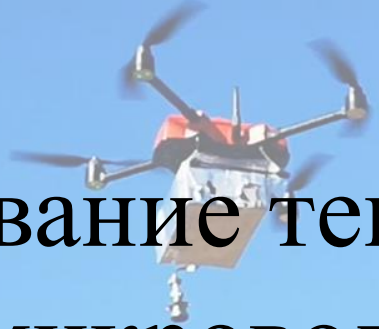


Исследование теплового излучения в микроволновом и ИК диапазонах с использованием БПЛА

Бордонский Г.С., Орлов А.О., Казанцев В.А., Козлов А.К.

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

e-mail: lgc255@mail.ru

Актуальность

В настоящее время радары космического базирования достигли пространственного разрешения земной поверхности, близкой для приборов оптического диапазона. Активные микроволновые системы в сочетании с пассивными системами позволяют более эффективно решать задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Однако существенным недостатком существующих радиометрических систем ДЗЗ в миллиметровом диапазоне – их низкое пространственное разрешение, что приводит к потере информации о локальных изменениях коэффициента излучения поверхности из-за усреднения по большим площадям.

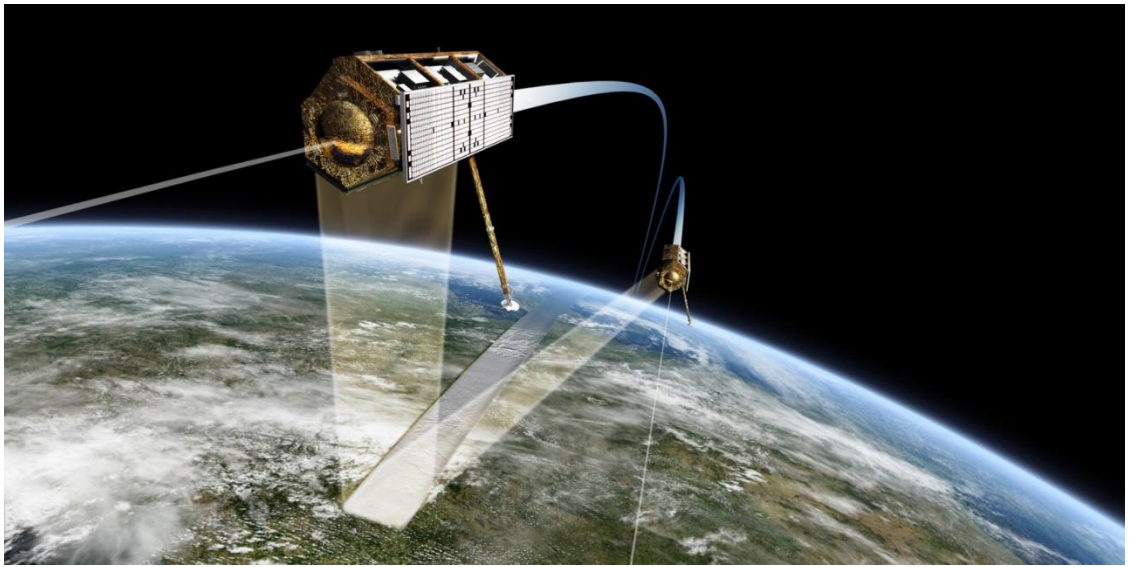


Рис. 1.
TerraSAR-X
and TanDEM-X

Актуальность

Микроволновые радиометрические измерения в миллиметровом диапазоне с высоким пространственным разрешением до 1–10 м могут быть достигнуты при установке радиометров на БПЛА. При этом одной из задач разработки является изучение возможностей такой системы для исследования земной поверхности.

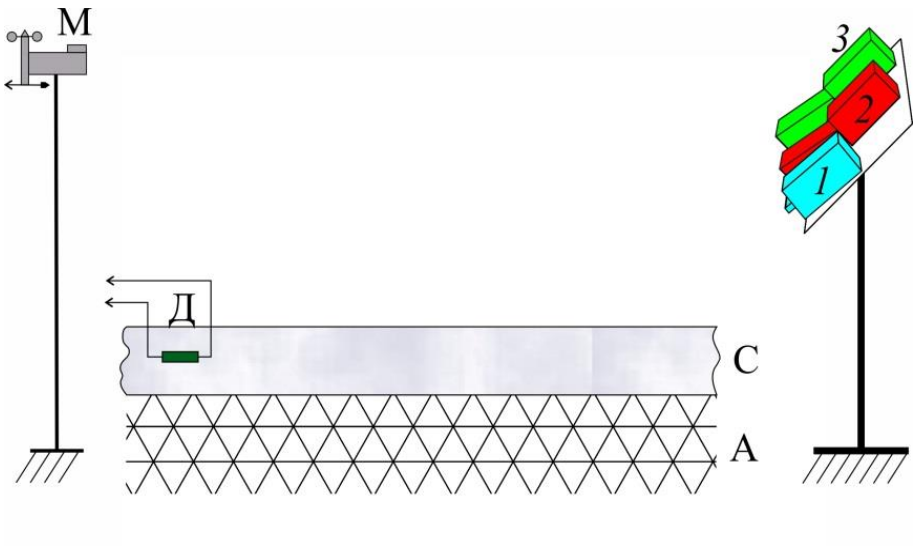


Рис. 2. Микроволновый радиометр на борту БПЛА

Эксперименты со снегом

Одной из важных задач использования радиометрической системы миллиметрового диапазона может являться измерение однородной структуры, находящейся в метастабильном состоянии, т.е. чувствительной к внешним воздействиям, например, температуре окружающей среды. Одним из таких объектов являются криогенные образования – небольшие поля снежного, ледяного покровов и относительно однородного замерзшего грунта.

В настоящей работе выполнены стационарные измерения характеристик снежного покрова при вращениях суточного изменения температуры.



Методика: В эксперименте были использованы радиометры на длины волн (λ): 8,8 мм; 3,3 мм с полосой частот ~3 ГГц и ИК участок 8-14 мкм. Радиометры устанавливались на высоте ~1 м над поверхностью снега. Диаграммы направленности антенн и объектива ИК-радиометра по уровню 0,5 около 7°. Угол наблюдения составлял ~45° и измерения выполнены на вертикальной поляризации. Калибровку приборов осуществляли по излучению безоблачного неба и эталонам черного тела. Ошибки измерений оценивалась значением порядка 1 К.

Рис. 3. Схема стационарной установки для измерения теплового излучения слоя снега (С) толщиной около 10 см на диэлектрической поверхности крыши здания (А). 1-3 – радиометры, М – метеостанция, Д – датчик температуры, установленный на глубине 6 см от поверхности снега

Результаты эксперимента со снегом

(Дата измерений: 22.02.2026 г.)

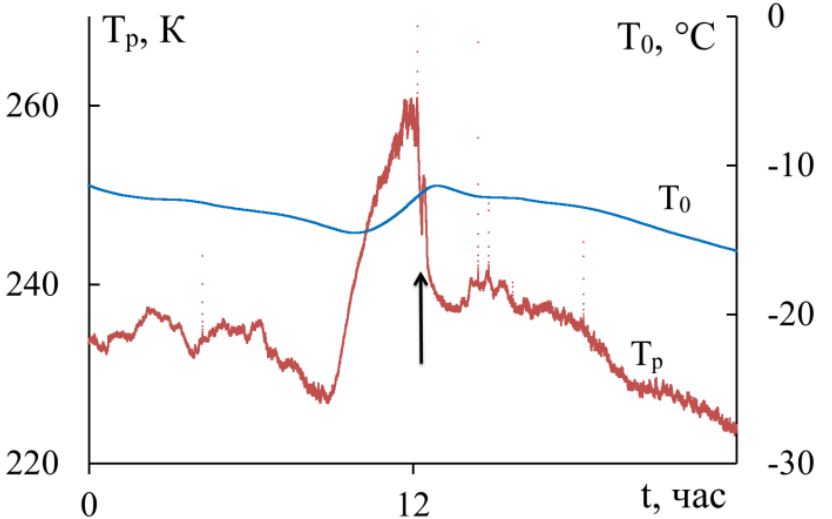


Рис. 4а. Термодинамическая температура внутри слоя снега на глубине 6 см и радиационная температура тонкого поверхностного слоя в ИК диапазоне

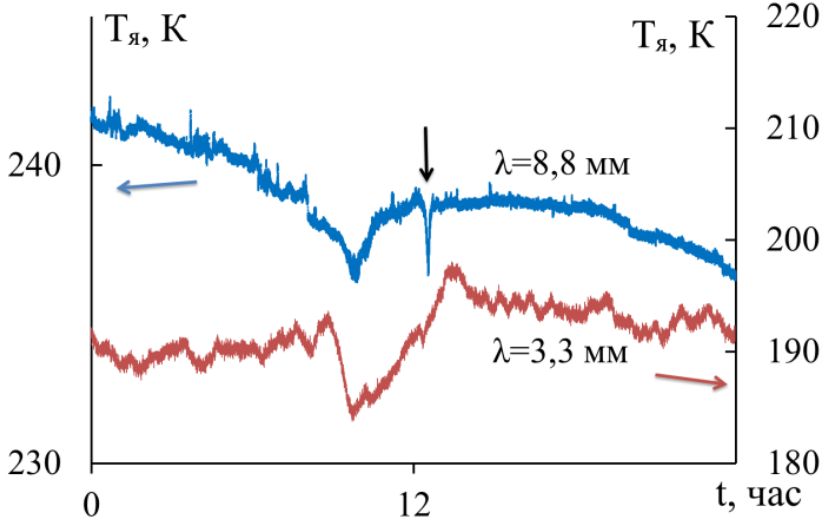


Рис. 4б. Радиояркостная температура объекта на двух длинах волн 8,8 мм и 3,3 мм.

Эксперимент показал, как нагревание верхнего слоя снега солнечным излучением приводит к росту температуры внутри слоя. При возрастании температуры снега по ИК измерениям на 30°С за время ~ 2 часов наблюдалось возрастание температуры слоя на глубине 6 см на 3,5°С.

Имеется сходство графиков, так и различие, указанное стрелкой. Разница радиояркостной температуры связана с эффектом просветления снега и уменьшением потерь вблизи 0°С и его различием для двух длин волн, что определяется относительно большим значением скин-слоя на волне 8,8 мм.

[*Бордонский и др. Изменение теплового излучения снежного покрова в миллиметровом и инфракрасном диапазонах при воздействии солнечного излучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23, № 4. С. 305-313. DOI 10.21046/2070-7401-2026-23-4-305-313*]

Результаты эксперимента со снегом

(Дата измерений: 03.03.2026 г.)

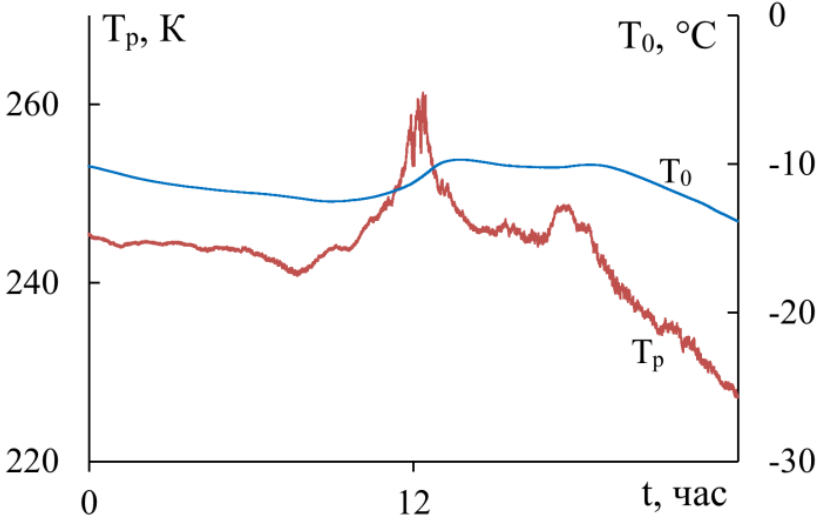


Рис. 5а. Термодинамическая температура внутри слоя снега на глубине 6 см и радиационная температура тонкого поверхностного слоя в ИК диапазоне.

Снег имеет более резкие приращения яркости, по сравнению со значением термодинамической температуры на глубине.

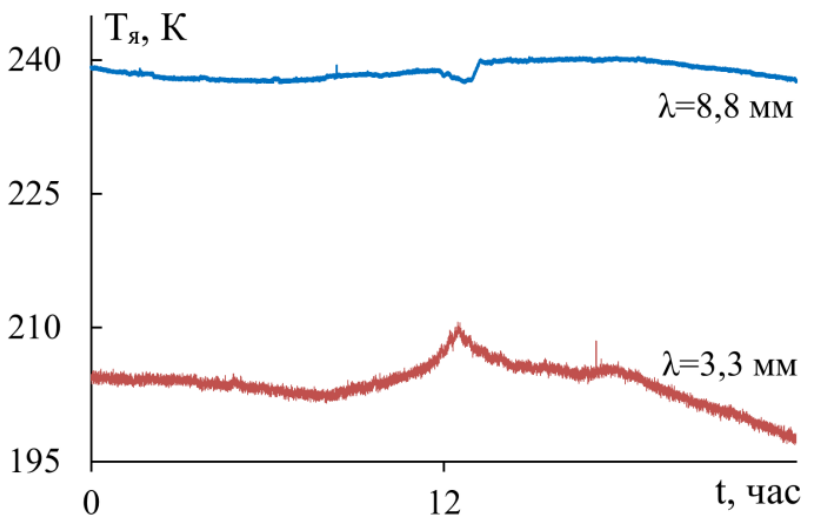
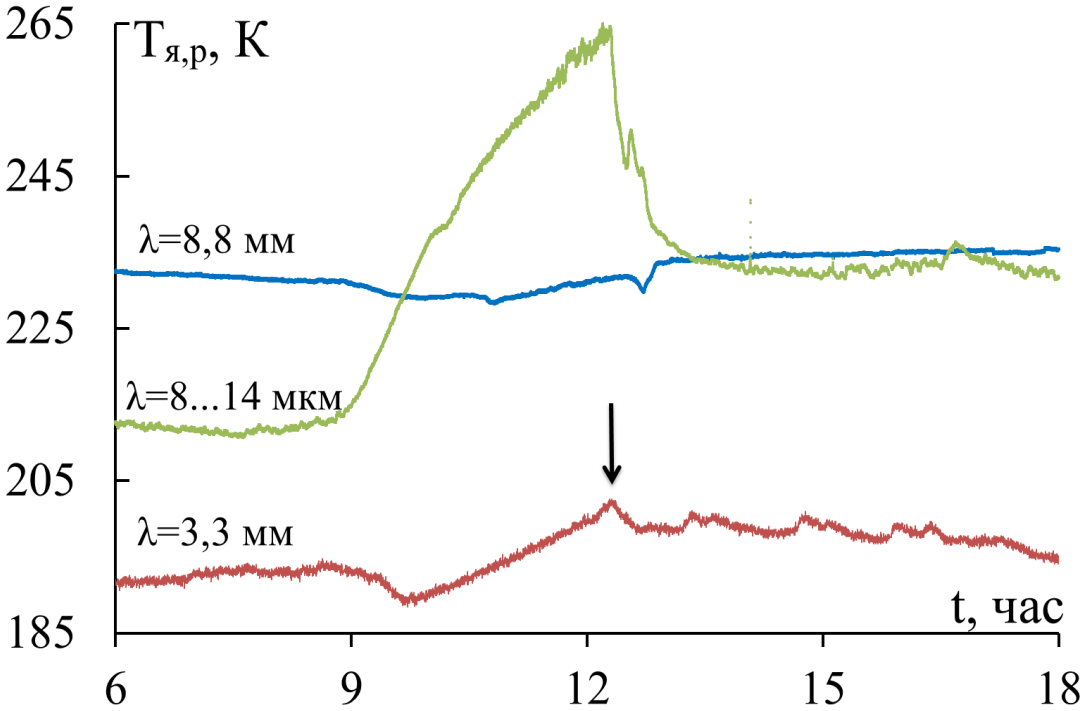


Рис. 5б. Радиояркостная температура объекта на двух длинах волн при разогреве снега солнечным излучением

Различие знаков приращения радиояркостной температуры на двух длинах волн при резком нагревании поверхностного слоя солнечным излучением. Различия возможно связываются с изменением вертикального распределения температуры верхнего слоя снежного покрова в скин слое.

Результаты эксперимента со снегом

(Дата измерений: 26.02.2026 г.)



Особенность графиков в области резкого падения мощности излучения в ИК диапазоне связывается с образованием в подповерхностном слое снега образований со льдом 0 сильно рассеивающим излучение при температуре –23°С (250 К), ниже которой происходило охлаждение слоя в ночное время

Рис. 6. Изменение радиояркостной температуры снежного слоя на волнах 3,3 мм и 8,8 мм и радиационной температуры в тепловом ИК диапазоне от времени при нагревании снега солнечным излучением. Стрелкой отмечена область, где при температуре –23°С происходит исчезновение включений из льда 0. Разница во времени образования экстремумов определяется различием толщин скин-слоя.

Результаты экспериментов по замерзанию воды

При образовании корки льда на поверхности воды наблюдается появление слоя с переходным значением диэлектрической проницаемости и возрастанием яркостной температуры. По мере роста толщины льда известно появление осцилляций и их исчезновение из-за усреднения в полосе частот с течением времени. Однако начальная фаза этого процесса не исследована из-за искажения при усреднении радиояркостной температуры на больших площадях. В выполненном лабораторном эксперименте излучение объекта регистрировалось с области замерзания воды с размерами ~ десяти сантиметров в миллиметровом и ИК диапазонах.

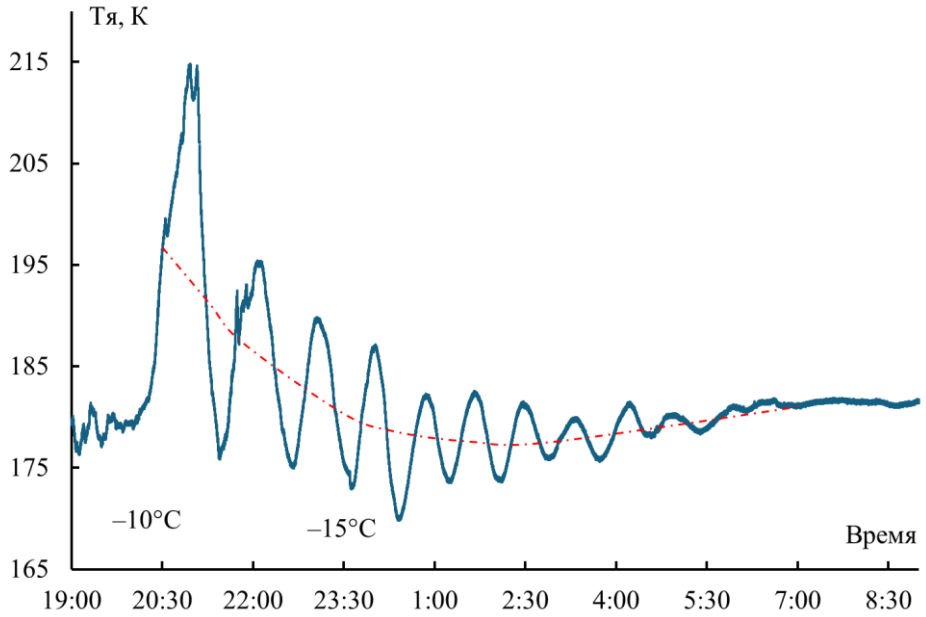


Рис. 7. Изменение радиояркостной температуры замерзающей водной поверхности в миллиметровом диапазоне на волне 8,8 мм. Измерения воды в кювете. В начальной стадии роста наблюдается понижение среднего значения радиояркостной температуры (штриховая линия). Дата: 02-03.11.2026. Температура воздуха изменялась от 0°C до –20°C за время измерений

Результаты экспериментов по замерзанию воды

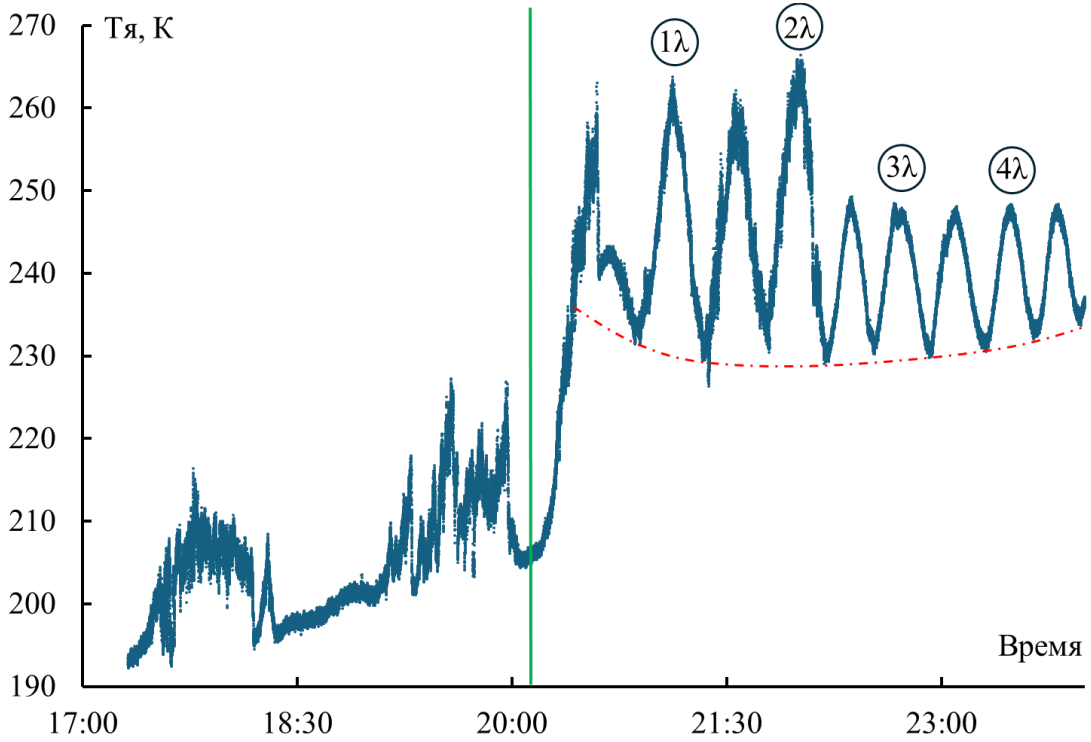


Рис. 8. Изменение радиояркостной температуры на волне 3,3 мм (λ_0) замерзающей водной. Дата: 02.11.2026.
До 20:09 (времени образования сплошной корки льда), что отмечено зеленой линией, наблюдалось образование отдельных ледяных образований и их исчезновение в пятне диаграммы направленности антенны. Цифры 1λ…4λ – значения толщины в длинах волн, образовавшегося льда, на которых интерферируют волны теплового излучения $\frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon'}}$. Штриховая линия – огибающая минимального значения радиояркостной температуры при интерференционных ее изменениях от времени

Выводы

1. В результате радиометрических измерений в миллиметровом и тепловом ИК диапазонах были установлены дополнительные механизмы, формирующие особенности теплового излучения снега, при изменении термодинамической температуры верхнего слоя глубиной до 10 см, вызванные солнечным излучением. Эти особенности, с одной стороны, связаны с динамическими явлениями из-за возникновения пластической деформации частиц и накоплением солей на поверхности. С другой стороны, в снеге происходят фазовые переходы: таяние верхнего слоя при 0°С, возникновение и исчезновение криогидратов солей и, возможно, образование особых структур из кластеров льда 0 при температурах ниже –23°С.

2. Обнаружены особенности формирующие тепловое излучение замерзающей воды при начальной фазе образования льда вблизи температуры фазового перехода. Эта область характеризуется переохлаждением воды на несколько градусов, значение которого определяется ветровым волнением жидкости. В случае волнения эффект исчезает. При образовании корки льда и возрастания яркостной температуры через некоторое время наблюдается некоторое понижение ее среднего значения, что определяется вымерзанием жидких включений вблизи 0°С.

Выводы

3. Аналогичные явления можно исследовать для открытого мерзлого грунта в условиях более низкой температуры воздуха (ниже температур –1…–10°C), где наблюдается фазовый переход воды в среде.

4. Общий вывод: Коротковолновый участок электромагнитных волн, используемый в ДЗЗ позволяет выделить особые явления в тепловом излучении для объектов криосферы вблизи температур фазового переход лед-жидкая вода (0…–23°C). Данный подход работает для систем с высоким пространственным разрешением и со значительным разносом частот зондирования (8,8 мм и 10 мкм). Особенно эффективна данная методика для суточных измерений слоистых ледовых и дисперсных структур при их существенном нагревании-охлаждении солнечным излучением.

Благодарности и финансирование

- Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-27-00533 «Разработка и изучение возможностей применения сканирующего радиометра миллиметрового диапазона с использованием БПЛА»



Российский
научный фонд



Благодарю за внимание!