытую водную поверхность проруби и отраженное излучение неба от металлического листа, площади и размеры которых соответствовали наледи. Измерения были выполнены при безоблачной атмосфере. В этой схеме проводили сравнение радиояркой температуры наледи (T_H), образованной на поверхности ледяного покрова (т. е. суммарного излучения слоя наледи и ледяного покрова на воде) и очищенного от снега ледяного покрова (T_L). Отметим, что снежный покров перед образованием наледи был тщательно удален, а поверхность льда выравнена от шероховатостей. Фотография установки показана на рис. 2.



Рис. 2. Фотография установки для измерения фактора потерь искусственной наледи

Fig. 2. Photo of the installation for measuring the loss factor of artificial icing field

Как отмечалось выше, идея эксперимента заключалась в определении значения приращения радиоярких температур ($T_H - T_L$), по которому определяли коэффициент передачи мощности радиотеплового излучения (G) через наледь. По значениям G , находили потери (L): $L = \frac{1}{G}$ в слое D' , который определяется законом преломления Снеллиуса: $D' = \frac{D}{\cos\alpha}$. В настоящей работе сравнивали ϵ'' для D' , поэтому использовали данные для L , отнесенные к этой длине. Угол наблюдения α и поляризацию принимаемого излучения задавали исходя из целей измерений.

По близкой методике, с использованием приращения радиояркой температуры, определяли значение ϵ'' пресного льда, например, в работах [4; 2].

$T_{\text{Л}}$ связана с мощностью излучения, распространяющегося через границу (4), причем ниже этой границы (в среде) $T_{\text{Л}}'' = \frac{T_{\text{Л}}}{1-R}$, где R - коэффициент отражения по мощности от границы лед – воздух.

Для экстремально малых значений ε'' пресного льда и равенства ε' для наледи и ледяного покрова отражение на границе между покровом и наледью отсутствует (т. е. R одинаков для границ наледь – воздух и ледяной покров – воздух), а для границы ледяной покров – наледь он равен нулю. Так как интерференционные явления в наледи отсутствуют, то выходящее под углом α излучение можно представить формулой

$$T_{\text{Н}} = \left[\frac{T_{\text{Л}}}{1-R} G + T_0 (1-G) \right] (1-R). \quad (1)$$

Здесь первое слагаемое в квадратных скобках соответствует температуре излучения, поступающего на границу лед – воздух в наледи. Второе слагаемое характеризует собственное радиотепловое излучение наледи, поступающее на ту же границу (излучение аттенюатора [9]) Сомножитель $(1-R)$ определяет прошедшую через границу раздела в верхнее полупространство мощность радиотеплового излучения.

После преобразований находим коэффициент передачи мощности через наледь под углом β :

$$G = 1 - \frac{\Delta T_{\text{я}}}{T_0 (1-R) - T_{\text{Л}}}, \quad \text{где } \Delta T_{\text{я}} = T_{\text{Н}} - T_{\text{Л}}. \quad (2)$$

Из этой формулы следует отсутствие необходимости учета отраженного излучения неба, так как оно автоматически обнуляется (при равенстве R для ледяного покрова и наледи). Фактор потерь определяем из (2) для случая $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$ из формулы [10] для поглощения:

$N(\text{дБ}) = 10 \lg L = 8,68 \left(\frac{\pi}{\lambda_0} \right) \sqrt{\varepsilon' \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}} D'$, где λ_0 – длина волны в свободном пространстве. После преобразований

$$\varepsilon'' = \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon'} \lg L}{0,868 \pi D'} \quad (3)$$

Фактор потерь определяется толщиной наледи и потерями в слое, в котором распространяется излучение под углом β . И для случая $D = 0,04$ м и $\alpha = 45^\circ$, используемые в эксперименте, $\varepsilon'' \approx 14,3 \lambda_0 \lg L$.

В предложенной методике при определении приращения $\Delta T_{\text{я}}$ удастся повысить точность измерений ε'' , так как в значительной мере устраняется влияние дрейфа параметров радиометров, а также изменений температуры излучения неба. Знаменатель второго члена уравнения (2) имеет значение несколько десятков градусов. Ошибка в определении $T_{\text{Л}}$ в несколько градусов дает погрешность G не более 10 %. T_0 – определяли с помощью температурного датчика, помещенного в наледь с точностью $\sim 0,1$ °С.

Результаты измерений

Исследования проводили с 1 по 3 февраля 2019 г. на пресном озере Арахлей (Забайкальский край) в регионе с резкоконтинентальным климатом. Толщина льда при измерениях 117 см. Толщина наледи 4 см. Измерения выполняли на горизонтальной поляризации при угле наблюдения 45° . Для этого случая $R = 0,14$ при ε' льда 3,15. Расстояние от антенн радиометров наледи $\sim 0,5$ м. Температура льда наледи в дни измерений изменялась в пределах от -19 до -31 °С, скорость ветра 3...5 м/с.

Эксперименты начинали после девятичасовой выдержки воды в матрице для образования наледи. Измерения выполняли с интервалом 1 ч, регистрировали приращения радиояркости от температуры и времени. Изменение температуры определялось ее суточным ходом. Результаты измерений в виде зависимостей потерь пропускания в наледи приведены на рис. 3 для частот 34 и 125 ГГц.

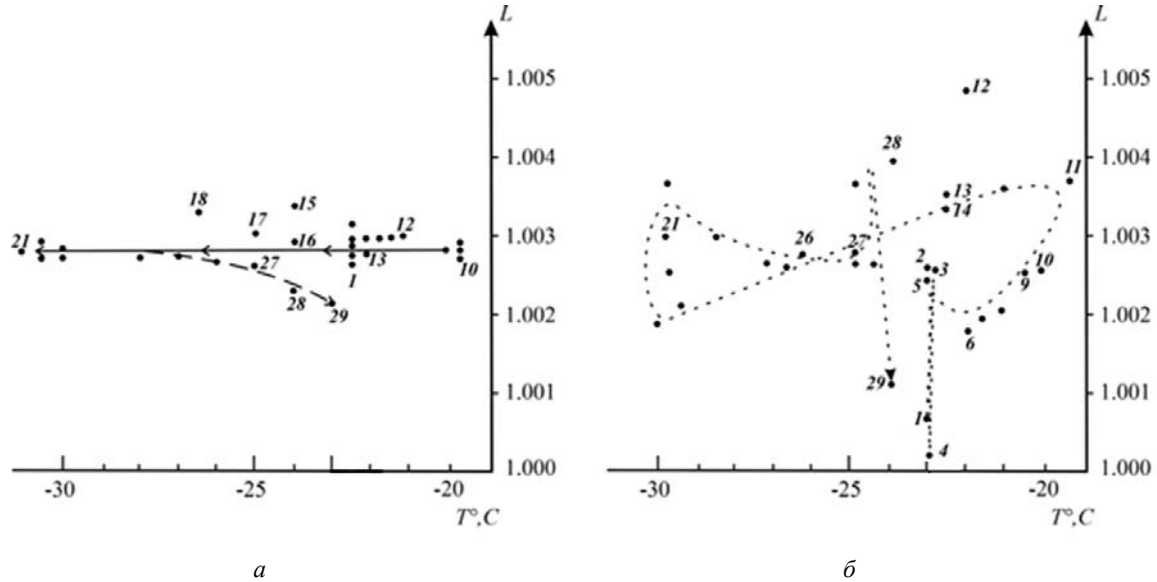


Рис. 3. Зависимости потерь пропускания от времени (последовательность отмечена цифрами: 1 – начало измерений; 29 – завершение измерений) на частотах: а – 34 ГГц; б – 125 ГГц

Fig. 3. Dependences of transmission losses on time (the sequence is marked with numbers: 1 – beginning of measurements; 29 – completion of measurements) at frequencies: a – 34 GHz; b – 125 GHz

Представляет интерес сравнение имеющихся в литературе данных ϵ'' пресного льда [11] с полученными результатами. На рис. 4 приведены средние значения ϵ'' в слое льда наледи, найденное с использованием формулы (3) по значениям L в зависимости от логарифма частоты.

Также приведены результаты измерений фактора потерь на третьи сутки наблюдений, когда произошла стабилизация L . Его значения, представлены для температуры льда $-25\text{ }^\circ\text{C}$.

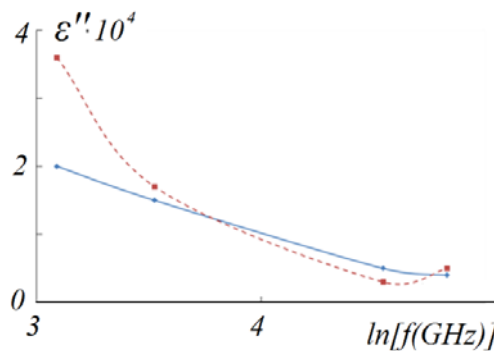


Рис. 4. Средние значения ϵ'' льда наледи за время наблюдения в зависимости от натурального логарифма частоты (сплошная линия); значения фактора потерь при температуре $-25\text{ }^\circ\text{C}$ через 2,5 суток после образования наледи (штриховая линия)

Fig. 4. Mean values of ϵ'' of icing ice during the observation time depending on the natural logarithm of the frequency (solid line); values of the loss factor at a temperature of $-25\text{ }^\circ\text{C}$ 2.5 days after the formation of ice (dashed line)

Обсуждение результатов

При постановке экспериментов использовали представление о том, что затухание радиотеплового излучения определяется потерями в среде. Однако во многих случаях требуется учет рассеяния излучения на внутренних неоднородностях объекта [2]. Зависимость ε'' от частоты (рис. 4) показывают уменьшение этой величины по мере возрастания частоты. Расчеты по формулам работ [6; 12] дали значение фактора потерь для чистого льда приблизительно в 3 раза выше на частоте 22 ГГц, в 10 раз выше для 34 ГГц и в 20...100 раз выше на частотах 90–125 ГГц, т. е. ε'' однородного льда возрастает с частотой. Кроме того, следует учитывать, что лед наледи исследуемого озера приблизительно на порядок больше содержит солевых включений, поэтому в природной среде ожидается еще более высокое значение ε'' . Однако оно будет проявляться при температурах выше $-21,4$ °С (температура эвтектики хлорида натрия) – основного солевого компонента воды озера, когда включения солей присутствуют в виде жидких капсул и пленок между кристаллитами. В случае образования кристаллогидратов считается, что потери среды близки случаю чистого льда.

Очевидная причина обнаруженной особенности связана с существенным рассеянием излучения. При измерениях наблюдали положительное приращение $(T_H - T_L)$ в большинстве случаев, что указывает на преобладание вклада от электромагнитных потерь в формировании потока радиотеплового излучения. Эффекты рассеяния, очевидно, ослабевают при понижении частоты, и наиболее контрастной при данном механизме формирования излучения наледь будет на частотах ниже 22 ГГц. Это наблюдали на частоте 13,5 ГГц в работе [3], где приращения радиояркостной температуры на льду (с наледями) карьера в береговой зоне в зимнее время при температурах выше -20 °С достигали десятков градусов Кельвина.

Для объяснения сильного рассеяния на частотах 90–125 ГГц высказано предположение, что рассеяние возникает на мелких кристалликах кристаллогидратов из солей, имеющихся в исходной воде [13] наледи. То, что образование кристаллогидратов приводит к рассеянию, следует из рис. 3, где вблизи температуры эвтектики хлорида натрия ($-21...-22$ °С) наблюдали уменьшение L . Предполагаемый конкретный механизм этого эффекта следующий. При понижении температуры ниже точки эвтектики в среде из жидкой воды возникает переходная фаза от переохлажденной воды ко льду Ih, названная льдом 0 [14]. Для наноразмерных кристаллов льда 0 температуры его образования оказываются ниже -23 °С. Это значение может варьироваться в некоторых пределах в зависимости от объема и геометрии мерзлого образования. То же для процесса нагревания такого льда, когда выше точки фазового перехода он превращается в лед Ih.

Эта модификация льда была экспериментально обнаружена в [15]. Лед 0 сегнетоэлектрик и на границе этого льда с диэлектриками возникает слой с высокой электропроводностью, что было установлено [16]. Малые частицы, покрытые проводящим слоем, являются сильными рассеивателями из-за плазмонного резонанса в слоях проводника наноразмерной толщины [17]. Причем рассеяние возникает на частотах ниже плазменной частоты и простирается до нулевых частот. В связи с этим высказана, например, гипотеза, что свечение «серебристых» облаков, образующихся в атмосфере на высотах 80–90 км, связано с конденсацией на пылевых частицах, покрытых льдом 0 [18]. На них и происходит рассеяние солнечного излучения. Если после образования льда 0 в структуре льда наледи температура повысится от точки его образования, то в среде будет проявляться трансформация кристаллогидратов и возникнут жидкие включения (слабо проводящие). При этом и рассеяние будет ослаблено, а потери возрастут [19]. Поэтому для теплого льда (с температурами выше $-20...-18$ °С) даже с небольшой концентрацией солей у наледи будет иметь место повышенное значение L , определяемое поглощением. Соответственно, будет наблюдаться также и повышенное значение радиояркостной температуры.

Наличие снежного покрова усложняет анализ и требует специального исследования.

Заключение

1. Выполненное исследование микроволновых характеристик пресноводной наледи сантиметровых толщин при температурах ее существования $-19...-31$ °С в миллиметровом диапазоне на частотах 22–125 ГГц выявило сильное рассеяние излучения, особенно в высокочастотной части данного участка.

2. Эффект связывается с образованием кристаллогидратов хлорида натрия, основного компонента воды исследуемого водоема, при температуре $-21,4$ °С и возникновением тонких слоев воды на поверхности кристаллогидратов с их последующим замерзанием с образованием мелких кристаллов льда 0. Также кристаллы (даже нанометровых размеров) при контакте с диэлектрической средой (воды или кристаллов льда Ih и кристаллогидратов) образуют нанометровые слои с весьма высокой электропроводностью, что приводит к сильному рассеянию излучения в миллиметровом диапазоне.

3. На частотах ниже 20 ГГц эффект рассеяния на включениях малых размеров (микро и нано) в пресных льдах должен существенно уменьшаться, поэтому «холодная» наледь будет слабо выделяться на фоне ледяного покрова. Однако при температурах выше точки эвтектики солей радиояркая температура наледи будет возрастать во всех диапазонах из-за существования включений в жидком состоянии. Температурная граница между двумя областями определяется химическим составом воды, т. е. точками эвтектики солей. Для хлорида натрия это значение находится вблизи $-21...-22$ °С (в зависимости от влияния других солей).

4. Рассеяние излучения для «холодной» наледи при температурах образования льда 0 (т. е. ниже -23 °С) позволяет использовать для обнаружения наледей из пресной воды радары миллиметрового диапазона (на частотах 90–125 ГГц).

Библиографические ссылки

1. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы : в 2 т. Т. 1. М. : ИКИ РАН, 2014. 544 с.
2. Бордонский Г. С. Электромагнитное излучение криогенных природных сред : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Чита, 1994. 321 с.
3. Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Влияние наледей на радиотепловое излучение пресных ледяных покровов // Естественные и технические науки. 2018. № 8(122). С. 109–111.
4. Matzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies // J. Phys. D.: Appl. Phys. (UK). 1987. P. 1623–1630.
5. A summary of the complex dielectric permittivity of ice in the megahertz range and its applications for radar sounding of polar ice sheets / S. Fujita, T. Matsuoka, T. Ishida et al. // In Physics of Ice Core Records. Edited by Takeo Hondoh. 2000. Hokkaido University Press. P. 185–212.
6. Бордонский Г. С. Диэлектрические потери пресного льда на СВЧ // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, № 11. С. 1620–1622.
7. Bordonski G. S., Krylov S. D. Loss factor behavior of freshwater ice at 13.5 and 37.5 GHz // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. Vol. 36, No. 2. P. 678680.
8. Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период ледостава / В. В. Тихонов, И. В. Хвостов, А. Н. Романов, Е. А. Шарков и др. // Исследование Земли из космоса. 2020. № 3. С. 59–76. DOI: 10.31857/S0205961420030070.
9. Краус Д. Радиоастрономия : перевод с англ. В. Т. Федорова / под ред. проф. В. В. Железнякова. М. : Сов. Радио. 1973. 456 с.
10. Богородский В. В., Гаврило В. П. Лед: Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л. : Гидрометеиздат. 1980. 384 с.
11. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) / Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, А. О. Орлов, С. В. Цыренжапов

// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 2. С. 228–240.

12. Warren S. G. Optical constants of ice from ultraviolet to the microwave // *Applied Optics*. 1984. No 23. P. 1206–1225.

13. Борзенко С. В., Замана Л. В. Гидрогеохимия Ивано-Арахлейских озер // *Геосферные исследования*. 2020. № 3. С. 69–79. DOI: 10.17223/25421379/16/6.

14. Russo J., Romano F., Tanaka Y. New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water // *Nature Materials*. 2014. Vol. 13, No. 7. P. 733–739. DOI:10.1038/nmat3977.

15. Бордонский Г. С., Крылов С. Д., Гурулев А. А. Лёд 0 в природной среде. Экспериментальные данные и предполагаемые области его существования // *Лёд и снег*. 2020. Т. 60, № 2. С. 263–273. DOI: 10.31857/S2076673420020039.

16. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil / S. M. Korobeynikov, A. V. Melekhov, Yu. G. Soloveitchik et al. // *Journ. of Physics. D: Applied Physics*. 2005. Vol. 38, No 6. P. 915–921.

17. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М. : Мир, 1986. 664 с.

18. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O. The possibility of observing noctilucent clouds in microwave radiometric measurements. Proc. SPIE 11208. 25th International symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric Physics. P. 1120818 (18 December 2019). DOI: 10.1117/12.2539769.

19. Meissner T. Wentz F. J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2004. Vol. 42, No. 9. P. 1836–1849. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888.

References

1. Sharkov E. A. *Radioteplovoye distantsionnoye zondirovaniye Zemli: fizicheskiye osnovy* [Radiothermal remote sensing of the Earth: physical foundations]. Moscow, IKI RAN Publ., 2014, 544 p. (In Russ.).

2. Bordonskiy G. S. *Elektromagnitnoye izlucheniye kriogennykh prirodnykh sred* [Electromagnetic radiation of cryogenic natural environments. Dr. diss.]. Chita, 1994, 321 p. (In Russ.).

3. Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V. [Influence of icing on the radiothermal radiation of fresh ice covers]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. 2018, No. 8(122), P. 109–111 (In Russ.).

4. Matzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies. *J. Phys. D.: Appl. Phys.* (UK). 1987, P. 1623–1630.

5. Fujita S., Matsuoka T., Ishida T., Matsuoka K., Mae S. A summary of the complex dielectric permittivity of ice in the megahertz range and its applications for radar sounding of polar ice sheets. *In Physics of Ice Core Records*. Edited by Takeo Hondoh, 2000, Hokkaido University Press, P. 185–212.

6. Bordonskiy G. S. [Dielectric losses of fresh ice on microwave]. *Radiotekhnika i elektronika*. 1995, Vol. 40, No. 11, P. 1620–1622 (In Russ.).

7. Bordonski G. S., Krylov S. D. Loss factor behavior of freshwater ice at 13.5 and 37.5 GHz. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998, Vol. 36, No 2, P. 678680.

8. Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Romanov A. N. et al. [Features of the natural radiation of the Ob Bay in the L-band during the freezing period]. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2020, Vol. 3, P. 59–76 (In Russ.). DOI: 10.31857/S0205961420030070.

9. Kraus D. *Radioastronomiya* [Radio astronomy]. Ed. prof. V. V. Zheleznyakova, Moscow, Sov. Radio Publ., 1973, 456 p.

10. Bogorodsky V. V., Gavrilov V. P. *Led: Fizicheskiye svoystva. Sovremennyye metody glyatsiologii*. [Ice: Physical properties. Modern methods of glaciology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980, 384 p.

11. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V. [Difference between radar and radiometric measurements (on the example of the ice cover of a eutrophic lake)]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, Vol. 11, No. 2, P. 228–240 (In Russ.).
12. Warren S. G. Optical constants of ice from ultraviolet to the microwave. *Applied Optics*. 1984, Vol. 23, P. 1206–1225.
13. Borzenko S. V., Zamana L. V. [Hydrogeochemistry of the ivano-arakhleisky lakes]. *Geospheric Research*. 2020, Vol. 3, P. 69–79 (In Russ.). DOI: 10.17223/25421379/16/6.
14. Russo J., Romano F., Tanaka Y. New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water. *Nature Materials*. 2014, Vol. 13, No 7, P. 733–739. DOI:10.1038/nmat3977.
15. Bordonskiy G. S., Krylov S. D., Gurulev A. A. [Ice 0 in the natural environment. experimental data and supposed areas of its existence]. *Led i sneg*. 2020, Vol. 60, No. 2, P. 263–273 (In Russ.). DOI: 10.31857/S2076673420020039.
16. Korobeynikov S. M., Melekhov A. V., Soloveitchik Yu. G. et al. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil. *Journ. of Physics. D: Applied Physics*. 2005, Vol. 38, No 6, P. 915–921.
17. Boren K., Huffman D. *Pogloshcheniye i rasseyaniye sveta malymi chastitsami* [Absorption and scattering of light by small particles]. Moscow, Mir Publ., 1986, 664 p. (In Russ.).
18. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O. The possibility of observing noctilucent clouds in microwave radiometric measurements. *Proc. SPIE 11208. 25th International symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric Physics*, p. 1120818 (18 December 2019). DOI: 10.1117/12.2539769.
19. Meissner T. Wentz F. J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2004, Vol. 42, No 9, P. 1836–1849. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888.

© Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В., 2022

Бордонский Георгий Степанович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник; Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. E-mail: lgc255@mail.ru.

Гурулев Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник; Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. E-mail: lgc255@mail.ru.

Орлов Алексей Олегович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник; Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. E-mail: lgc255@mail.ru.

Цыренжапов Сергей Васильевич – младший научный сотрудник; Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. E-mail: lgc255@mail.ru.

Bordonsky Georgy Stepanovich – Dr. Sc., Professor, Chief Researcher; Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS. E-mail: lgc255@mail.ru.

Gurulev Aleksandr Aleksandrovich – Cand. Sc., Associate Professor, Senior Researcher; Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS E-mail: lgc255@mail.ru.

Orlov Aleksey Olegovich – Cand. Sc., Researcher; Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS. E-mail: lgc255@mail.ru.

Tsyrenzhapov Sergey Vasilievich – junior researcher; Institute of Natural Resources, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS. E-mail: lgc255@mail.ru.
