



# О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ МЕЗОСФЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ ОБЛАКОВ ПО ОТРАЖЁННОМУ РАДИОТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

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

*Институт природных ресурсов, экологии и  
криологии СО РАН  
lgc255@mail.ru*

2020

# Введение

Серебристые облака - светящиеся образования, регистрируемые после захода или перед восходом Солнца. Они образуются на высотах 80...90 км и состоят из мельчайших пылевых частиц с конденсированным на них льдом. Их можно наблюдать в полярных областях на широтах приблизительно выше  $50^\circ$  (рис. 1).



Рис. 1. Фото серебристых облаков. 20.06.2019. Заб. край. с. Преображенка.  $52^\circ$  с.ш.



Наиболее удивительное их свойство - отражать излучение радаров на частотах от единиц мегагерц до гигагерца [1]. Для объяснения этого аномального свойства выдвигалось предположение, что частицы льда могут быть покрыты тонкой металлической плёнкой натрия или железа. Однако это предположение не нашло обоснований. Кроме того, ледяные частицы в мезосфере имеют размеры порядка десятков нанометров, а их концентрация в единице объёма крайне мала и составляет значение  $\sim 10$  нг/м<sup>3</sup>.

В работе [2] нами выдвинута гипотеза о том, что металлические свойства частиц возникают из-за конденсации на диэлектрическую частицу кристаллической модификации воды - льда 0. Этот лёд был теоретически предсказан в 2014 году в ряде работ, например в [3], и экспериментально подтверждён в [4]. Особенность льда 0 состоит в том, что он образуется только из глубоко переохлаждённой воды и является сегнетоэлектриком. При его контакте с диэлектриком возникает слой высокой проводимости [5], которая определяет повышенный фактор электромагнитных потерь [4]. В этом случае, если частицы имеют нанометровые размеры, они создают резкое усиление рассеяния излучения из-за плазмонного резонанса [2, 6].

# Цель работы

- экспериментально подтвердить гипотезу.

Для этого выполнены лабораторные эксперименты по измерению пропускания лазерного излучения через пластины с осаждённым на них слоем льда 0 нанометровой толщины.

Кроме того, основываясь на известных теоретических и экспериментальных результатах по рассеянию излучения на анизотропных металлических частицах, которые создают заметное рассеяние до нулевых частот (рис. 2 для экстинкции) [6], предложено использовать метод микроволновой радиометрии для регистрации отражённого радиотеплового излучения Солнца от мезосферных облаков.

# Спектр экстинкции для проводящих наночастиц

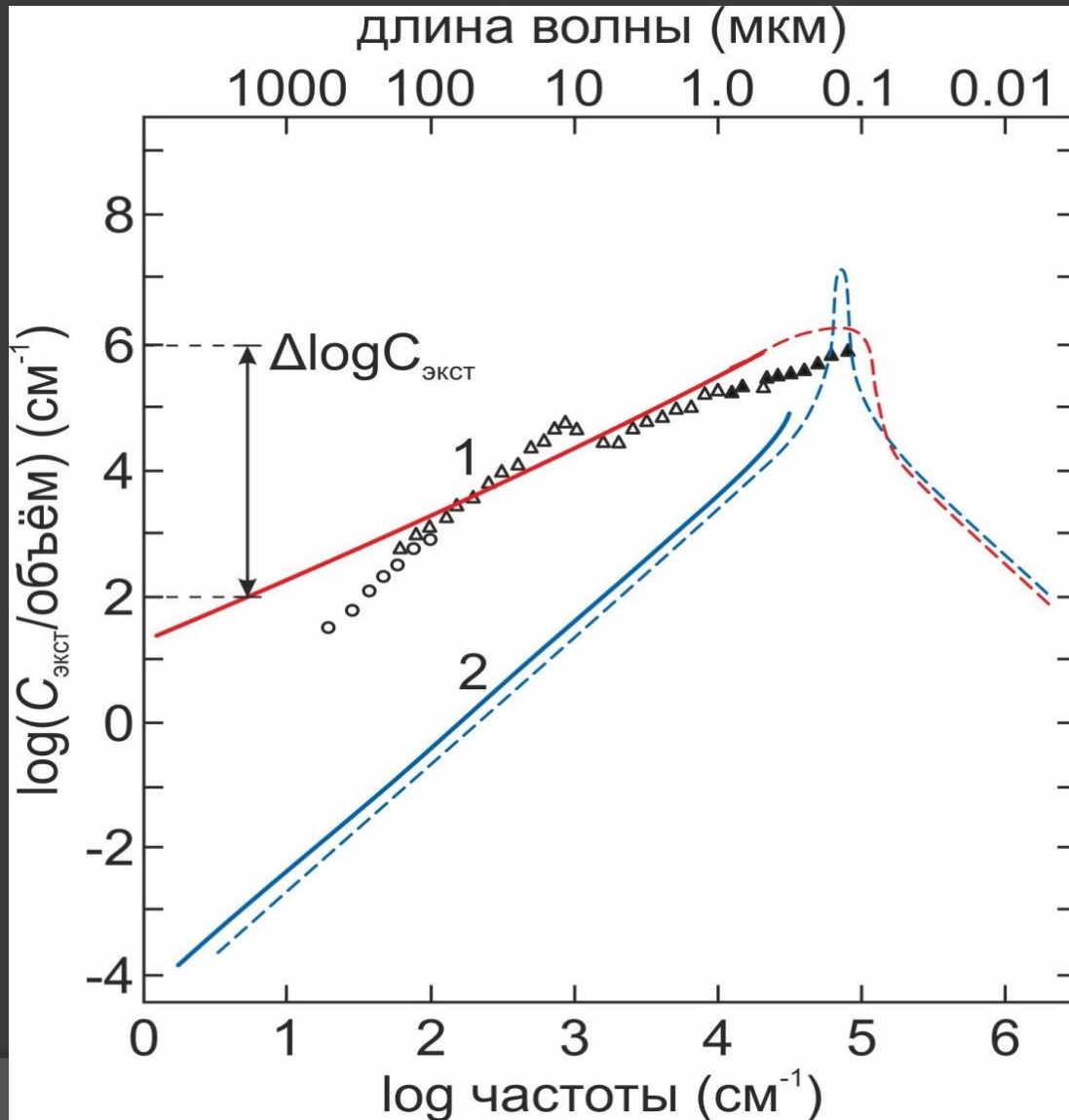


Рисунок 2 (Из работы [6]).

1 - Для анизотропных частиц (из алюминия),

2 - Для сферических частиц.

Эффект для  $\epsilon' < 0$ , максимум при  $\epsilon' = -2$  (на частоте Фрелиха, лежащей ниже плазменной частоты).

# Эксперименты

Лабораторный эксперимент по измерению прохождения излучения лазера и его методика приведены в работе [7]. В этом эксперименте обнаружили сильную экстинкцию в тонком слое льда 0 на подложках из различных прозрачных материалов (рис. 3). В новом эксперименте дополнительно исследовали коэффициент отражения излучения лазера на длину волны 0,52 мкм от аналогичного слоя на кварцевой подложке. Результаты экспериментов приведены на рис. 4. Из них следует, что вклад рассеяния в экстинкцию составляет приблизительно половину величины, что позволяет использовать результаты [6] для экстинкции при оценке отражения.

# Прохождение излучения

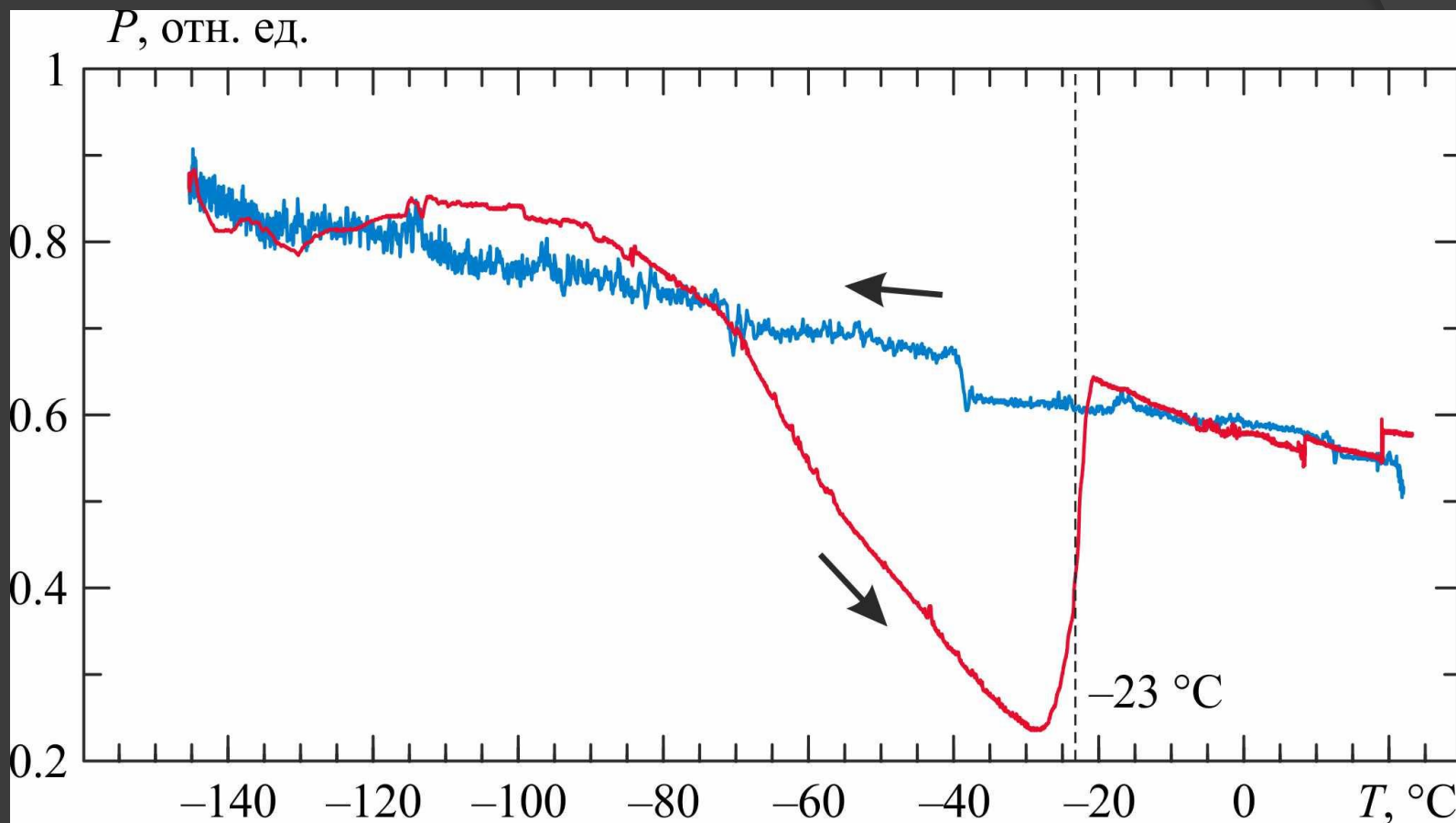


Рис. 3. Зависимость проходящей мощности лазерного излучения через пластинку из кварцевого стекла от ее температуры. Стрелками отмечено направление изменения температуры при ее циклическом изменении.



# Отражение излучения

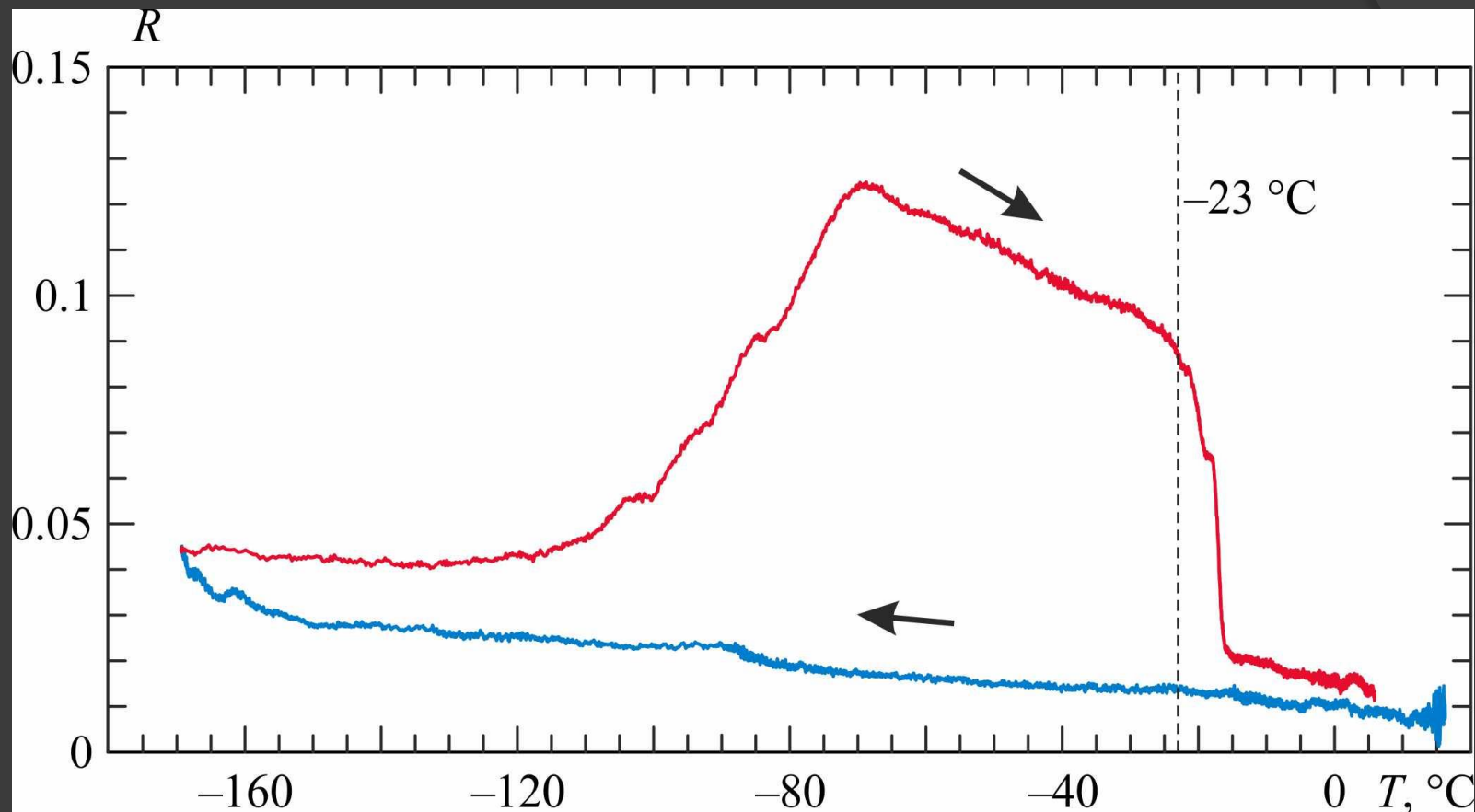


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения мощности лазерного излучения от кварцевой пластинки с осаждённым льдом  $0$  вблизи нормали к поверхности от температуры.

Как оказалось структура в виде плёнки из льда 0 нанометровой толщины на диэлектрической подложке сильно поглощает (и рассеивает) излучение лазера на длину волны 0,52 мкм.

Ввиду сильного рассеяния излучения ледяными частицами, обладающими проводящим слоем на границе лёд 0-диэлектрик, можно попробовать их зарегистрировать на более низких частотах в терагерцовом или гигагерцовом диапазонах. Как отмечалось выше серебристые облака наблюдали радаром мегагерцовых частот, но в этом случае используется мощное излучение порядка десятков киловатт.

В соответствии с графиками рис. 2 можно оценить эффективность экстинкции на частотах  $\sim 100$  ГГц по сравнению с видимым участком спектра. Уменьшение экстинкции и следовательно рассеяния составляет значение для конкретного случая из алюминиевых частиц около 30-40 дБ и оно слабо изменяется в пределах 20...100 ГГц. Примерно то же значение можно ожидать для отражения излучения (коэффициент отражения 0,001-0,0001), однако другой случай требует специального исследования.

# Схема установки для натуральных измерений

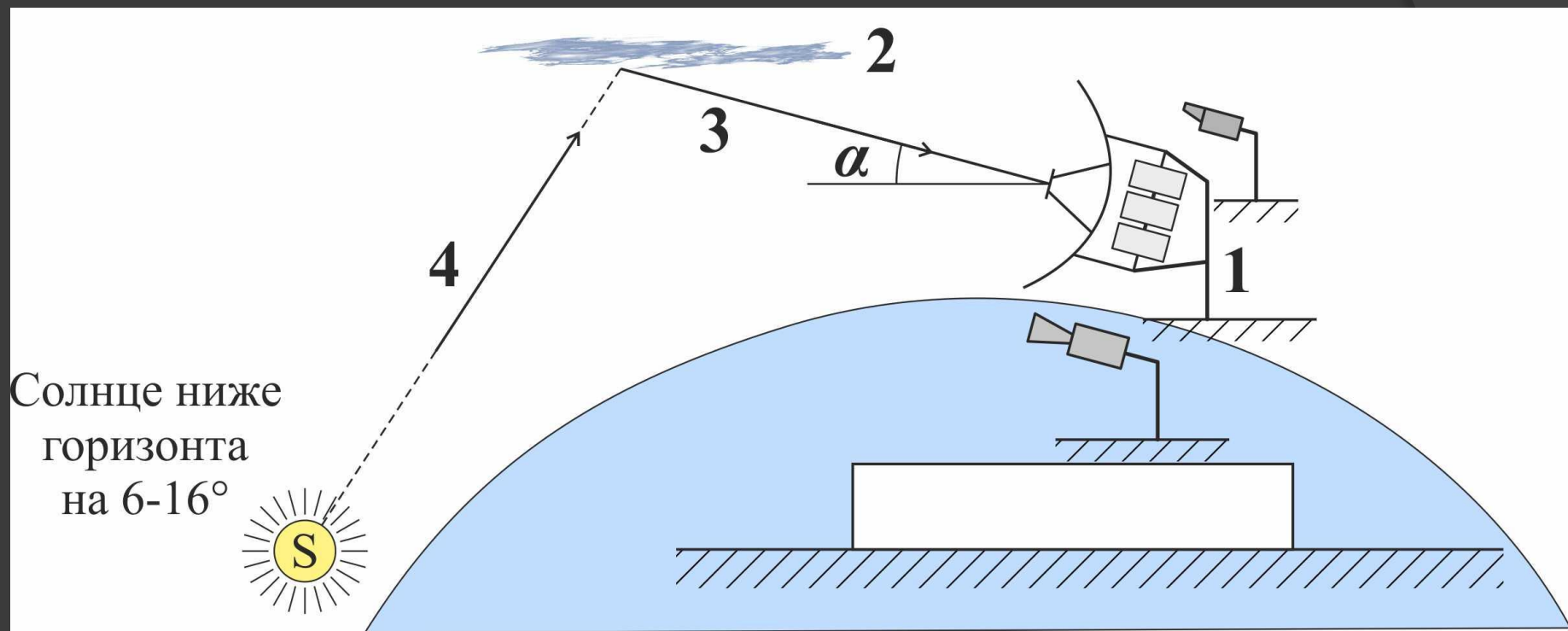


Рис. 5. Схема эксперимента: 1 – радиометрический комплекс на длины волн  $1.4-0.3$  см, радиометр на волну  $0.24$  см и видеокамера; 2 – мезосферный слой с рассеивающими ледяными частицами; 3 – рассеянная облаками радиация; 4 – радиотепловое излучение Солнца;  $\alpha$  – угол ориентации антенн.

Измерения выполнялись в Забайкальском крае на отрогах Яблонового хребта с координатами места установки приборов  $52^{\circ}$  с.ш. и  $113^{\circ}30'$  в.д. в летний период времени в 2019-20 гг. Наблюдения выполняли при заходе Солнца. На данной широте серебристые облака наблюдаются относительно редко. Визуально зафиксированы четыре случая их появления. Критерием их регистрации считали приблизительно равное значение приращения радиояркостной температуры в 4 используемых каналах: 1,4 см, 0,8 см, 0,3 см и 0,24 см. Чтобы избежать рассмотрения сложной проблемы переноса излучения в тропосфере и стратосфере, выбирали только события, при которых отсутствовали облачные образования. В этом случае также ожидали близких приращений радиояркостности, так как капельная влага создает повышенное погонное затухание в миллиметровом диапазоне. В случае кристаллических облаков малой толщины в тропосфере они слабее заметны в сантиметровом диапазоне.

В один из дней удалось выполнить условия приблизительного равенства приращений радиотеплового излучения рис. 6, 7. Из этих данных коэффициент отражения от зарегистрированного объекта в микроволновом диапазоне (при яркостной температуре Солнца  $\sim 5000$  K) оказался равным 0,001.

Однако свечение в оптическом диапазоне не было зафиксировано. Об этой особенности сообщали также в [1] при выполнении радарных и лидарных измерений. По нашему мнению отсутствие свечения (или отражения сигналов лидара) в ряде случаев может определяться снижением плазменной частоты (из-за её вариаций, зависящих от электрических характеристик материала частиц и их геометрии) и соответствующим ослаблением рассеяния на высоких частотах.

# Приращения радиотеплового излучения

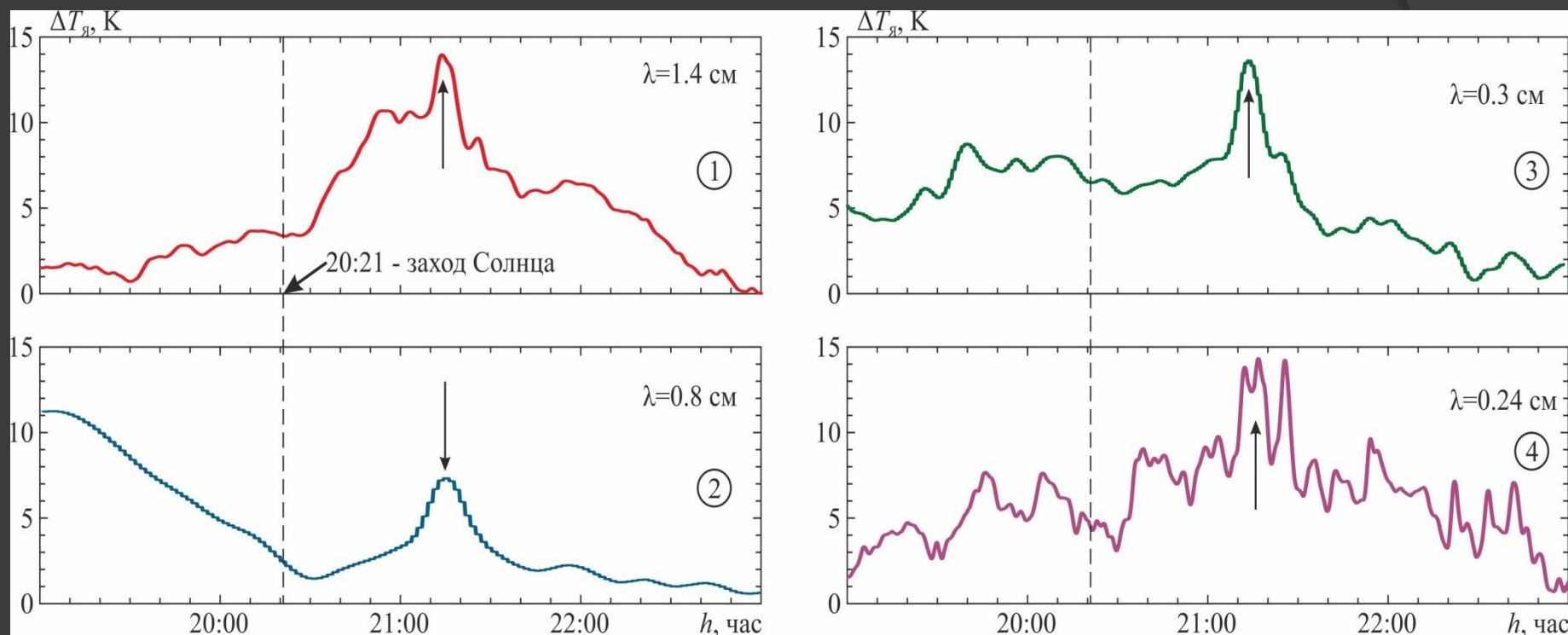


Рис. 6. Синхронные приращения радиояркости температуры при наблюдениях отражения от слоёв ледяных частиц. Дата измерений 27 августа 2019 г. Стрелками отмечены экстремумы радиояркости.

# Приращения радиотеплового излучения

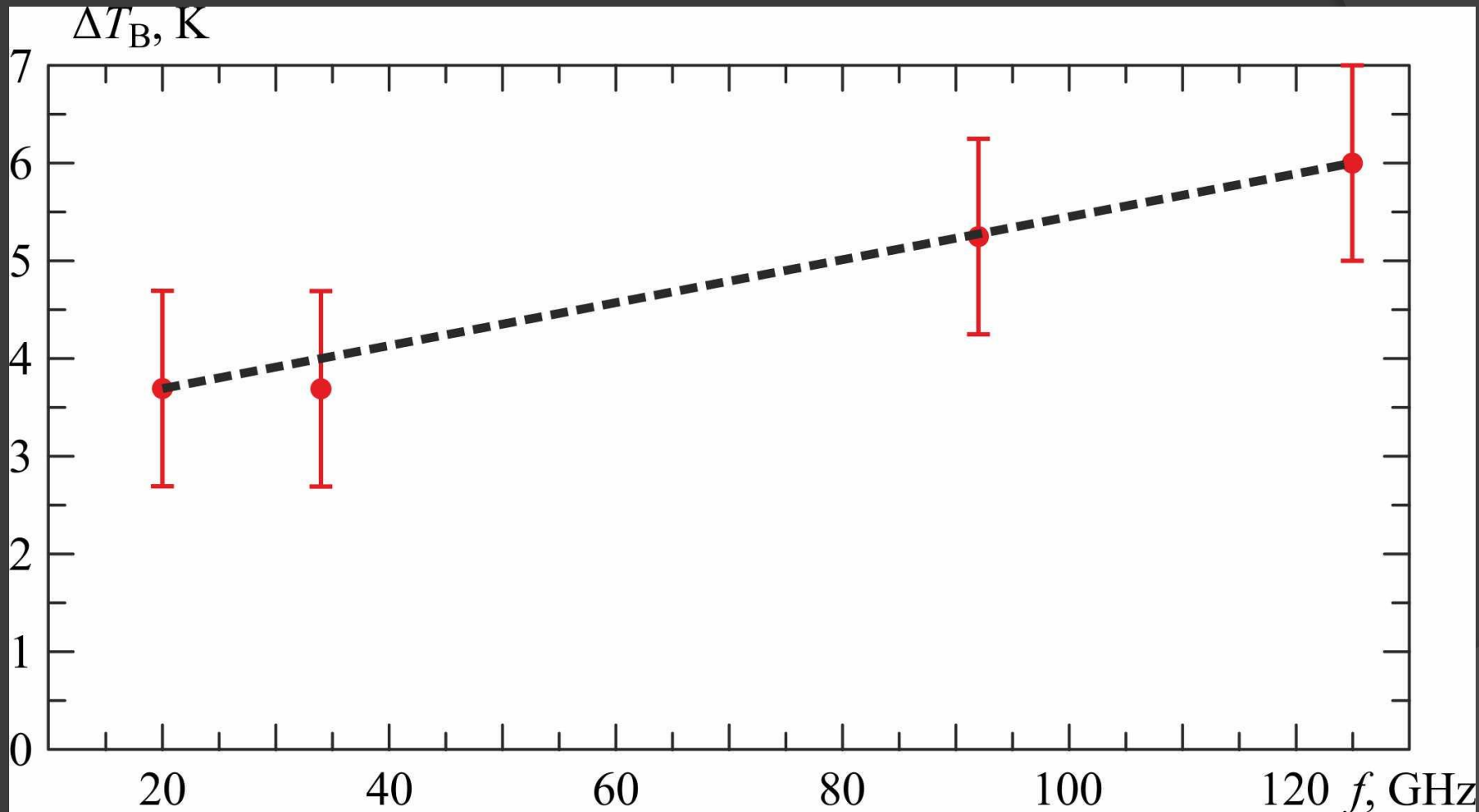


Рис. 7. Зависимость приращения радиояркостной температуры от частоты.

# Выводы

1. Предварительное исследование показало возможность регистрации серебристых облаков. При этом возникает много вопросов о механизмах образования проводящих частиц из льда 0 и их характеристик рассеяния излучения.
2. Облака из ледяных частиц из льда 0 могут образовываться в более низких слоях атмосферы, например, в стратосфере, так как для их образования требуются температуры ниже  $-23^{\circ}\text{C}$  [8]. Отмечены случаи отражения сигналов низкочастотных радаров от слоёв на высоте 48 км [1]. По-видимому, лёд 0 преимущественно может образовываться из газовой фазы (при химических превращениях), так как в случае жидкокапельной влаги и её перемещения в холодную область, она замерзает раньше, чем охладится до  $-30\dots -40^{\circ}\text{C}$ , поскольку необходимо учитывать разогрев при выделении теплоты фазового перехода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ  
(проекты № 18-05-00085, 20-05-00563).



# Литература

1. Ролдугин В.К., Черняков С.М., Ролдугин А.В., Оглоблина О.Ф. Вариации полярных летних мезосферных отражений во время появления неоднородностей серебристых облаков // Геомagnetизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 3. С. 343-349.
2. Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O. The possibility of observing noctilucent clouds in microwave radiometric measurements // Proc. SPIE. 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2019. V. 11208, P. 1120818/1-5.
3. Russo J., Romano F., Tanaka H. New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water // Nature Materials. 2014. V. 13. № 7. P. 733-739.
4. Бордонский Г.С., Орлов А.О. Признаки возникновения льда "0" в увлажненных нанопористых средах при электромагнитных измерениях // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. № 7-8. С. 483-488.
5. Korobeynikov S.M., Melekhov A.V., Soloveitchik Yu.G., Royak M.E., Agoris D.P., Pyrgioti E. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. № 6. P. 915-921.
6. Борен К. Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
7. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О. Пропускание электромагнитного излучения видимого диапазона тонким слоем льда 0, конденсированного на диэлектрическую подложку // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 111. № 5. С. 311-315.
8. 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.



**Благодарю за внимание!**