

УДК 53.096  
ББК 22.3

**Ксения Андреевна Щегрина**

аспирант,

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

**Олег Игоревич Петров**

аспирант,

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

**Сергей Дмитриевич Крылов**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,

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

### Особенности микроволновых свойств льда с солевыми включениями в диапазоне температур $-20^{\circ}\text{C}$ – $-190^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>

Выполнены исследования микроволновых свойств солёного льда с содержанием NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и природного льда из ледяного покрова оз. Доронинское в диапазоне температур  $-20^{\circ}\text{C}$  –  $-190^{\circ}\text{C}$ . Применялись следующие методики: диэлектрические измерения образцов льда, помещённых в волновод, на частоте 15 ГГц, а также измерение собственного радиотеплового излучения охлаждаемого льда на фоне безоблачного неба на частотах 5 ГГц, 13,5 ГГц и 37,5 ГГц. Впервые получены зависимости действительной  $\varepsilon'$  и мнимой  $\varepsilon''$  частей относительной диэлектрической проницаемости образцов солёного льда для температур ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ . Экспериментально определена температура вымерзания жидкости в порах солёного льда  $-145^{\circ}\text{C}$ .

*Ключевые слова:* микроволновая спектроскопия, солёный лёд.

**Kseniya Andreevna Shchegrina**

Postgraduate Student, Institute of Natural Resources,

Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
(Chita, Russia), e-mail: lgc255@mail.ru

**Oleg Igorevich Petrov**

Postgraduate Student,

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

(Chita, Russia), e-mail: lgc255@mail.ru

**Sergey Dmitrievich Krylov**

Candidate of Physics and Mathematics,

Senior Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

(Chita, Russia), e-mail: lgc255@mail.ru

### Features of Microwave Properties of Ice with Salt Inclusions in the Temperature Range from $-20^{\circ}\text{C}$ to $-190^{\circ}\text{C}$

The research of the microwave properties of salty ice containing NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and natural ice from the ice lake Doroninskoye at temperatures ranging from  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $-190^{\circ}\text{C}$  was carried out. We used the following techniques: dielectric measurement of ice samples placed in a waveguide at a frequency of 15 GHz, as well as measuring the radio thermal radiation of ice against a cloudless sky at 5 GHz, 13.5 GHz and 37.5 GHz. Dependences of the real  $\varepsilon'$  and  $\varepsilon''$  imaginary parts of the relative permittivity of the samples of salted ice for the temperatures below  $-60^{\circ}\text{C}$  were found for the first time. The temperature of freezing liquid in the pores of the salty ice was experimentally determined as  $-145^{\circ}\text{C}$ .

*Keywords:* microwave spectroscopy, salty ice.

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №12-02-31237 и Интеграционного проекта СО РАН №56.

**Введение.** Микроволновый диапазон позволяет оценить фазовое состояние жидкости в капиллярах льда, в том числе при содержании в нём примесей в виде солей. При температурах ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  во льду начинаются процессы перехода жидких включений в новые фазовые состояния, которые могут привести к значительным изменениям диэлектрических свойств образцов [8]. Исследование микроволновых свойств соленого льда является актуальной задачей для решения проблем интерпретации данных дистанционного зондирования поверхности океана и внутренних солёных водоёмов в зимний период времени [4]. В соленом льду существуют капилляры, содержащие рассолы, которые оказывают существенное влияние на температуру и время процесса замерзания и таяния льда [9]. Радиофизические методы позволяют «взглянуть» на внутреннее строение таких образцов без непосредственного контакта с ними.

**Методы исследования.** В работе применялись следующие методики исследования льда: диэлектрические измерения образцов льда, помещённых в волновод, на частоте 15 ГГц, а также измерение собственного излучения охлаждаемого льда на фоне безоблачного неба на частотах 5 ГГц, 13,5 ГГц и 37,5 ГГц. Длина волновода при измерениях составляла 6 и 12 см. Совместное использование вышеуказанных методов позволяет подробно рассмотреть процессы, протекающие в порах образцов льда в лабораторных условиях в диапазоне температур  $-20^{\circ}\text{C}$  –  $-190^{\circ}\text{C}$ .

Образцы помещались в специальные кюветы и охлаждались с помощью паров азота от температуры  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $-190^{\circ}\text{C}$ . После отключения охладителя образец постепенно нагревался до исходной температуры  $-20^{\circ}\text{C}$ . Температура измерялась с помощью термопары с точностью  $0,3^{\circ}\text{C}$  и частотой 100 записей в секунду. Весь цикл охлаждения – нагревания образца занимал 2 ч при волноводных измерениях и до 8 ч при экспериментах по радиометрии. Это связано с тем, что при радиометрических измерениях образцы льда медленнее изменяют температуру из-за их больших размеров.

Образцы льда для исследования извлекались из ледяного покрова содового озера Доронинское (Восточное Забайкалье) в зимний период 2012–2013 гг. Процентное содержание соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и  $\text{NaHCO}_3$ ) в исходной воде в 3 раза выше, чем  $\text{NaCl}$ . Образцы с солевыми включениями  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  изготавливались в лабораторных условиях. Содержание солей в образцах составляло 3 г/кг – 5 г/кг.

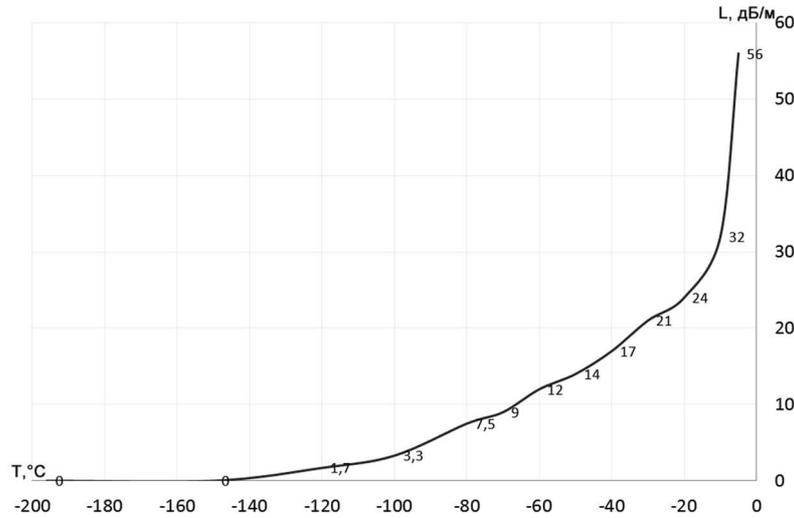
**Экспериментальные данные.** При лабораторных исследованиях образцов льда с содержанием хлорида натрия [7], соды и образцов, полученных из природного льда содового озера Доронинское (Забайкальский край), со сложным минеральным составом [3] в диапазоне температур  $-20^{\circ}\text{C}$  ÷  $-190^{\circ}\text{C}$ , были выявлены некоторые особенности прохождения СВЧ-излучения на частотах 5 ГГц; 15,5 ГГц; 37,5 ГГц.

Состав воды и льда оз. Доронинское отличается от морской воды [2], хотя общая минерализация исходных морских вод и вод озера близка к 35 г/кг. Экспериментальные данные о диэлектрических свойствах льда ( $\epsilon'$  – действительной и  $\epsilon''$  – мнимой части относительной диэлектрической проницаемости) с содержанием солей при более низких температурах ( $\sim -60^{\circ}\text{C}$  ÷  $-190^{\circ}\text{C}$ ) получены нами впервые при диэлектрической спектроскопии образцов, помещенных в волновод на частоте  $f=15$  ГГц (рис. 1, 2).

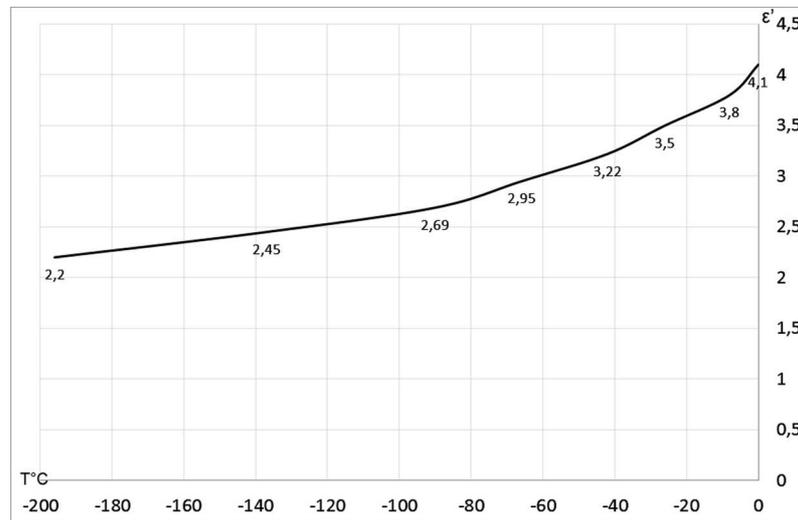
Из графика, приведенного на рис. 1 для погонного затухания  $L$ , следует, что при достижении температуры образца  $-100^{\circ}\text{C}$  в его порах еще остается остаточная жидкость, о чём свидетельствует  $L=3,3$  дБ/м. Полное вымерзание жидкости зафиксировано при температуре  $-145^{\circ}\text{C}$  на частоте  $f=15$  ГГц. Небольшой перегиб графика при  $-22^{\circ}\text{C}$  отмечает точку эвтектики хлорида натрия, который преобладает в составе солей во льду оз. Доронинское. Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  от температуры, приведенная на рис. 2, также свидетельствует о том, что полное вымерзание жидкости достигается при температуре  $-145^{\circ}\text{C}$ , когда  $\epsilon'$  достигает значения 2,4. Ниже этой температуры наклон графика не изменяется. Дальнейшее понижение температуры оказывает меньшее влияние на диэлектрические свойства исследуемых образцов.

Результаты радиометрических исследований образцов льда приведены на рис. 3.

В целом, для двух образцов с разным составом солевых включений температурный ход мощности теплового излучения  $P$  аналогичен. Выявлены некоторые особенности электромагнитных свойств льда с содержанием  $\text{NaCl}$ . При температуре  $-22^{\circ}\text{C}$  зафиксирована точка эвтектики хлорида натрия. Некоторое падение мощности излучения при температуре  $-80^{\circ}\text{C}$ , возможно, соответствует точке образования квазижидких плёнок в капиллярах льда [10]. В диапазоне температур  $-130^{\circ}\text{C}$  ÷  $-140^{\circ}\text{C}$  для образца с хлоридом натрия наблюдается слабо выраженное снижение, а затем увеличение мощности излучения образца, которое также подтверждает возможное изменение



**Рис. 1.** Зависимость затухания мощности электромагнитного излучения в образце льда ( $L$ ) из ледяного покрова озера Доронинского. Соленость образца  $S=3$  г/кг. Частота  $f=15$  ГГц. Отбор проб – февраль 2013 г



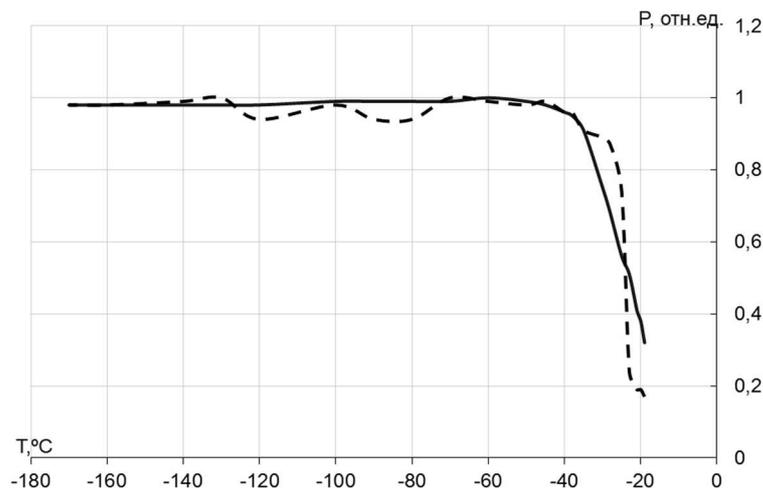
**Рис. 2.** Изменение действительной части относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  образца льда из ледяного покрова оз. Доронинское. Соленость образца  $S=3$  г/кг. Частота  $f=15$  ГГц. Отбор проб – февраль 2013 г.

фазового состояния жидкости в порах льда, которое может приводить к механической неустойчивости образцов льда под давлением [5; 6].

**Выводы.** Полученные данные диэлектрической спектроскопии о динамике действительной части относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  позволяют предположить, что рассол внутри капилляров льда не вымерзает в двухчасовом цикле охлаждения – нагревания образцов, сохраняя жидкую воду до температуры  $-145^\circ C$ . Эта температура отмечена в работах [5; 6] как температура механической неустойчивости для льда с содержанием хлористого натрия.

Зависимость диэлектрической проницаемости образцов льда содового озера от температуры совпадает с описанной в литературе для морского льда [1] до температур около  $-40^\circ C$ .

Данные радиометрии хорошо согласуются с данными диэлектрических волноводных измерений относительно области температур  $-140^\circ C \div -145^\circ C$ , а также выделяют температуру образования квазижидких плёнок внутри капилляров льда и их вымерзания. Зафиксированные процессы идут



**Рис. 3.** Зависимость мощности теплового излучения (в относительных единицах) на частоте 13,5 ГГц от температуры. Сплошная линия соответствует образцу с содержанием хлорида натрия. Пунктирная линия соответствует образцу, изготовленному из ледяного покрова оз. Доронинское. (Февраль 2013 г.) Соленость образцов  $S=5$  г/кг

при температурах гораздо ниже эвтектических для солевых включений исследуемого состава.

В условиях Земли экстремальные температуры могут наблюдаться в её холодных областях (Арктика и Антарктида). Также данные об электромагнитных свойствах загрязненного солями льда могут использоваться при дистанционном зондировании других планет, например, спутников Сатурна и Юпитера. Следовательно, полученные результаты о динамике мощности проходящего и собственного СВЧ-излучения представляют интерес для специалистов в области исследования разнообразных криогенных объектов.

#### Список литературы

1. Богородский В. В., Гаврило В. П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометиздат, 1980. 385 с.
2. Борзенко С. В. Формы сероводорода в минеральных содовых водах озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 54–57.
3. Гурулёв А. А., Харин Ю. В., Щегрина К. А., Лукьянов П. Ю. Особенности свойств ледяного покрова содового озера на частоте 13,7 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН. 2012. С. 289–293.
4. Репина И. А. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии / И. А. Репина, В. В. Тихонов, Т. А. Алексеева [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29–36.
5. Фатеев Е. Г. Аномально низкая упругость  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  льда при низких температурах // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 7. С. 46–52.
6. Фатеев Е. Г. Сверхнизкая упругая стабильность солёных льдов при низких температурах // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 6. С. 35–43.
7. Щегрина К. А., Петров А. О., Крылов С. Д. Микроволновые свойства льда, легированного хлористым натрием // Сб. матер. XII Междунар. науч.-практ. конф. Чита. ЗабГУ, 2012. С. 67–70.
8. Щегрина К. А., Петров О. И. Влияние солевых включений на микроволновые свойства льда в диапазоне температур от  $0^\circ\text{C}$  до  $-190^\circ\text{C}$  // Тез. док. VI конф. молодых ученых Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва ДВО РАН «Океанические исследования». 15–19 апреля 2013 г. Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2013. С. 34.

9. Kim J. S., Yethiraj A. The effect of salt on the melting of ice: A molecular dynamics simulation study // The Journal of Chemical Physics. 129. 2009. P. 124504.
10. Xing W., Miranda P.B., Shen Y.R. Surface Vibrational Spectroscopic Study of Surface Melting of Ice // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. № 8. P. 1554–1557.

### *References*

1. Bogorodsky V. V., Gavrilov V. P. Led. Fizicheskiye svoystva Sovremennyye metody glyatsiologii. L.: Gidrometizdat, 1980. 385 s.
2. Borzenko S. V. Formy serovodoroda v mineralnykh sodovykh vodakh ozera Doroninskoye (Vostochnoye Zabaykalye) // Vestnik KRAUNTs. Nauka o Zemle. 2009 № 1. Vyp. S. 54–57.
3. Gurulev A. A., Kharin Yu. V., Shchegrina K. A., Lukyanov P. Yu. Osobennosti svoystv ledyanogo pokrova sadovogo ozera na chastote 13, 7 GGts // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. M.: IYEI RAN. 2012. S. 289–293.
4. Repina I. A. Elektrodinamicheskaya model izlucheniya arkticheskogo ledyanogo pokrova dlya resheniya zadach sputnikovoy mikrovolnovoy radiometrii / I. A. Repina, V. V. Tikhonov, T. A. Alekseyev [i dr.] // Issledovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. № 5. S. 29–36.
5. Fateyeva Ye. G. Anomalno-nizkaya uprugost NaCl-H<sub>2</sub>O lda pri nizkikh temperaturakh // ZhTF. 2010. T. 80. № 7. S. 46–52.
6. Fateyev Ye. G. Sverkhmizkaya uprugaya stabilnost solyonykh ldov pri nizkikh temperaturakh // ZhTF. 2012. T. 82. № 6. S. 35–43.
7. Shchegrina K. A., Petrov A. O. Krylov S. D. Mikrovolnovyye svoystva lda, legirovannogo khloristom natriyem // Sb. material. XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Chita. ZabGU, 2012. S. 67–70.
8. Shchegrina K. A., Petrov O. I. Vliyaniye solevykh vklyucheny na mikrovolnovyye svoystva lda v diapozone temperatur ot 0° C ai –190° C // Tez. dokl. VI konf. molodykh uchenykh Tikhookeanskogo okeanologicheskogo instituta im. V. I. Ilyichyova: DVO RAN «Okeanicheskiye issledovaniya». 15?19 aprelya 2013 g. Vladivostok. TOI DVO RAN. 2013. S. 34.
9. Kim J. S., Yethiraj A. The effect of salt on the melting of ice: A molecular dynamics simulation study // The Journal of Chemical Physics. 129. 2009. P. 124504.
10. Xing W., Miranda P. B., Shen Y. R. Surface Vibrational Spectroscopic Study of Surface Melting of Ice // Phys. Rev. Lett.

*Статья поступила в редакцию 15.05.2013*