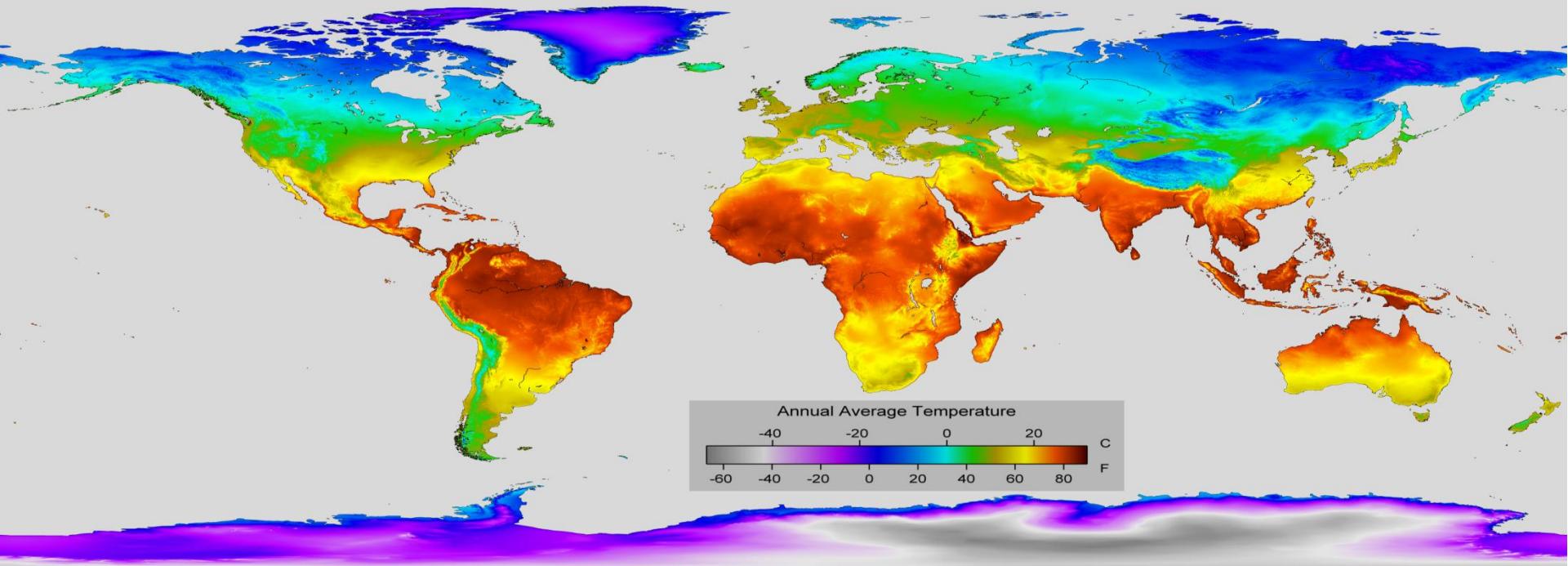


# Диэлектрические характеристики льда вблизи температуры фазового перехода в широком интервале частот

Казанцев В.А., Козлов А.К.  
email: lgc255@mail.ru

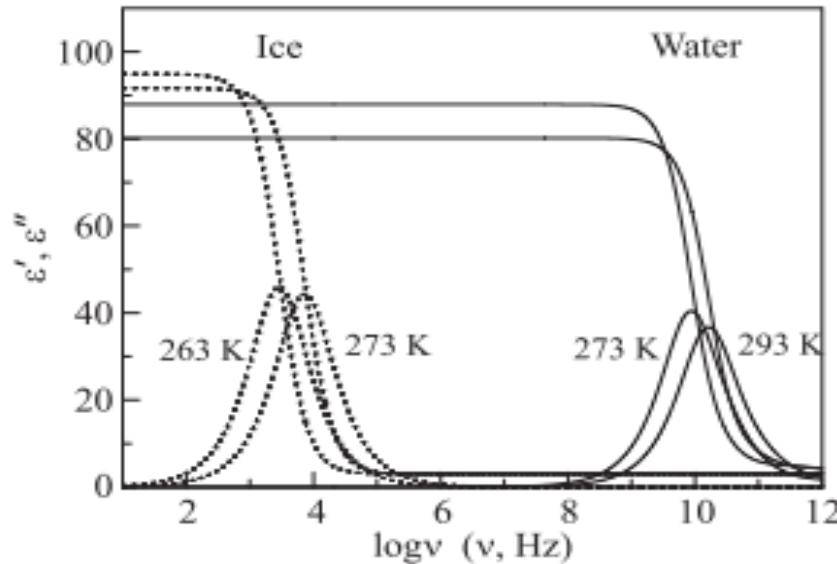
# Актуальность



Среднегодовая температура поверхности

\*[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Annual\\_Average\\_Temperature\\_Map.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Annual_Average_Temperature_Map.png)

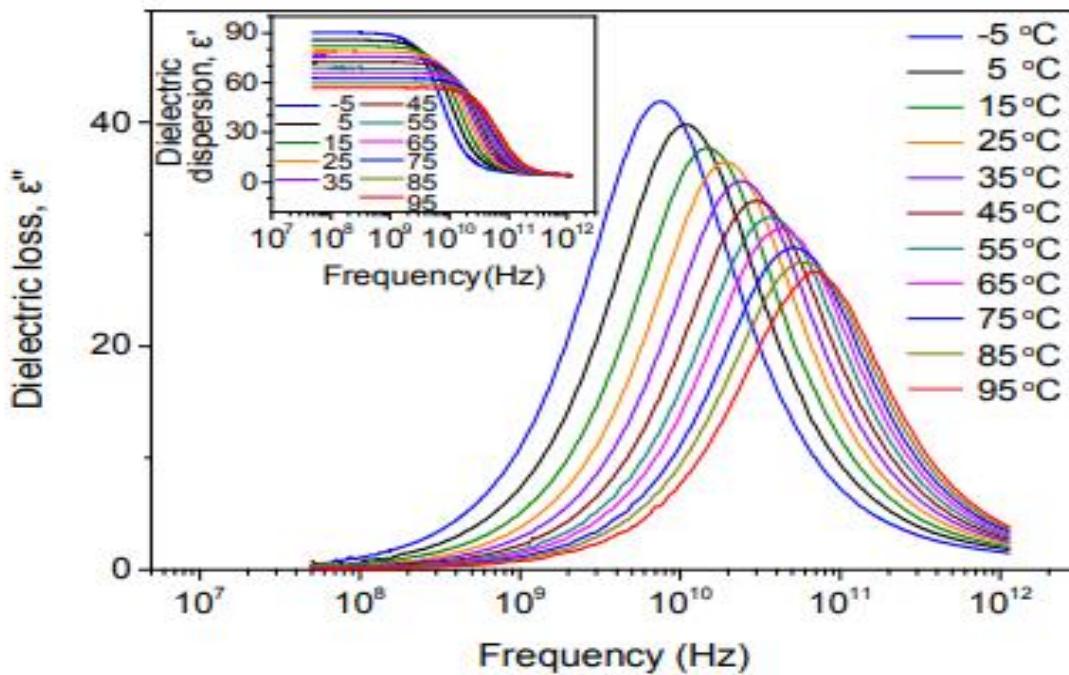
# Диэлектрическая проницаемость льда и воды



Диэлектрические  
спектры воды  
(сплошные линии)  
и льда (пунктирные  
линии)

\*Артемов, В. Г. Подобие процессов диэлектрической релаксации и транспортных характеристик воды и льда / В. Г. Артемов, И. А. Рыжкин, В. В. Синицын // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 102, № 1-2. – С. 45-49.

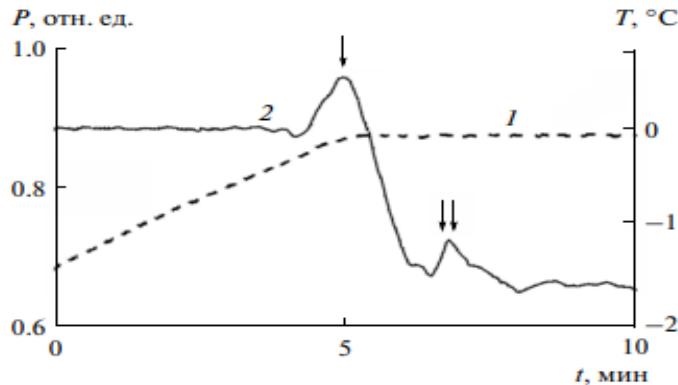
# Диэлектрическая проницаемость воды



Диэлектрические  
спектры воды при  
различных температурах

Vinh, Nguyen & Doan, Luan & Hoang, Ngoc & Cui, Jiarong & Sindle, Benjamin. (2023). Correlation between Macroscopic and Microscopic Relaxation Dynamics of Water: Evidence for Two Liquid Forms. *Journal of Chemical Physics* 158, 204507 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0142818>

# Диэлектрические особенности льда (микроволновый диапазон)

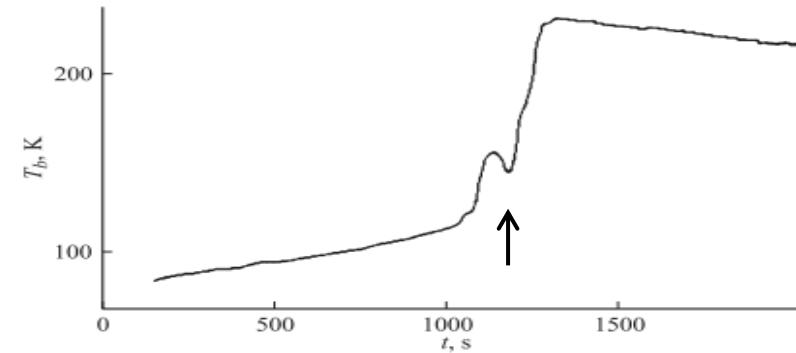


Зависимости изменения температуры блока льда (кривая 1) и проходящей мощности излучения (кривая 2) при его нагревании от времени. Частота измерений 90 ГГц, толщина блока 15 см.\*

**(стрелками отмечены аномалии пропускания образцов льда вблизи 0°C)**

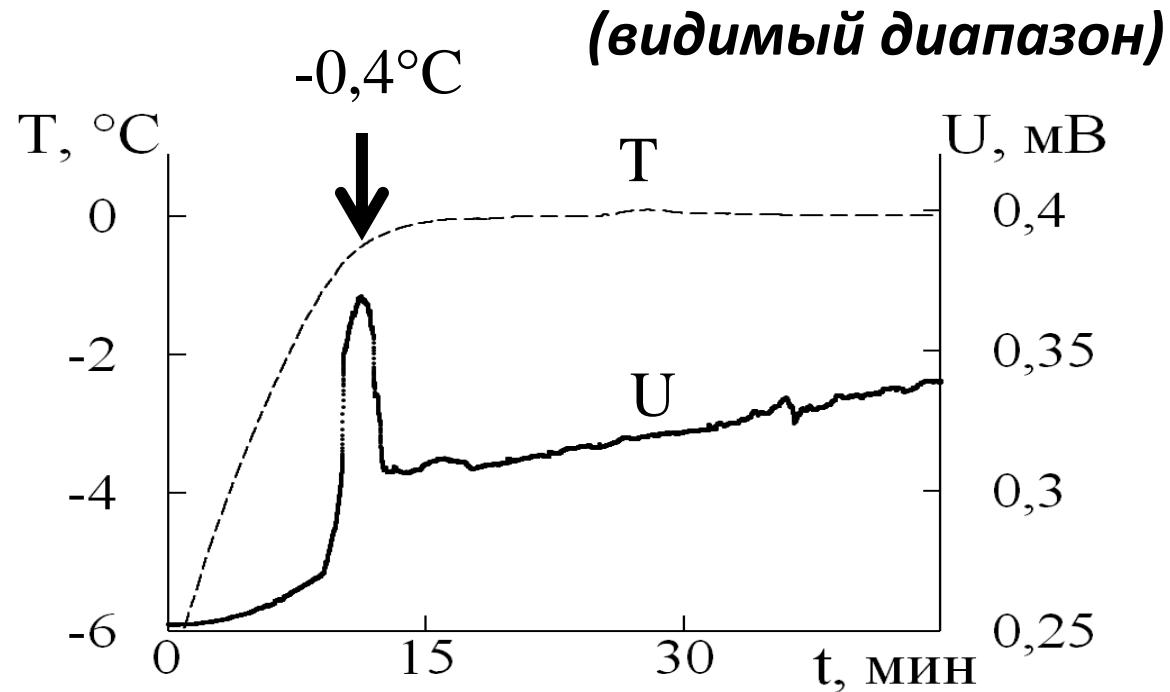
\* Бордонский Г. С. Гурулев А. А., Крылов С. Д. "Просветление" льда в микроволновом диапазоне при текучести // Письма в Журнал технической физики. 2009. Т. 35, № 22. С. 46-54.

\*\* Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д. Электромагнитные потери пресного льда в микроволновом диапазоне при 0°C // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 6. С. 587. DOI: 10.7868/S0033849414060060.



Зависимость радиояркостной температуры тающего блока льда при измерениях на просвет от времени. Частота измерений 34 ГГц, толщина блока 5 см. \*\*

# Диэлектрические особенности льда



Температура льда (штриховая линия) и мощность проходящего линейно поляризованного видимого излучения через образец в зависимости от времени на длине волны 535 нм. Регистрируемая мощность представлена в единицах напряжения фотодетектора ( $U$ ).

\*Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Казанцев В.А., Середин Д.В. Экспериментальное обнаружение просветления пресного льда в оптическом диапазоне вблизи  $0^{\circ}\text{C}$  // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131, № 10. – С. 1374-1379.

## *Задачи исследования*

- Экспериментальное установление спектральных особенностей эффекта понижения диэлектрических потерь во льду в широком интервале частот;
- Разработка соответствующих методик исследования диэлектрических характеристик льда вблизи температуры фазового перехода.

# Резонаторные измерения (лед)

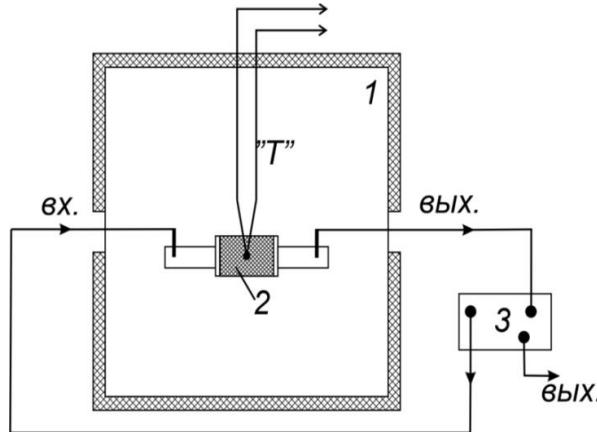
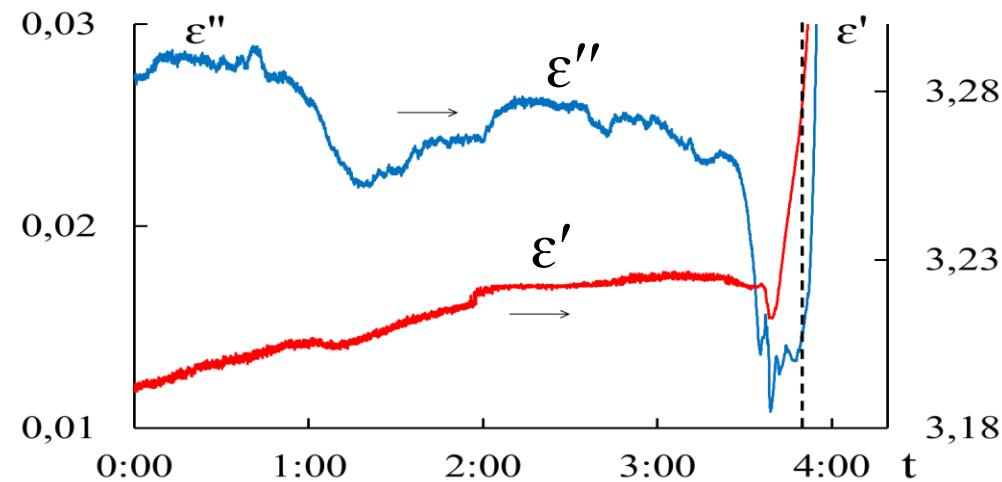
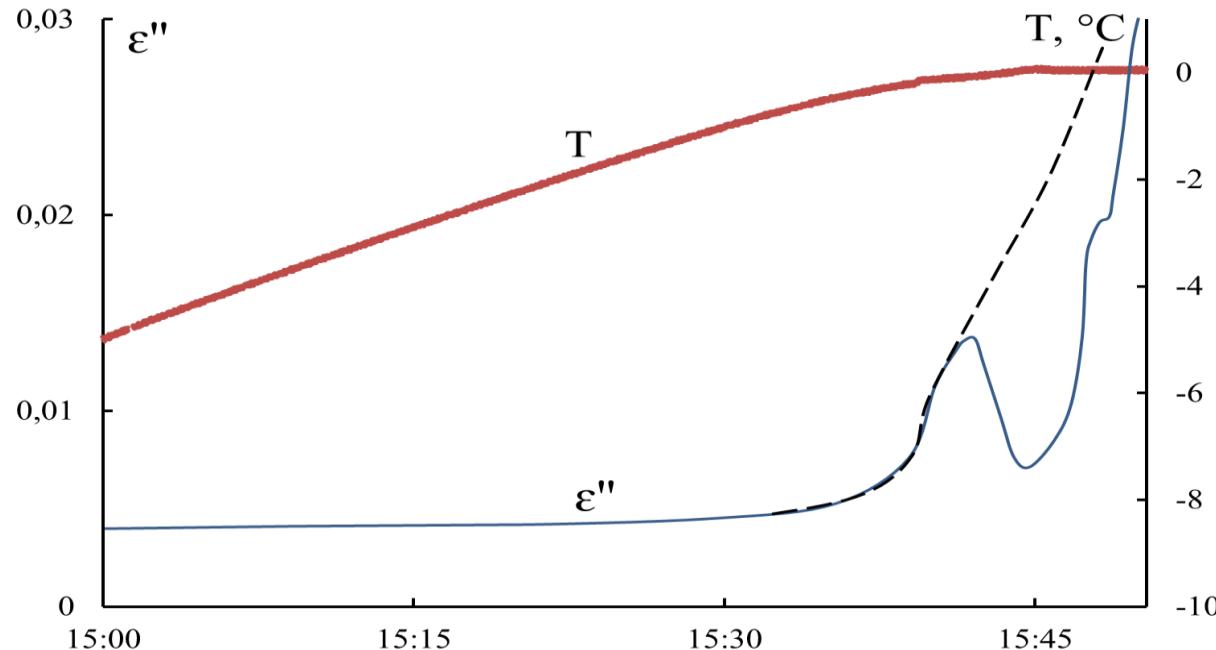


Схема экспериментальной установки для исследования диэлектрических характеристик льда. 1 – климатическая камера, 2 – резонатор типа Н<sub>101</sub> с внутренними размерами 58 мм × 26 мм × 25 мм, 3 – скалярный анализатор, «Т» – датчик температуры.



Зависимость  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  льда при его нагревании от времени ( $t$ ); измерения вблизи 3,4 ГГц; штриховая линия – начало таяния образца льда при 0 °С. Вектор  $\vec{E}$  направлен перпендикулярно базисным плоскостям кристаллов льда.

# Диэлектрические характеристики снега



Зависимость мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon''$ ) и температуры (T) от времени при нагревании образца от  $-5^{\circ}\text{C}$ . Частота 5,6 ГГц.

# Радиометрические измерения

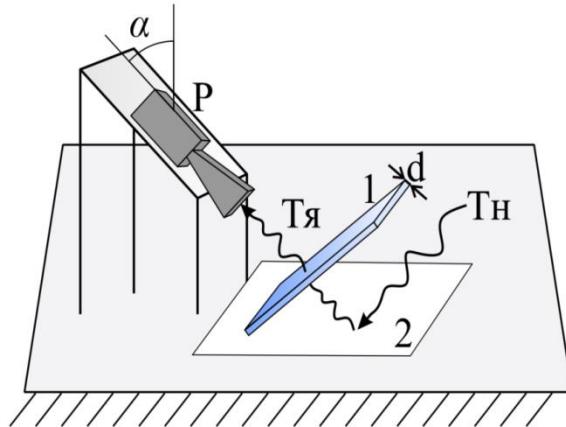
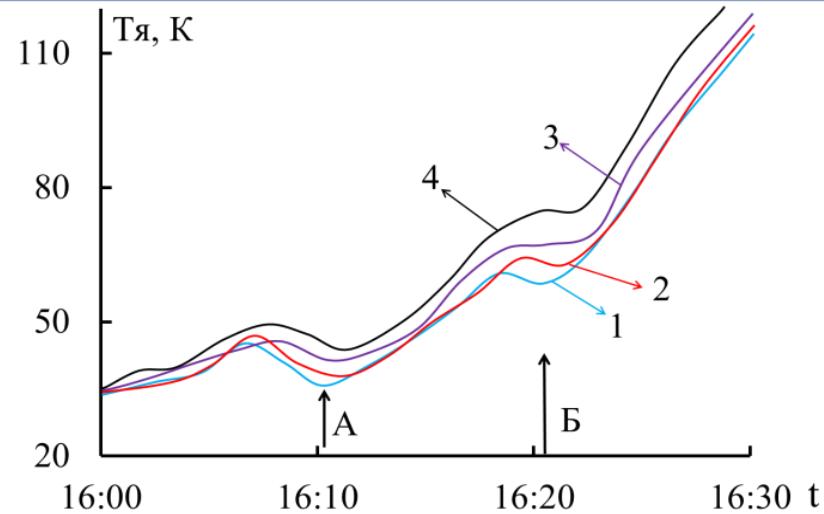


Схема экспериментальной установки для исследования теплового излучения образцов льда на фоне холодного неба. Р – поляризационный микроволновый радиометр, 1 – плоскопараллельная пластина льда размерами  $1000 \times 400 \times 100$  мм, 2 – металлический лист, Тн – радиояркостная температура неба, Тя – радиояркостная температура исследуемого объекта,  $\alpha$  – угол наблюдения, d – толщина образца льда



Результаты изменения радиояркостной температуры образца льда со временем (для 1 – «ГП», 2 – «+45°», 3 – «-45°», 4 – «ВП»). Стрелками отмечены области просветления льда. Частота 34 ГГц.

# Измерения мощности проходящего и отраженного излучения

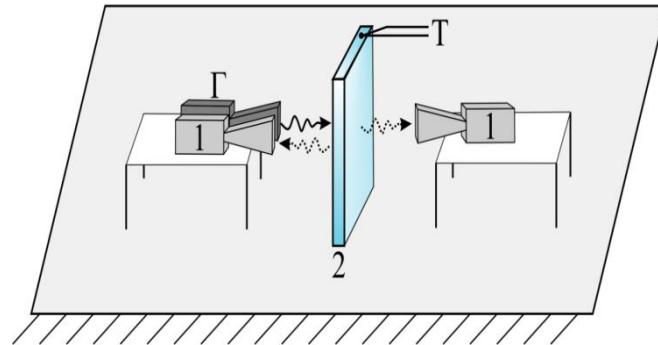
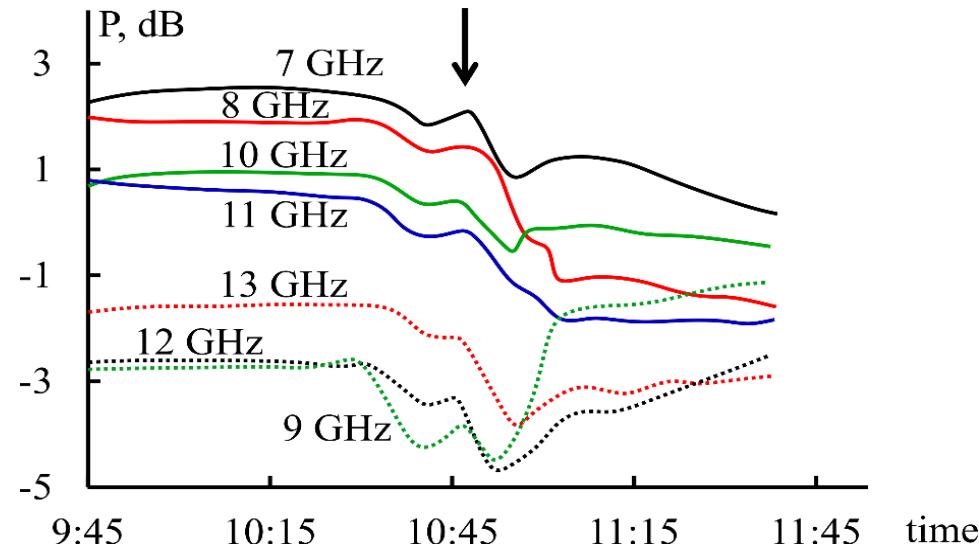
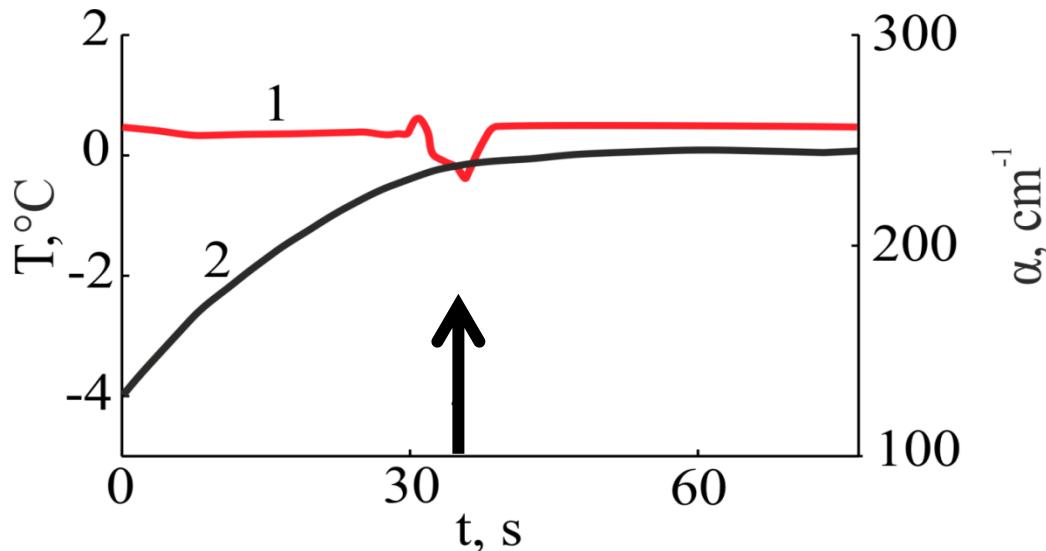


Схема установки для измерения мощности проходящего и отраженного излучения в микроволновом диапазоне вблизи температуры фазового перехода. 1 – приемник излучения, 2 – образец – блок льда, «Т» – термопара, «Г» – генератор

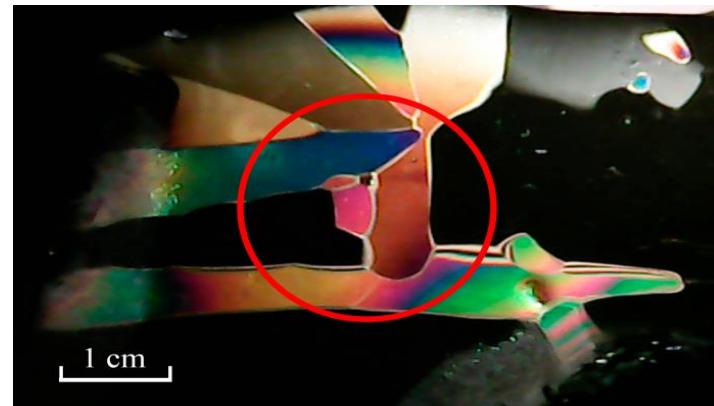


Зависимость мощность прошедшего излучения через блок льда на различных частотах от времени.

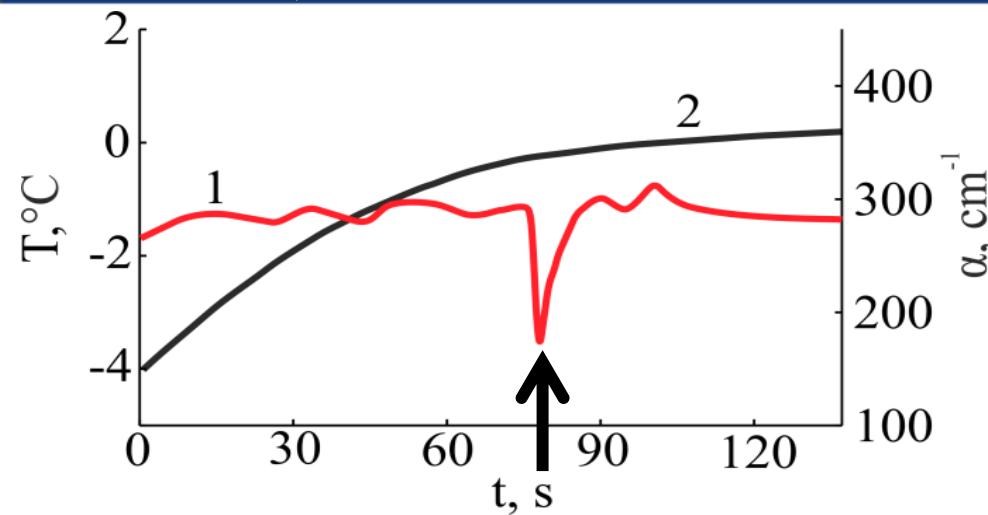
## Измерения мощности проходящего и отраженного излучения ИК диапазон (3,8–4,2 мкм)



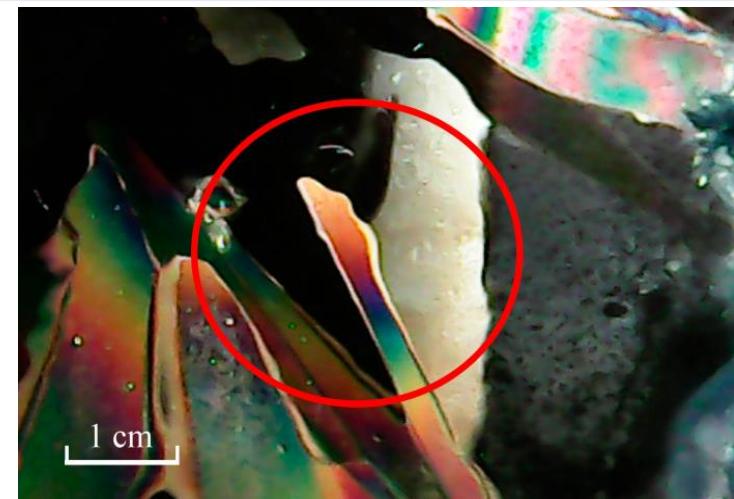
Результаты измерения коэффициента поглощения в диапазоне 3,8–4,2 мкм (1) и температура (2) в образце льда толщиной 0,1 мм в зависимости от времени нагревания; стрелочкой отмечен эффект «просветления»



## Измерения мощности проходящего и отраженного излучения ИК диапазон (10–16 мкм)



Результаты измерения коэффициента поглощения в диапазоне 10–16 мкм (1) и температура (2) в образце льда толщиной 0,1 мм в зависимости от времени нагревания; стрелочкой отмечен эффект «просветления»



Фотография образца льда в микроскоп при скрещенных поляризаторе и анализаторе. Окружностью отмечена область просвечивания



Фотография образца льда в микроскоп при скрещенных поляризаторе и анализаторе.  
Окружностью отмечена область просвечивания

# Выводы

- Обнаружено уменьшение значений действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда вблизи температуры фазового перехода лед-вода в широком интервале частот.
- Необходимо учитывать эффект «просветления» при радиометрических измерениях криогенных образований вблизи температуры 0°C.
- Необходимы дальнейшие исследования диэлектрических особенностей льда вблизи температуры фазового перехода лед-вода.
- Возможной причиной эффекта может являться плазмонный резонанс, который возникает при текучести льда на возникающих квазижидких проводящих пленках воды.



**Благодарю за внимание!**

lgc255@mail.ru