

03

## **Электрическое сопротивление пленок воды на поверхности льда вблизи температуры фазового перехода**

© Г.С. Бордонский, С.Д. Крылов

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

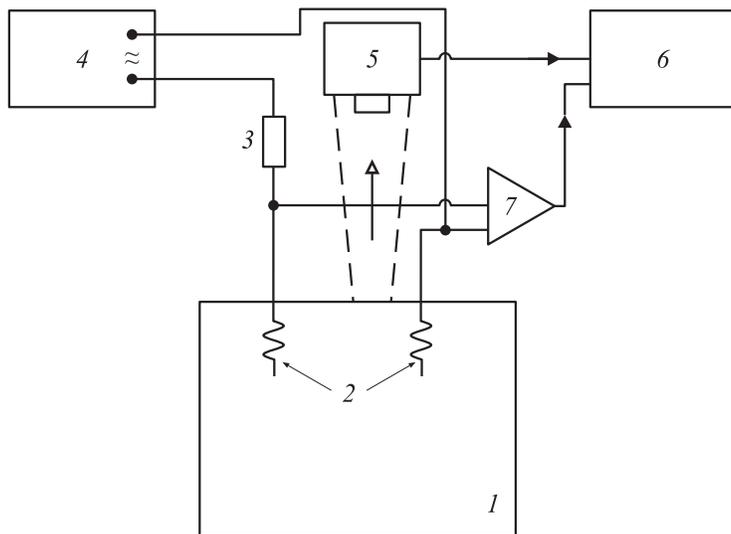
Поступило в Редакцию 24 сентября 2008 г.

Выполнены измерения электрического сопротивления поверхностного слоя поликристаллического образца пресного льда при его нагревании до температуры плавления. При монотонном уменьшении электрического сопротивления поверхности льда с началом таяния наблюдался его рост с последующим уменьшением по мере развития таяния. Электрическое сопротивление возрастало более чем в два раза. Наблюдаемый эффект связан с разрушением квазжидкого слоя, имеющего более высокую электропроводность, и замещением его слоем жидкой воды с низкой электропроводностью.

PACS: 92.40.Vq

В работе [1] обсуждался вопрос о высокой проводимости квазжидкого слоя, существующего на поверхности кристаллов льда [2]. Предполагается, что этот слой имеет проводимость, в  $10^6$  раз превышающую проводимость воды. Экспериментальное определение проводимости квазжидкого слоя сопряжено с трудностями из-за малой его толщины. Толщина квазжидкого слоя изменяется от значений порядка 0.1 nm до десятков nm, в зависимости от температуры. Знание электрических свойств квазжидкого слоя представляется важным в понимании многих явлений: атмосферного электричества, свойств разнообразных криогенных образований и т.д. [1].

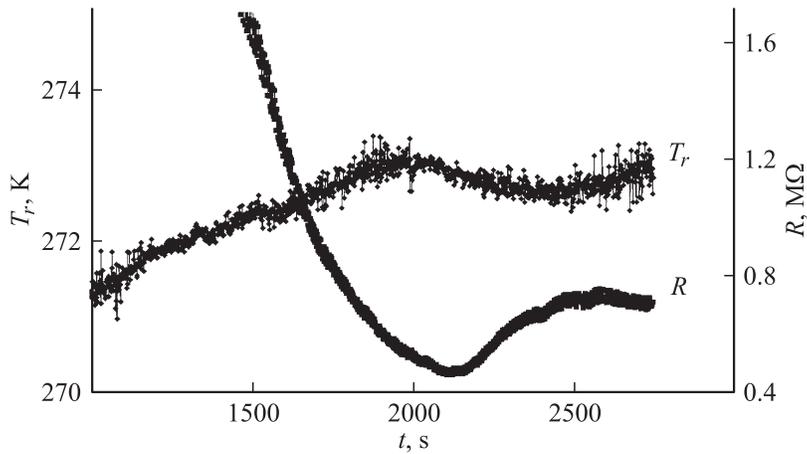
В данной работе выполнено измерение изменения электрического сопротивления поверхностного слоя поликристаллического образца пресного льда при его нагревании до температуры фазового перехода, при которой начинается таяние. Цель работы — выяснить, как изменяется электропроводность поверхностного слоя при исчезновении квазжидкого слоя и появлении тонкого слоя жидкой воды на поверхности льда.



**Рис. 1.** Схема установки для измерения изменений электрического сопротивления пленок на поверхности льда: 1 — образец льда, 2 — электроды, 3 — добавочный резистор ( $5.6\text{ M}\Omega$ ), 4 — генератор синусоидального напряжения частоты  $500\text{ Hz}$ , 5 — радиометр инфракрасного диапазона, 6 — система сбора информации фирмы Agilent, 7 — согласующий усилитель с высоким входным сопротивлением.

Методика эксперимента заключалась в следующем. В образец пресного льда помещали два электрода, одинаковых по размерам и одного химического состава, с большой площадью поверхности для создания контактов с небольшим электрическим сопротивлением. Образец льда с электродами хранили в холодильнике. Для проведения исследования его переносили в лабораторное помещение с температурой воздуха около  $+20^\circ\text{C}$  и измеряли изменение электрического сопротивления между электродами в процессе нагревания льда от  $-7$  до  $0^\circ\text{C}$ . При нагревании льда толщина квазизжидкого слоя медленно возрастала и в точке фазового перехода возникал тонкий слой жидкой воды.

Особенность эксперимента заключалась в использовании радиационного метода измерения температуры тонкого поверхностного слоя. Эта температура измерялась при помощи чувствительного модуляционного ИК-радиометра в интервале длин волн  $8\text{--}12\ \mu\text{m}$  [3]. Из-за высоких элек-

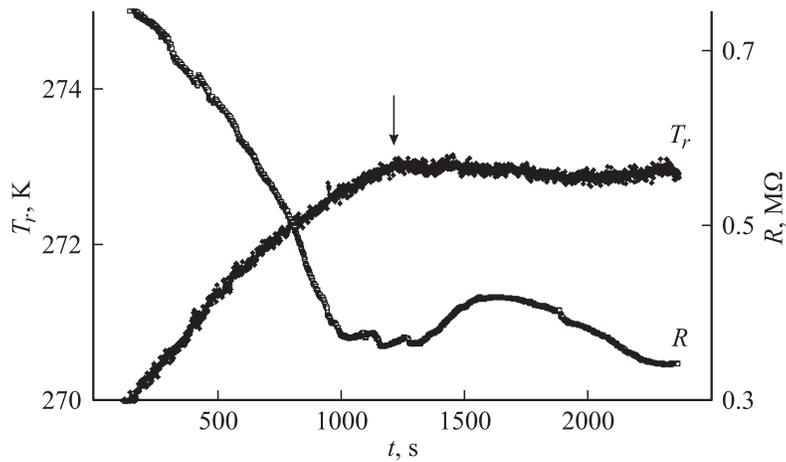


**Рис. 2.** Зависимость радиационной температуры и сопротивления пленки от времени нагревания. Измерения сопротивления выполнены на переменном токе частотой 500 Hz. Расстояние между электродами 5 см.

тромагнитных потерь во льду и в воде эффективный излучающий слой для теплового ИК-диапазона составляет значение около  $10 \mu\text{m}$  [4]. Это позволило регистрировать момент достижения тонким поверхностным слоем температуры фазового перехода лед–вода. Схема измерительной установки при измерениях на переменном токе представлена на рис. 1.

Образец пресного льда получали из ледяного покрова пресного льда в зимнее время. Этим достигалась его однородность. Концентрация растворимых солей во льду  $\sim 2 \div 3 \text{ mg/kg}$ , что соответствует концентрации примесей в дважды дистиллированной воде. Размеры образца приблизительно  $5 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ . Расстояние между электродами варьировалось от 1 до 10 см.

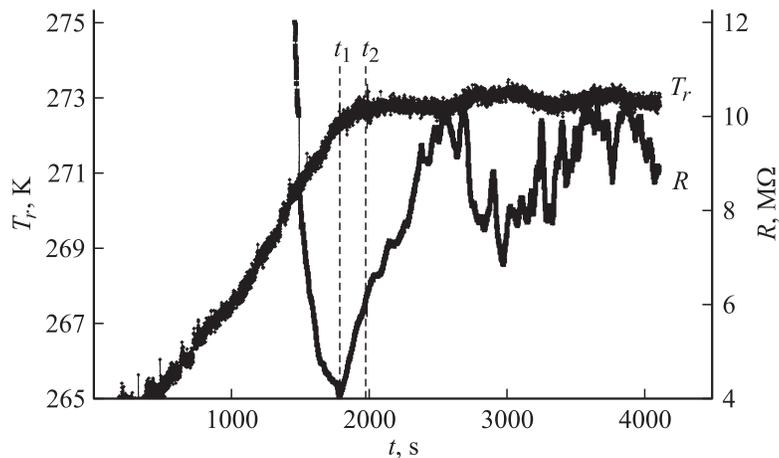
В качестве электродов использовалась медная проволока, свернутая в кольца, вставляемая в просверленные во льду углубления на глубину 1–3 см. В экспериментах использовались также электроды из графита и алюминия. Образцы льда хранились в морозильной камере при температуре  $-10^\circ\text{C}$ . Предполагалось, что хранение образцов при не очень низкой температуре приводит к релаксации механических напряжений, возникающих при обработке.



**Рис. 3.** Зависимость радиационной температуры и сопротивления пленки воды от времени. Электроды из графита. Стрелкой отмечен момент достижения жидкой пленки на поверхности льда толщиной  $\sim 20 \mu\text{m}$ . Расстояние между электродами 7 см. Размеры электродов  $30 \times 9 \times 5 \text{ mm}$ .

Измерения выполнены для переменного тока на частоте 500 Hz при амплитуде на электродах порядка единиц вольт. Проводились также измерения электрического сопротивления с использованием измерителя Agilent 34970A на постоянном токе. В этом случае на электроды подавалось напряжение 0.2 V, что приводило к токам через электроды от  $10^{-10}$  до  $10^{-7}$  А. Чувствительность ИК-радиометра при постоянной времени интегрирования 1 s составляла 0.02 K. Достижение поверхностным слоем  $0^\circ\text{C}$  регистрировали по резкому изменению наклона графика выходного напряжения от времени.

Результаты измерений представлены на рис. 2, где приведены зависимости радиационной температуры ( $T_r$ ) и сопротивления образца ( $R$ ) при измерениях на переменном токе в зависимости от времени наблюдения ( $t$ ). На графиках  $T_r$  обнаруживается резкий перегиб радиационной температуры, совпадающий с минимумом электрического сопротивления пленки. Однако затем некоторое время наблюдается рост  $R$  с последующим уменьшением этой величины по мере развития таяния. Незначительное уменьшение радиационной температуры после



**Рис. 4.** Зависимость изменений радиационной температуры и сопротивления при измерениях на постоянном токе от времени.

появления пленки жидкой воды можно связать с процессом испарения с поверхности и ее охлаждения, а также с изменением коэффициента излучения.

Рост электрического сопротивления при появлении жидкой воды наблюдали и при использовании графитовых электродов (рис. 3), а также электродов из медной и алюминиевой проволоки различных размеров. Случай измерения на постоянном токе приведен на рис. 4. Сопротивление системы при таянии льда возрастало более чем в два раза.

Полученные результаты позволяют качественно оценить изменение проводимости при замещении квазижидкого слоя на слой жидкой воды, предполагая, что при температуре ниже  $0^{\circ}\text{C}$  проводимость осуществляется по квазижидкому слою. Сам лед близок по проводимости к диэлектрику [2]. Предполагается, что при начале плавления льда в поверхностном слое, через который в образец поступает тепло, возникающая пленка обладает свойствами жидкой воды.

Из данных ИК-радиометрии следует, что на поверхности льда жидкий слой воды возникает за время около 100 s. На рис. 4 штриховыми линиями отмечены моменты времени, когда началось разру-

шение квазижидкого слоя ( $t_1$ ), и момент времени, когда радиационная температура достигла насыщения ( $t_2$ ). В момент времени  $t_2$  толщина пленки воды достигла значения толщины эффективного излучающего слоя, который для воды в тепловом ИК-диапазоне составляет 10–20  $\mu\text{m}$ . В точке  $t_1$  предполагаемая толщина квазижидкого слоя  $\sim 10\text{ nm}$ . Из этих данных получается, что проводимость слоев двух типов изменяется приблизительно в отношении толщины слоев, т.е. в  $10^3$  раз.

Возможные ошибки связываются с неточными оценками толщины слоев, накоплением на поверхности электродов водорода и наличием переходного слоя на границе жидкая пленка воды–лед с неизвестной проводимостью. Последняя может иметь высокие значения, так как может быть похожа на квазижидкий слой. Более высокая проводимость жидкого слоя, на 2–3 порядка, может возникать также из-за наличия растворимых в жидкой воде солей. Поэтому результирующее отношение проводимостей квазижидкого слоя и химически чистой воды может достигать  $10^5$ – $10^6$ . В любом случае наблюдаемое резкое изменение наклона графика зависимости электрического сопротивления образца льда в точке фазового перехода за короткое время и его рост при начале таяния указывает на более низкую проводимость системы при появлении жидкой воды. Можно сделать вывод, что наблюдаемый эффект связан с разрушением квазижидкого слоя, имеющего более высокую электропроводность.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 06-02-16098).

## Список литературы

- [1] Рыжкин И.А., Петренко В.Ф. // ЖЭТФ. 2005. Т. 128. В. 2 (8). С. 364–369.
- [2] Petrenko V.F., Whitworth R.W. Physics of Ice. Oxford: Oxford Univ. Press, 1999. 374 p.
- [3] Бордонский Г.С. // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 4. С. 169–172.
- [4] Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 384 с.