

УДК 556.047

DOI: 10.21209/2308-8761-2018-13-4-80-89

*Георгий Степанович Бордонский¹,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией геофизики криогенеза,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
(672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а),
e-mail: lgc255@mail.ru*

*Александр Александрович Гурулев²,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
(672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а),
e-mail: lgc255@mail.ru*

Изучение характеристик пропускания и отражения микроволнового излучения льдом вблизи температуры таяния

В работе приведены результаты лабораторных измерений коэффициента отражения, фазы отражённого монохроматического излучения от образца пресного льда и его электромагнитных потерь вблизи температуры 0°C . Измерения выполнены для блока льда, изъятых из ледяного покрова пресного озера, на частотах $8.5 \dots 13.5$ ГГц. Подтверждено существование пониженных значений поглощения мощности микроволнового излучения при его распространении через лёд и возникновении таяния среды. Установлено, что фаза отражённой волны изменяется в зависимости от температуры, она имеет различный временной ход после начала таяния блока для разных частот. Эта особенность связывается с появлением тонких слоёв увлажнённого льда на границах образца. Измерение фазы отражённых сигналов в зависимости от частоты излучения может дать дополнительную информацию о структуре зондируемых природных ледяных объектов.

Ключевые слова: лёд, микроволновый диапазон, фаза отражённой волны

Введение. При исследованиях природной среды радиофизическими методами одной из характеристик, определяемой структурными особенностями, является фаза коэффициента отражения электромагнитного излучения от поверхности раздела сред [13]. Одним из широко распространённых случаев плоских сред является поверхность льда (ледники, снежно-ледяные покровы водоёмов) [5; 7]. Измерение фазы коэффициента отражения (φ) при различных положениях летательного аппарата с радиолокационной аппаратурой и определение разности фаз двух сигналов позволяет определить деформации поверхности с точностью порядка одного миллиметра [1; 2]. В настоящее время применение радиолокации с синтезированной апертурой, где

¹Г. С. Бордонский – организатор исследования

²А. А. Гурулев формулирование выводов и обобщение итогов реализации коллективного исследования.

используется измерение фазы рассеянных сигналов, представляется весьма перспективным для решения практических задач природопользования [9].

В случае ледяной поверхности фактором, влияющим на фазу коэффициента отражения, является поверхностный слой, свойства которого могут варьировать из-за процессов таяния и замерзания. Другим важным аспектом является то, что диэлектрические параметры льда вблизи 0°C практически не исследованы. Кроме таяния и замерзания объекта, в нём могут наблюдаться особые переходные состояния льда, когда среда поглотила (или отдала) некоторое количество тепла, но ещё не перешла в жидкую (твёрдую) фазу. Поэтому процессы таяния или замерзания воды растягиваются на длительное время.

Вблизи 0°C из-за возникновения внутренних механических напряжений, предшествующих таянию, возникает аморфизация льда, что ведёт не к росту электромагнитных потерь в среде (как в случае появления вкраплений жидкой воды), а, наоборот, к их уменьшению [4]. Если аморфная фаза обладает пониженным значением ε' и ε'' – действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости [6], то возникает некоторое приращение φ и R (коэффициента отражения по мощности). Эти приращения должны иметь другие знаки, по сравнению с приращениями из-за таяния слоя льда при появлении в нём жидкой воды.

Цель настоящей работы – выполнить лабораторные измерения фазы коэффициента отражения, а также изменений пропускания и отражения от блока тающего льда для выяснения влияния на эти величины процессов таяния и аморфизации при температуре 0°C .

Эксперимент. Схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве образца использовали блок льда (1), изъятый из ледяного покрова пресного озера. Блок льда формировали в виде усечённого параллелепипеда. Его основание $\sim 50 \times 30 \text{ см}^2$, высота $\sim 50 \text{ см}$. Приготовление блока осуществляли разными способами, т. к. эффект взаимодействия излучения с образцом зависит от положения преимущественной ориентации базисных плоскостей кристаллов гексагонального льда относительно вектора электрического поля излучения [4].

В измерениях использовали векторный измеритель коэффициента передачи (2) Р4М-18 фирмы «Микран». Излучение и приём сигналов выполняли с использованием рупорных антенн (4). Детектор (3) применяли для измерения поглощения излучения в объёме льда. Образец в виде усечённого параллелепипеда использовали для устранения интерференционных явлений, возникающих при переотражении излучения от его границ. Для проведения измерений блок льда перемещали в лабораторное помещение из холодильной камеры. При температуре $\sim +20^\circ\text{C}$ начинался нагрев льда до температуры его поверхности $\sim 0^\circ\text{C}$, когда наблюдали начало таяния поверхностного слоя. Этот процесс длился до 10 часов непрерывных измерений, во время которых линейные размеры блока уменьшились на несколько сантиметров. Температуру льда измеряли терморпарой на глубине $5 \dots 10 \text{ см}$ от его поверхности. Точность измерений температуры $0,1^\circ\text{C}$. Минерализация льда составляла значение около 10 мг/кг . Для сбора информации использовали систему фирмы «Agilent».

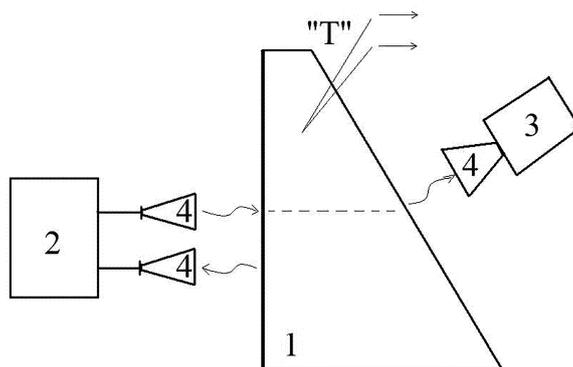


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по измерению коэффициента отражения, мощности пропускания и фазы коэффициента отражения вблизи 0°C . 1 – блок пресного льда; 2 – векторный измеритель коэффициента передачи; 3 – детектор; 4 – рупорные антенны; “Т” – термопара для измерения температуры блока льда

Fig. 1. Scheme of experimental setup for measuring reflection coefficient, transmission power and phase of the coefficient reflections near 0°C . 1 – block of fresh ice; 2 – vector image transmission coefficient meter; 3 – detector; 4 – horn antennas; “Т” – thermocouple for measuring the temperature of ice block

Результаты измерений. Были выполнены измерения φ и R в полосе частот от 8.5 ГГц до 13.5 ГГц. На рис. 2 представлены результаты измерений в одном из экспериментов в зависимости от времени. Проходящая мощность излучения (P) приведена в относительных единицах.

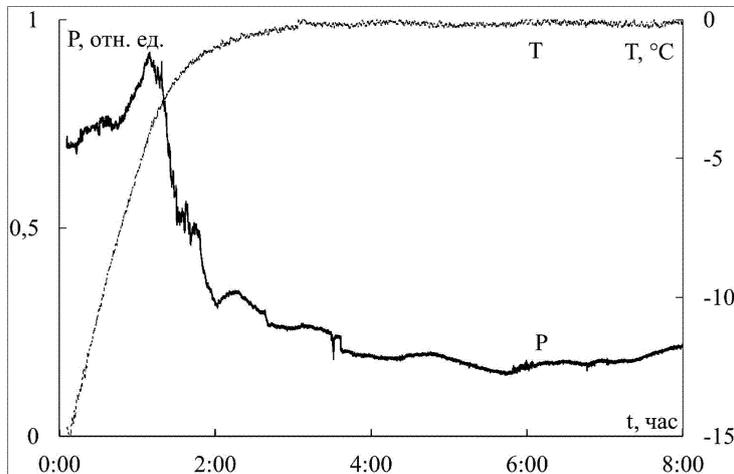


Рис. 2. Зависимость мощности излучения, проходящего через блок льда, и температуры поверхностного слоя образца от времени выдержки в лабораторном помещении. Частота 13 ГГц. Векторы электрического поля (\mathbf{E}) и направление распространения волны – т. е. волновой вектор (\mathbf{k}) параллельны базисным плоскостям кристаллов льда

Fig. 2. The dependence of the radiation power passing through the block of ice, and the surface temperature of the sample from time exposure in a laboratory room. The frequency is 13 GHz. The vectors of the electric field (\mathbf{E}) and the direction the propagation of the wave – m. e. wave vector (\mathbf{k}) parallel to the basal planes of ice crystals

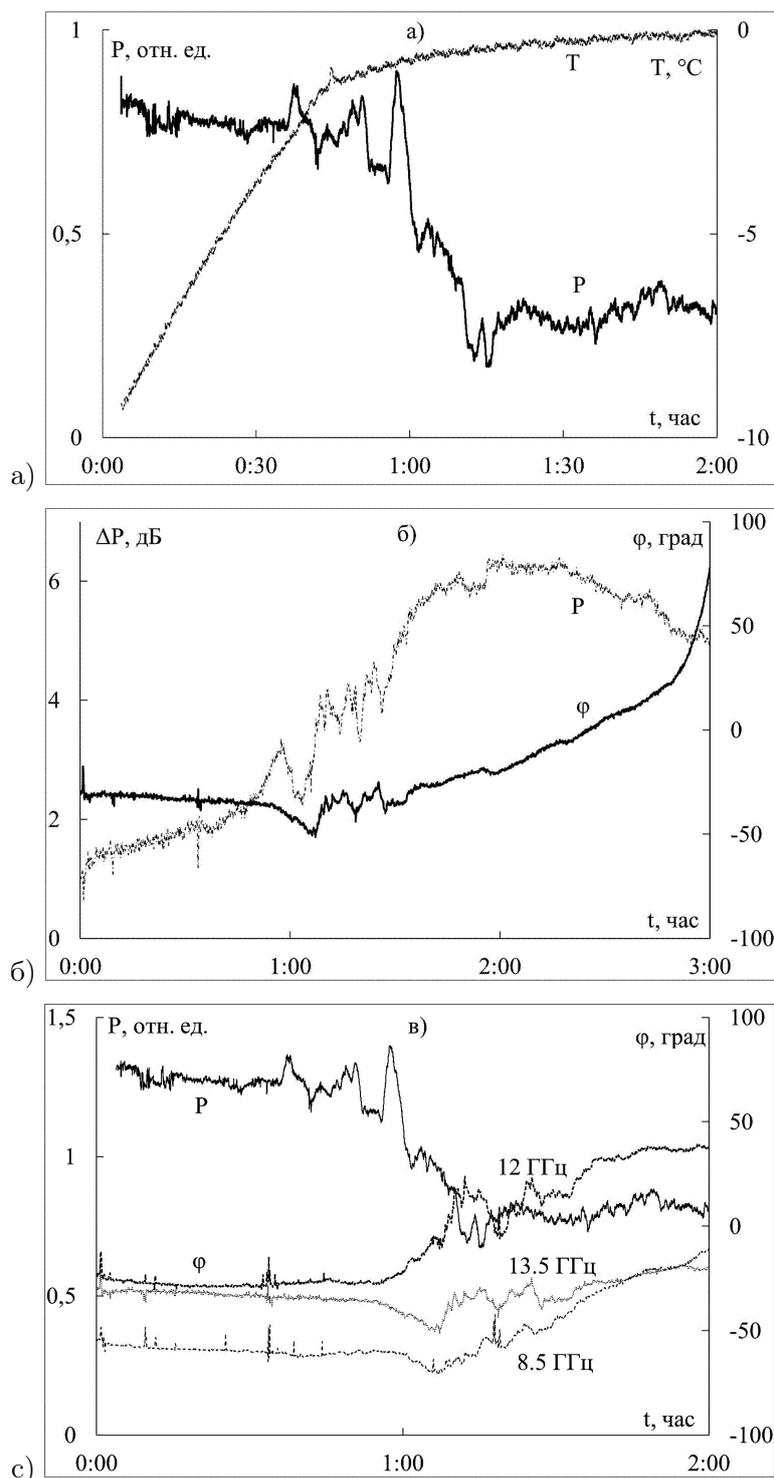


Рис. 3. Результаты измерений физических характеристик блока льда от времени: а – проходящей мощности на частоте 13 ГГц; б – измерений отражённой мощности и фазы отражённого сигнала на частоте 13.5 ГГц; в – проходящей мощности на 13.0 ГГц и фазы на трёх частотах

Fig. 3. Results of measurements of physical characteristics of block of ice on time: а – of the propagating power at a frequency of 13 GHz; б – measurements of the reflected power and the phase of the reflected signal at a frequency of 13.5 GHz; в – passing power at 13.0 GHz and phases at three frequencies

На рис. 3а приведены результаты измерений для другого образца с аналогичной ориентацией плоскости поляризации, волнового вектора и базисной плоскости кристаллов.

На рис. 3б, в приведены результаты измерений приращения фазы отражённой волны (в градусах) и изменений отражённой мощности, характеризующей вариации коэффициента отражения (в децибелах).

При выпиливании блоков льда из ледяного покрова пресного озера учитывали тот факт, что преимущественная ориентация базисных плоскостей гексагональных кристаллов расположена параллельно поверхностям ледяного покрова в средней по высоте его части [12].

На рис. 4 приведены результаты измерений проходящей мощности излучения и изменения фазы для другого образца льда.

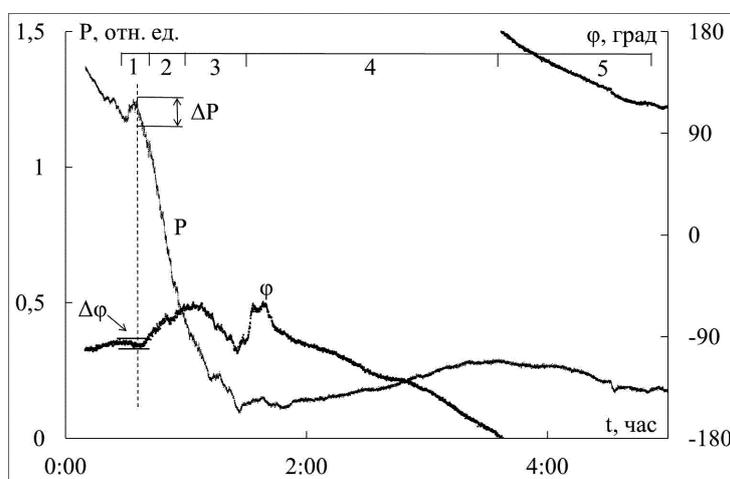


Рис. 4. Результаты измерений зависимостей от времени фазы отражённой волны и проходящей мощности тающего блока озёрного льда на частоте 13 ГГц. Выделены характерные временные интервалы: 1 – небольшое просветление среды; 2 – резкое уменьшение проходящей мощности; 3 – минимум прохождения; 4 – слабое улучшение прохождения; 5 – область активного таяния. Штриховая линия в области 1 соответствует экстремуму просветления среды

Fig. 4. The results of measurements of the time dependences phase of the reflected wave and the passing power of the melting ice lake block at a frequency of 13 GHz. Characteristic time intervals are distinguished: 1 – slight enlightenment of environment; 2 – sharp decrease in the transmitted power; 3 – minimum passing; 4 – poor passage improvement; 5 – active thawing area. A dashed line in region 1 corresponds to the bleaching extremum of the medium

Было также замечено необычное поведение температуры при приближении её к 0 °С. Результаты таких измерений представлены на рис. 5а, б.

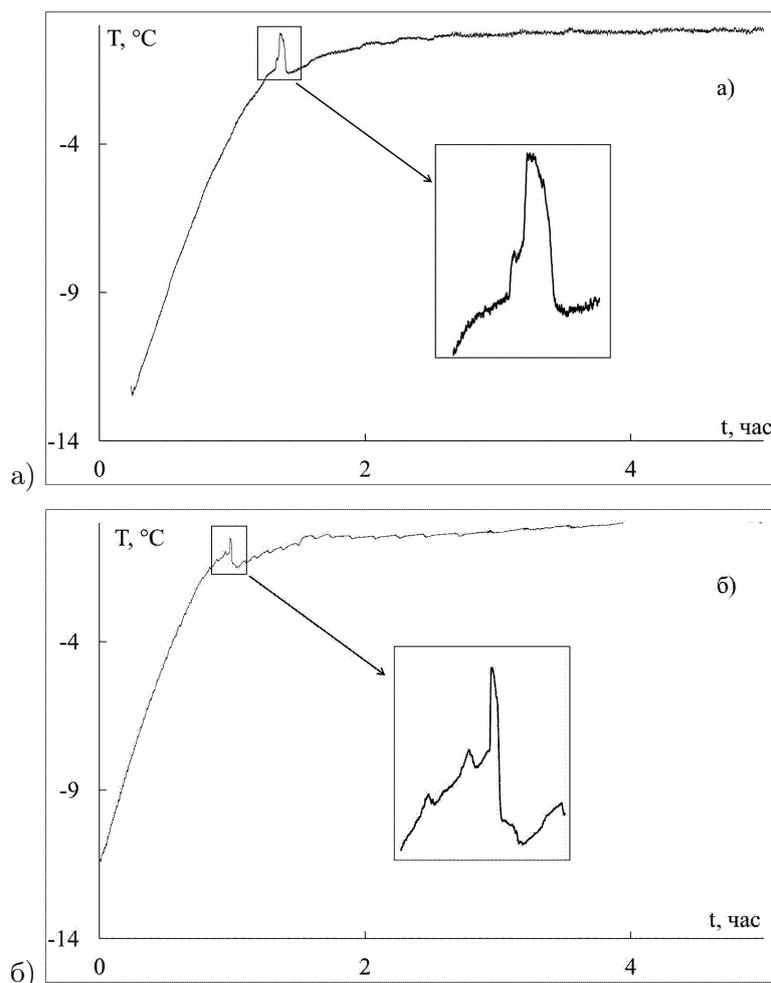


Рис. 5. Изменение температуры двух различных блоков льда на глубине $\sim 5 \dots 10$ см от поверхности при их нагревании в лабораторном помещении с температурой воздуха 20°C в зависимости от времени выдержки. На врезках — аномалии температуры поверхностного слоя блоков льда

Fig. 5. Changing of the temperature of two different ice blocks at a depth of $\sim 5 \dots 10$ cm from the surface when they are heated in a laboratory room with an air temperature of 20°C depending on the time of exposure. On inserts – temperature anomalies of the surface layer of ice blocks

Обсуждение результатов. Измерения температуры показывают некоторые аномалии при приближении её в верхнем слое к значению 0°C (рис. 3а). Аномалии выражаются в виде кратковременного перегрева слоя. Возможное объяснение можно связать с релаксацией механических напряжений, вызванных как тепловым расширением, так и началом таяния с изменением объёма вещества. При этом процессе возникает скольжение по слоям вдоль базисных плоскостей кристаллов льда [12] и высвобождение энергии из-за их трения. Данное предположение подтверждается существованием «просветления» льда в зависимости от направления вектора электрического поля волны по отношению к базисным плоскостям, отмеченное в статье [4], и подтверждённое в данной работе (рис. 2, 3а, в, 4). При этом не наблюдали существенного изменения фазы коэффициента отражения — область 1 графиков на рис. 4. Изменение $\Delta\varphi$ составило 12° , а $\Delta P \sim 10\%$.

Значение фазы заметно осциллировало в начальный момент таяния при появлении жидкой воды в области 2, 3 (рис. 4). При последующем таянии наблюдали быстрое монотонное изменение φ , определяемое таянием блока и изменением расстояния между антеннами и поверхностью блока.

Эффекты интерференции излучения ранее также исследовали в работах [3; 8; 11], где были обнаружены особенности собственного радиотеплового излучения тонких слоёв льда на водной поверхности для различных поляризаций излучения. Были также экспериментально и теоретически исследованы тонкие слои увлажнённого льда с толщинами порядка длины волны излучения, для которых установили существенное изменение фазы коэффициента отражения от структуры. Вместе с тем, для более толстых слоёв льда, характерных для природных структур, исследование не проводилось. В данной работе для блока льда толщиной в несколько десятков сантиметров обнаружена интересная особенность: в области 4 (рис. 4), где наблюдали некоторое возрастание проходящей мощности излучения, фаза коэффициента отражения не испытывала отклонений от монотонного изменения. Эту особенность можно объяснить внутренними процессами, связанными с возникновением отрицательного давления из-за таяния внутренних областей блока льда и стремлением уменьшения объёма образца при появлении жидкой воды. При этом отсутствуют резкие границы между слоями. При отрицательном давлении температура таяния повышается [10], это приводит к замедлению фазового перехода льда в жидкую воду и проходящий сигнал несколько возрастает.

На рис. 3в были выявлены различия в изменении фазы от времени после первичного резкого уменьшения пропускания излучения на частотах от 8.5 до 12 ГГц. Их можно объяснить образованием увлажнённых слоёв определённой толщины вблизи поверхности и возникновением частотной зависимости фазы коэффициента отражения. При последующем таянии образовывался переходный стационарный слой с фиксированными параметрами и фаза на разных частотах изменялась монотонно вследствие таяния блока и изменения расстояния до антенн. При изменении длины хода лучей между двумя антеннами на ΔL , изменение фазы составляет $\Delta\varphi = (\Delta L/\lambda)2\pi$, где λ – длина волны. Если ΔL изменяется на 3 см (что соответствует изменению расстояния от антенн до поверхности льда 1,5 см), а $\lambda = 3$ см, то $\Delta\varphi$ составляет 360° .

Эффект просветления при таянии льда можно на основании полученных результатов объяснить появлением «слоёв течения» и возникновением плёнок аморфного льда с пониженным значением ε' и ε'' . Просветление достигается как за счёт уменьшения R , так и понижения ε'' , т.е. уменьшения потерь. Этот эффект пропадает для случая ортогональности вектора электрического поля и базисных плоскостей. Если давление во льду велико, то образование больших объёмов аморфного льда приведёт к уменьшению потерь прохождения при любых температурах льда. В рассмотренном случае давление возникает из-за процесса таяния льда в неоднородной структуре объёма образца (из-за особенностей кристаллического строения и примесей в среде).

Общий вывод работы — исследованные особенности можно использовать для обнаружения начала таяния ледяных покровов при фазовых измерениях зондирующих сигналов и обнаружения тонких увлажнённых слоёв, например, слоёв, загрязнённых солевыми включениями.

Список литературы

1. Арманд Н. А., Захаров А. И., Захарова Л. Н. Космические радары с синтезированной апертурой в дистанционном зондировании Земли: современные системы и перспективные проекты // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 3–13.
2. Баранов Ю. Б., Кантемиров Ю. И., Киселевский Е. В., Никифоров С. Э. Применение метода радиолокационной интерферометрии при маркшейдерском контроле смещений земной поверхности, вызванных разработкой месторождений нефти и газа // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. № 2. С. 45–53.
3. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д. Причины изменения фазы коэффициента отражения от границы воздух-лёд в микроволновом диапазоне // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 3. С. 260–266.
4. 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. 587–591.
5. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Определение областей донного газоотделения на акваториях с пресным льдом по данным радарных и радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 150–161.
6. Бордонский Г. С., Крылов С. Д. Аморфизация льда при механических напряжениях // Письма в Журнал технической физики. 2017. Т. 43, № 21. С. 64–71.
7. Глазовский А. Ф., Мачерет Ю. Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.
8. Гурулев А. А. Резонаторные исследования пресного льда на частоте 3.3 ГГц // Учёные записки ЗабГГПУ. 2009. № 2. С. 131–133.
9. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Дагуров П. Н. Поляризационная сигнатура пространственных вариаций обратного радарного рассеяния // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 21–25.
10. Debenedetti P. G. Metastable liquids. Princeton: Princeton Univ. Press, 1996. 424 p.
11. Liu Q., Augstein E., Darovskikh A. Polarization Anomaly of the Microwave Brightness Temperature from Ice // Appl. Opt. 1998. Vol. 37, No. 12. Pp. 2228–2230.
12. Petrenko V., Whitworth R.W. Physics of Ice. Oxford: Oxford Univ. Press, 2002. 347 p.
13. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin; New York; London; Paris; Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.

Статья поступила в редакцию 12.04.2018; принята к публикации 16.05.2018

Библиографическое описание статьи

Бордонский Г. С., Гурулев А. А. Изучение характеристик пропускания и отражения микроволнового излучения льдом вблизи температуры таяния // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2018. Т. 13, № 4. С. 80–89. DOI: 10.21209/2308-8761-2018-13-4-80-89.

Georgy S. Bordonskiy¹,
*Doctor of Physics and Mathematics,
Chief of the Laboratory of Cryogenesis Geophysics,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
(16a Nedorezova st., Chita, 672014, Russia),
e-mail: lgc255@mail.ru*

Alexandr A. Gurulev²,
*Candidate of Physics and Mathematics,
Senior Researcher,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
(16a Nedorezova st., Chita, 672014, Russia),
e-mail: lgc255@mail.ru*

Study of Transmission and Reflection Characteristics of Microwave Radiation by Ice near the Melting Temperature

The paper presents the results of laboratory measurements of the reflection coefficient, the phase of reflected monochromatic radiation from a sample of fresh ice and its electromagnetic losses near the temperature 0 °C. The measurements were performed for an ice block seized from the ice cover of a fresh lake at 8.5...13.5 GHz. The existence of reduced values of microwave power absorption during its propagation through the ice and melting of the medium has been confirmed. It is established that the phase of the reflected wave varies with temperature, it has a different time course after the beginning of the melting of the block for different frequencies. This feature is associated with the appearance of thin layers of moistened ice at the boundaries of the sample. The measurement of the phase of the reflected signals depending on the frequency of the radiation can provide additional information on the structure of the probed natural ice objects.

Keywords: ice, microwave range, reflected wave phase

References

1. Armand N. A., Zakharov A. I., Zakharova L. N. Kosmicheskie radary s sintezirovannoi aperturoi v distantsionnom zondirovanii Zemli: sovremennye sistemy i perspektivnye proekty // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2010. № 2. S. 3–13.
2. Baranov Yu. B., Kantemirov Yu. I., Kiselevskii E. V., Nikiforov S. E. Primenenie metoda radiolokatsionnoi interferometrii pri marksheiderskom kontrole smeshchenii zemnoi poverkhnosti, vyzvannykh razrabotkoi mestorozhdenii nefti i gaza // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2008. № 2. S. 45–53.
3. Bordonskii G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D. Prichiny izmeneniya fazy koeffitsienta otrazheniya ot granitsy vozdukh-led v mikrovolnovom diapazone // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika. 2009. T. 52, № 3. S. 260–266.
4. Bordonskii G.S., Gurulev A.A., Krylov S.D. Elektromagnitnye poteri presnogo l'da v mikrovolnovom diapazone pri 0 °C // Radiotekhnika i elektronika. 2014. T. 59, № 6. S. 587–591.

¹G. S. Bordonskiy is an organizer of the research.

²A. A. Gurulev formulates insights and summarizes the results of a collective research.

5. Bordonskii G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V. Opredelenie oblasti donnogo gazoodeleniya na akvatoriyakh s presnym l'dom po dannym radarnykh i radiometricheskikh izmerenii // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. T. 13, № 3. S. 150–161.
6. Bordonskii G. S., Krylov S. D. Amorfizatsiya l'da pri mekhanicheskikh napryazheniyakh // *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2017. T. 43, № 21. S. 64–71.
7. Glazovskii A. F., Macheret Yu. Ya. Voda v lednikakh. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distantsionnykh issledovaniy. M.: GEOS, 2014. 528 s.
8. Gurulev A. A. Rezonatornye issledovaniya presnogo l'da na chastote 3.3 GGts // *Uchenye zapiski ZabGGPU*. 2009. № 2. S. 131–133.
9. Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Dagurov P. N. Polyarizatsionnaya signatura prostranstvennykh variatsii obratnogo radarnogo rasseyaniya // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2016. № 5. S. 21–25.
10. Debenedetti P. G. *Metastable liquids*. Princeton: Princeton Univ. Press, 1996. 424 p.
11. Liu Q., Augstein E., Darovskikh A. Polarization Anomaly of the Microwave Brightness Temperature from Ice // *Appl. Opt.* 1998. Vol. 37, No. 12. Pp. 2228–2230.
12. Petrenko V., Whitworth R.W. *Physics of Ice*. Oxford: Oxford Univ. Press, 2002. 347 p.
13. Sharkov E. A. *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations*. Berlin; New York; London; Paris; Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.

Received: April 12, 2018; accepted for publication May 16, 2018

Reference to article

Bordonskiy G. S., Gurulev A. A. Study of Transmission and Reflection Characteristics of Microwave Radiation by Ice near the Melting Temperature // *Scholarly Notes of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology*. 2018. Vol. 13, No. 4. PP. 80–89. DOI: 10.21209/2308-8761-2018-13-4-80-89.