

ОСОБЕННОСТИ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КРИОСФЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА

© 2025 г. А. А. Гурулев*, В. А. Казанцев, А. К. Козлов

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

**e-mail: lgc255@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.04.2025 г.

После доработки 28.05.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

Радиометрические измерения криосферных образований в микроволновом диапазоне с использованием радиометров, установленных на борт БПЛА, — уникальное средство для диагностики их состояний, особенно в труднодоступных местах. При этом следует непрерывно регистрировать угол наблюдения, а также учитывать рельеф местности. Выполнены измерения разнообразных криосферных образований на частоте 34 ГГц.

Ключевые слова: микроволновый диапазон, пресный ледяной покров, криосферные образования, БПЛА, радиояркостьная температура

DOI: 10.7868/S2412376525030073

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что на 20% всей площади Земли температура приземного слоя атмосферы имеет значение ниже температуры фазового перехода лёд–вода (Хромов, Петросянц, 2012). Очевидно, что при дистанционном зондировании земной поверхности необходимо исследовать диэлектрические характеристики криосферных образований в широком частотном диапазоне. Эти знания позволяют получать информацию о средах, находящихся при отрицательной температуре. Так, например, с использованием зондирующей аппаратуры, установленной на различных космических аппаратах, можно определять площадь арктических льдов, которая активно сокращается (Матвеева и др., 2020), определять сплочённость льда (Алексеева и др., 2021), выявлять области загрязнения снежного покрова (Пасько и др., 2020), следить за состоянием горных ледников (Хромова и др., 2021), выявлять особенности пресных ледяных покровов (Хвостов и др., 2017) и т.д. Для этих целей используют не только видимый и инфракрасный диапазоны, но и микроволновый.

Однако имеется ряд задач, связанных с диагностикой криосферных сред, которые требуют оперативного принятия решений. Одна из таких

задач — мониторинг автомобильных дорог, которые расположены на ледяных покровах. К сожалению, существуют случаи с печальными последствиями при переправах из-за некачественного (или полного его отсутствия) мониторинга трассы по ледяному покрову. Практически ежегодно под ледяной покров проваливаются транспортные средства (Шавлов, 1997). Поэтому необходим мониторинг подобных маршрутов. К одному из таких методов относится георадарный метод измерений (Топольский и др., 2012). Георадары работают в частотном интервале от 20 до 1500 МГц. Ввиду особенностей диэлектрических свойств льда и воды в данном диапазоне можно выявлять внутренние особенности мёрзлых объектов, например толщину пресного ледяного покрова. Излучение в мегагерцовом диапазоне проникает в ледяной покров на несколько десятков метров. Данная величина зависит от частоты, температуры и внутренних особенностей криосферного объекта. Этот метод имеет ряд недостатков, например, если в ледяном покрове имеются различные примеси, то уже невозможно с достаточной высокой точностью определить толщину ледяного и снежного покровов (Котляков и др., 2017). Имеются работы, в которых георадары устанавливаются на беспилотные летательные аппараты (Цепелев, 2023) с целью мониторинга

ледяных покровов. Однако при этом методе исследования также имеются недостатки. Во-первых, стоит отметить малое полётное время данных БПЛА. Во-вторых, георадары, установленные на БПЛА, имеют небольшую высоту полёта (не более 1 м) над исследуемой территорией, что приводит к затруднению их применения в гористой местности. По данным причинам использование георадаров для изучения состояния криосферных объектов в труднодоступных местах, например для изучения состояния горных ледников, затруднительно.

Более широкий круг задач можно решать при зондировании криосферных образований с использованием приборов на частотах выше, чем у георадаров, например в микроволновом диапазоне. Это связано не только с уменьшением длины волны, но и с микроволновыми свойствами среды, которые зависят от многих факторов. Например, у льда при увеличении длины волны мнимая часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости уменьшается, из-за счёта скин-слоя для пресного льда (с солёностью 2 мг/кг) при его температуре -5°C на длине волны 1 мм составляет ~ 4 см, на длине волны 1 см — ~ 2.5 м, на длине волны 5 см — ~ 40 м. Наличие примесей во льду, даже в малых количествах, резко снижает это значение, что связывается с увеличением значений мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости (Бордонский, Гурулев, 2008). Также на диэлектрические характеристики льда оказывает влияние и температура среды (Глазовский, Мачерет, 2014). Используя эти данные, по радиотепловому излучению можно выявлять ряд внутренних особенностей исследуемых криосферных образований.

Для измерения радиояркостной температуры используют микроволновые радиометры, которые принимают тепловое излучение на определённой длине волны (Кутуза и др., 2016). Радиометры устанавливают на различные носители: ИСЗ, водные суда, автомобили, самолёты. Однако в последнее время широкое распространение получили БПЛА, которые позволяют решать ряд практических задач, например для сельскохозяйственных нужд (Романец, Мудриченко, 2024) или для работ с целью измерения характеристик прибрежной части морей как во время ледостава, так и в свободной ото льда прибрежной зоне в видимом и инфракрасном диапазонах (Кубряков и др., 2021; Жук и др., 2022). Микроволновый радиометр также устанавливают на борт БПЛА с целью выявления внутренних

особенностей излучаемых объектов. Так, в работе (Сидоров и др., 2022) авторам удалось обнаружить возможные протечки земляных дамб по увеличению влажности почв верхнего слоя тела дамбы по изменению радиояркостной температуры ($T_{\text{я}}$) таких участков, используя радиометрический приёмник, работающий на частоте 5.5 ГГц, установленный на беспилотный вертолёт.

Рассмотрение особенностей использования микроволновой радиометрии криосферных образований с борта БПЛА и является целью настоящей работы. Данный вопрос исследован на недостаточно высоком научном уровне, практически отсутствуют научные работы по данной тематике. Актуальность нашей работы вытекает из практической необходимости оперативного мониторинга труднодоступных криосферных объектов, в частности для мониторинга ледовых переправ, исследований состояний пульсирующих ледников, обнаружения наледных образований, которые формируются под снежным покровом.

МИКРОВОЛНОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЬДА

Проникающая способность электромагнитного излучения в среду зависит от её мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости. На рис. 1 приведены диэлектрические характеристики пресной воды и льда без примесей в зависимости от длины волны излучения. Эти значения вычислены по формулам, приведённым в работах (Бордонский, 1995; Бордонский и др., 2022). При расчёте диэлектрических параметров воды использовались новые данные о её физико-химических свойствах, а именно: учитывалось сосуществование в ней двух кластеров воды — высокой (HDL) и низкой (LDL) плотностей, которые взаимодействуют друг с другом на пикосекундных временах (Holtan et al., 2013).

Как видно из приведённых графиков (см рис. 1), ϵ'' и ϵ' отличаются для двух типов веществ, что приводит к существенным различиям значений мощности радиотеплового излучения в микроволновом диапазоне при пассивной радиолокации для льда и воды; соответственно, и для активной радиолокации (проникающая способность электромагнитного излучения выше, когда ϵ'' ниже).

Отмечена зависимость мнимой и действительной частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости для льда от температуры и солёности. С понижением температуры

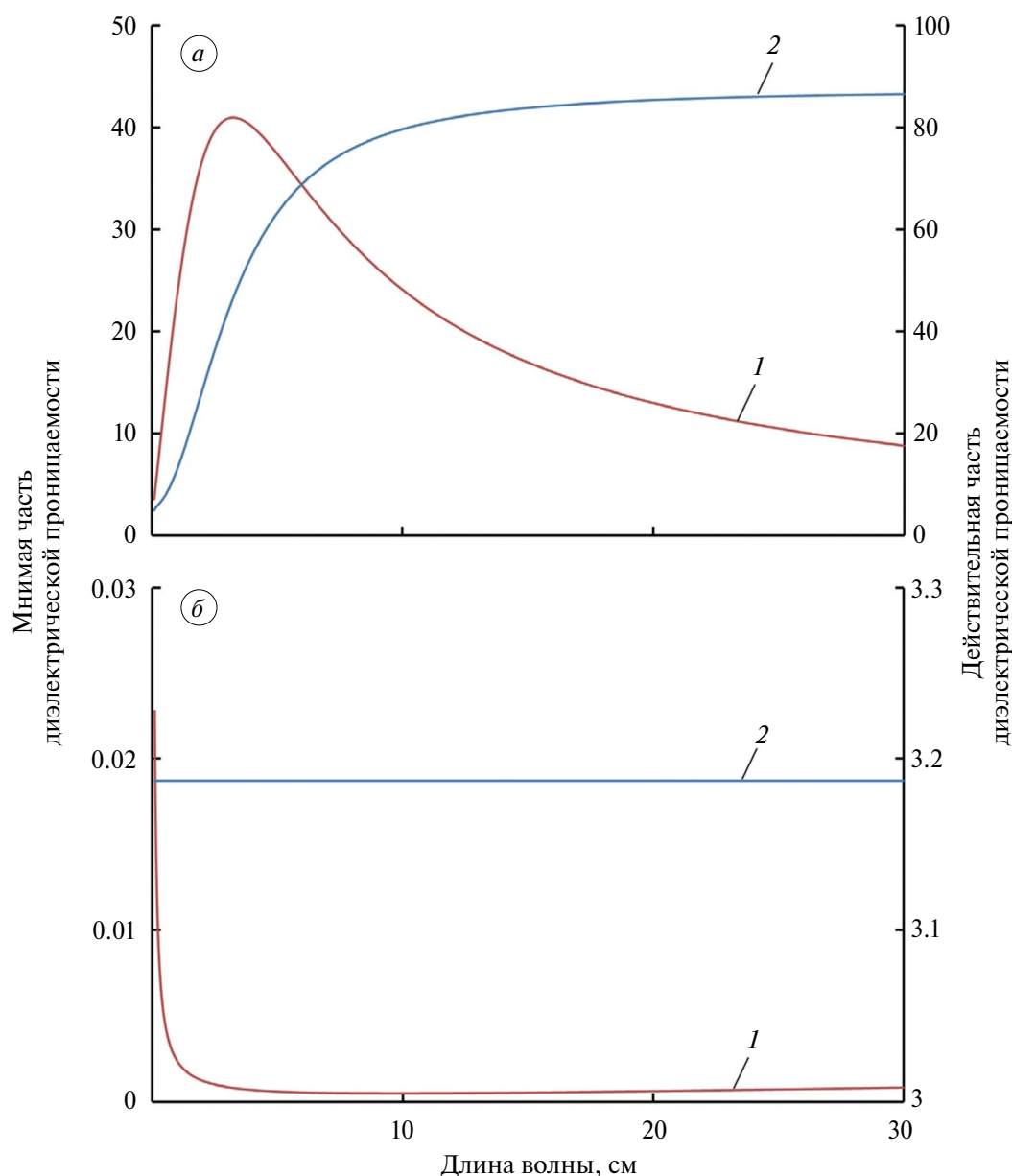


Рис. 1. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости от длины волны для воды при температуре +1 °C (а), для пресного льда при температуре -1 °C (б): 1 – мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости, 2 – действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости

Fig. 1. Dependences of the real and imaginary parts of the complex relative permittivity on the wavelength for water at a temperature of +1 °C (a), for fresh ice at a temperature of -1 °C (b): 1 – imaginary part of the complex relative permittivity, 2 – real part of the complex relative permittivity

значение ϵ'' понижается, а с повышением концентрации солей — повышается. Для льда без примесей на длине волны 0.88 см значение мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости 0.0029 при температуре -1 °C, причём с понижением температуры её величина практически не изменяется. При увеличении концентрации солей во льду до 50 мг/кг

при температуре -1 °C значение мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости для длины волны 0.88 см увеличивается на 10%, а при температуре -15 °C — всего на 4%. Отмечено, что данные изменения значений ϵ'' существенно влияют на излучательные и отражательные свойства криосферных объектов, содержащих солевые включения. Расчёты

выполнены по формуле, приведённой в работе (Бордонский, Гурулев, 2008).

Также следует учитывать и концентрацию различных примесей во льду, которые захватываются в момент его становления, в виде минеральных частиц, пузырей и растительности, которые тоже влияют на значение ϵ' и ϵ'' (Бордонский и др., 1994).

Пристальное внимание при радиолокационных исследованиях криосферных объектов следует обращать на обнаруженные особые температурные точки для холодной воды, описанные в работе (Гурулев, Бордонский, 2024). Вышеуказанные температуры имеют значения: 0°C (температура фазового перехода лед–вода), -23°C (температура образования льда 0 из переохлаждённой воды), -41°C (температура гомогенной нуклеации), -45°C (температура на линии Видома при нормальном атмосферном давлении, в области которой возможно некоторое возрастание электромагнитного затухания). Жидкая объёмная вода при данных температурах может наблюдаться в поровом пространстве (растительность, грунты и т.п.).

В связи с вышесказанным при выполнении активных или пассивных радиолокационных измерений криосферных структур необходимо учитывать физико-химические характеристики среды для правильной интерпретации получаемой информации с радиолокационной аппаратуры.

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРИОСФЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Пассивные методы радиолокации позволяют определять мощность собственного теплового излучения, подчиняющегося закону излучения Планка (в микроволновом диапазоне закон Рэлея–Джинса). Данное излучение, как было сказано выше, зависит от диэлектрических характеристик среды (для немагнитных сред) и термодинамической температуры. Мерой данного излучения служит радиояркость температура, которая определяется для полубесконечных плоскостных сред по формуле $T_{\text{я}} = T_0(1 - |R|^2)$, где $T_{\text{я}}$ – радиояркость температура, T_0 – термодинамическая температура, R – коэффициент Френеля, зависящий от диэлектрических свойств излучающей среды и угла наблюдения.

Выполнены измерения и расчёты радиояркости температуры для длины волны 0.88 см в свободном пространстве. Расчёты $T_{\text{я}}$

выполнялись для плоскостной, неизотермической среды, представляющей из себя ледяной покров, лежащий на водной поверхности пресного водоёма. Теория расчёта приведена в работах (Клепиков, Шарков, 1992; Репина и др., 2012). Наличие снежного покрова при расчётах не учитывалось. Обоснование длины волны 0.88 см связано с тем, что для более длинноволновой части (сантиметрового или дециметрового диапазонов) растущий ледяной покров не показывает больших вариаций радиояркости температуры, связанной с интерференционными явлениями, происходящими в плоских слоистых структурах.

Мы использовали изготовленный в Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН радиометрический приёмник на частоту 34 ГГц, с шириной полосы 2.3 ГГц. Флуктуационная чувствительность радиометра составляла 0.05 К при постоянном времени 1 с. Для уменьшения влияния уровня боковых лепестков антенны мы использовали узконаправленную скалярную гофрированную рупорную антенну с диаметром апертуры 45 мм, диаграммой направленности 10° . Эта рупорная антенна имеет небольшие геометрические размеры, а соответственно, и массу, что является существенным фактором для установки микроволнового радиометра на квадрокоптер. Измерения выполняли на вертикальной поляризации.

При использовании радиометрического приёмника на борту БПЛА необходимо учитывать вариации угла наблюдения. Это связано с тем, что $T_{\text{я}}$ подстилающей поверхности существенно зависит от него. Так, на рис. 2, а приведена зависимость радиояркости температуры от угла наблюдения при минерализации льда 1 мг/кг и толщинах 30, 60 и 120 см. На рис. 2, б показаны разность между вертикальной и горизонтальной поляризациями. Как видно из приведённых графиков, минимальная разность $T_{\text{я}}$ наблюдается для углов, близких к надирному. Для углов, близких к 20 градусам, разность достигает значений около 5 К. По этой причине при исследовании теплового излучения ледяного покрова и других криосферных объектов необходимо производить зондирование на углах, близких к надиру, но не в надир. Это позволит минимизировать ошибки, связанные с изменением угла крена беспилотного летательного аппарата.

При радиометрических измерениях также следует учитывать интерференцию волн, которая возникает в результате переотражений излучения на границах вода–лёд и воздух–лёд. Так, на

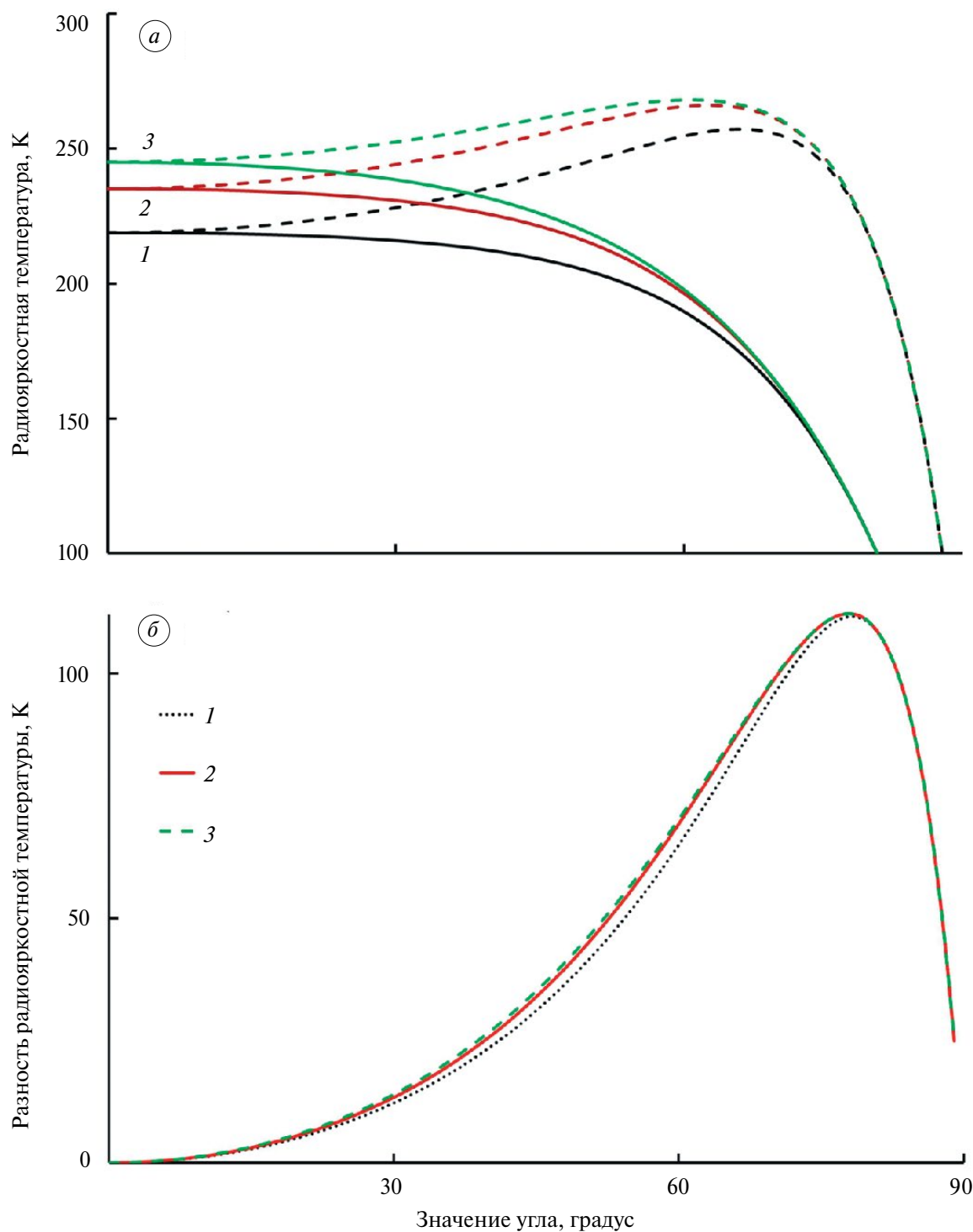


Рис. 2. Зависимости радиояркой температуры ледяного покрова на длине волны 0.88 см от значения угла наблюдения (φ) для горизонтальной (сплошная линия) и вертикальной (пунктирная линия) поляризаций (а), разность радиояркой температуры между вертикальной и горизонтальной поляризациями в зависимости от значения угла наблюдения (б). Минерализация льда – 1 мг/кг. 1 – толщина ледяного покрова (h) 30 см, 2 – $h = 60$ см, 3 – $h = 120$ см

Fig. 2. Dependence of the brightness temperature of the ice cover at a wavelength of 0.88 cm on the value of the observation angle (φ) for horizontal (solid line) and vertical (dashed line) polarizations (a), the difference in brightness temperature between vertical and horizontal polarizations depending on the value of the observation angle (b). Ice mineralization – 1 mg/kg. 1 – ice cover thickness (h) 30 cm, 2 – $h = 60$ cm, 3 – $h = 120$ cm

рис. 3 приведены расчётные значения радиояростной температуры ледяного покрова в зависимости от его толщины. Расчёты выполнены на горизонтальной и вертикальной поляризациях для углов наблюдения 10 и 20°. При расчётах солёность льда была принята 30 мг/кг. Относительно большая величина количества солей обосновывается тем, что, как показывают натурные измерения, при быстром становлении ледяного покрова в пресном водоёме концентрация солей во льду может достигать 30% от исходной минерализации воды. Затем при длительном существовании пресного ледяного покрова его минерализация понижается и достигает значений около 1 мг/кг. Эффект опреснения ледяного покрова также описан и для морского льда (Нагурный и др., 2005).

Как видно из приведённых графиков, наблюдаются вариации радиояростной температуры, связанные с интерференцией излучения. По мере роста льда интерференция затухает и практически прекращается при толщине ледяного покрова 10 см. Однако следует учесть, что при меньших концентрациях солей данная интерференция прекратится при больших толщинах ледяного покрова, как показано в работе (Гурулев и др., 2011), где рассматриваются вопросы вариаций мощности радиотеплового излучения для пресных ледяных покровов. Существенная разница $T_{\text{я}}$ для значений углов наблюдений 10 и 20° достигается при толщинах около 5 см и имеет значение ~30 К. Учтено, что по мере увеличения диаграммы направленности антенны, а также увеличения ширины полосы

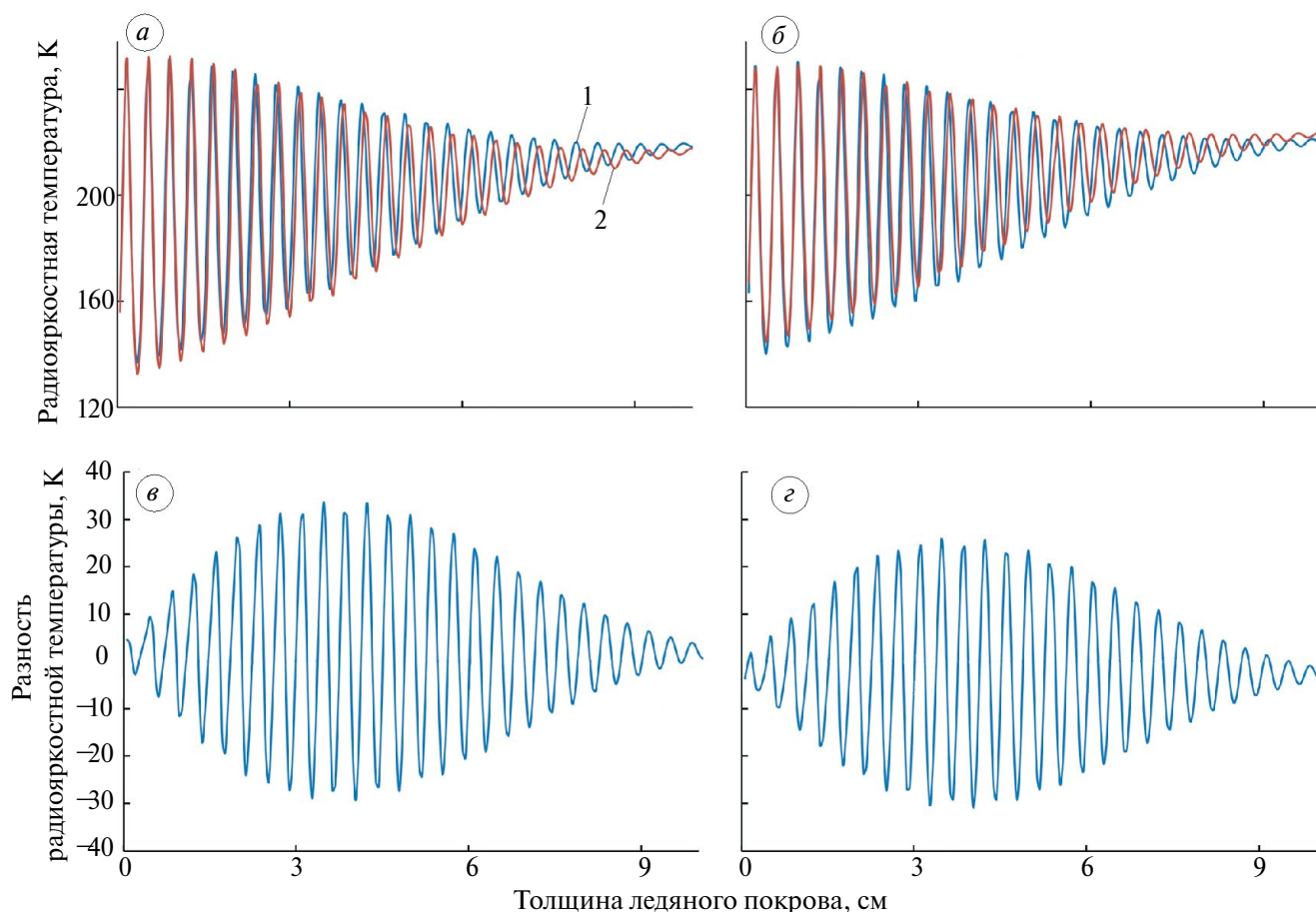


Рис. 3. Зависимости радиояростной температуры растущего ледяного покрова на длине волны 0.88 см при различных углах наблюдения для горизонтальной поляризации (а), для вертикальной поляризации (б), разность радиояростной температуры ($T_{\text{я}}(10^\circ) - T_{\text{я}}(20^\circ)$) для горизонтальной поляризации (в), разность радиояростной температуры ($T_{\text{я}}(10^\circ) - T_{\text{я}}(20^\circ)$) для вертикальной поляризации (з). 1 – угол наблюдения 10°, 2 – угол наблюдения 20°

Fig. 3. Dependences of the brightness temperature of the growing ice cover at a wavelength of 0.88 cm at different observation angles for horizontal polarization (a), for vertical polarization (b), the difference in the brightness temperature ($T_{\text{я}}(10^\circ) - T_{\text{я}}(20^\circ)$) for horizontal polarization (v), the difference in the brightness temperature ($T_{\text{я}}(10^\circ) - T_{\text{я}}(20^\circ)$) for vertical polarization (z). 1 – observation angle 10°, 2 – observation angle 20°

пропускания радиометрической аппаратуры вариации $T_{\text{я}}$ уменьшаются.

Для определения влияния угла зондирования на мощность теплового излучения выполнены натурные измерения, связанные с определением излучательных характеристик относительно тонкого слоя пресного льда (до 10 см) в миллиметровом диапазоне. Для этих целей в пресном ледяном покрове озера была изготовлена ниша с размерами 110×120 см и глубиной 40 см, которая заполнялась водой с минерализацией ~100 мг/л. Под действием отрицательных температур воздуха на водной поверхности происходил рост льда. На высоте 210 см от водной поверхности был размещён микроволновый радиометр. Угол наблюдения составлял 20°. Периодически угол изменяли до 15°. Измерения выполнялись на горизонтальной поляризации. Фотография измерительной установки показана на рис. 4.

В результате трёх суток измерений были получены данные, представленные на рис. 5. Как видно из приведённого графика, наблюдаются осцилляции радиояркостной температуры, характеризующей мощность радиотеплового излучения среды. Эти осцилляции являются результатом интерференции электромагнитного излучения от верхней и нижней границ ледяного покрова. Это связано с увеличением толщины слоя ледяного покрова, что подтверждает расчётное значение радиояркостной температуры. В конце эксперимента толщина свежееобразованного льда составила 85 мм. Цифрой 1 отмечено время, когда на растущий ледяной покров естественным путём выпал влажный снег толщиной до 5 см. Фотография со снегом показана на рисунке выше (см. рис. 4, б). Высокая концентрация воды в снеге связана с тем, что температура окружающей среды была выше 0 °С. Затем снег был с поверхности льда удалён. Красными

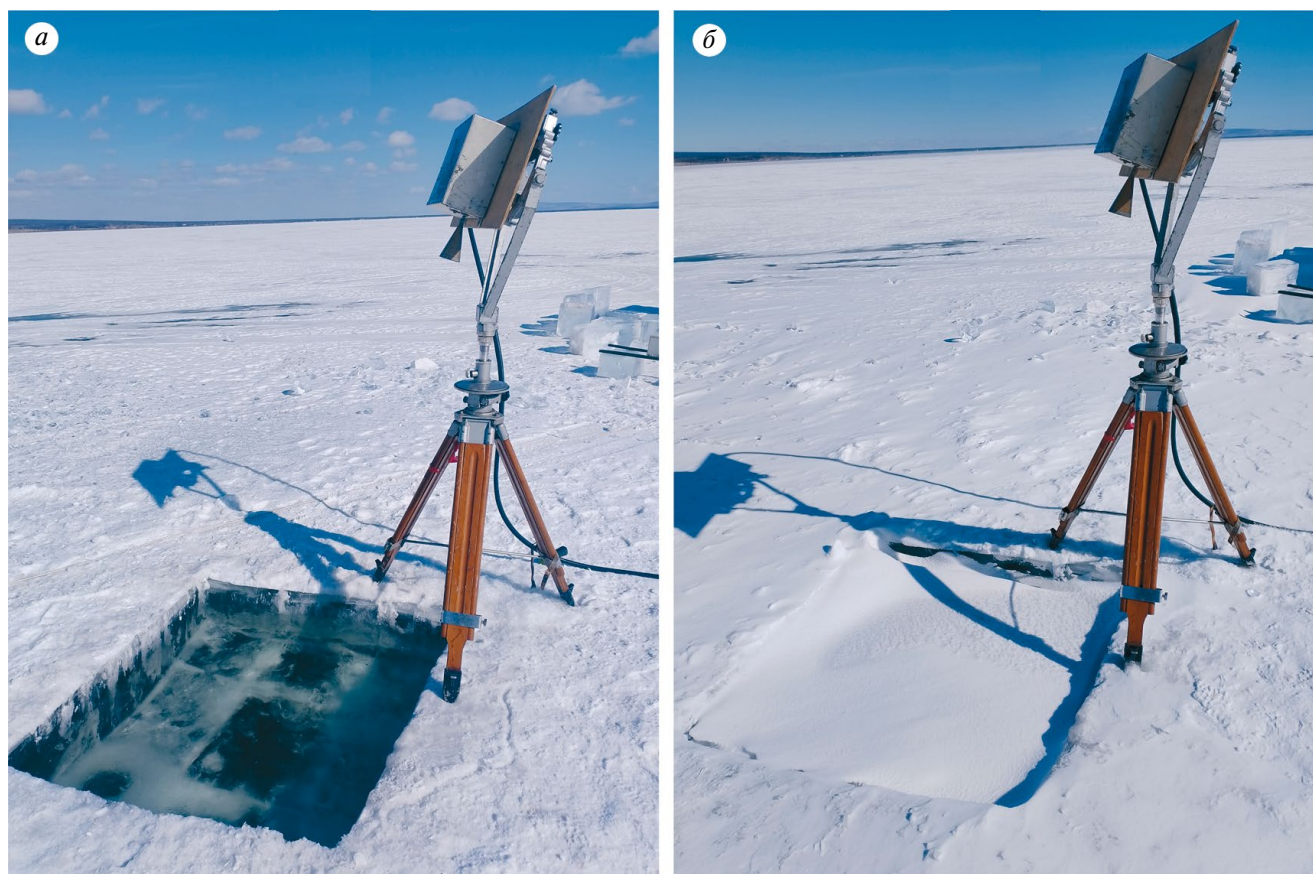


Рис. 4. Фотографии измерения радиояркостной температуры растущего пресного ледяного покрова на частоте 34 ГГц. Ледяной покров без снега (а), ледяной покров со свежевыпавшим снегом (б). Фото А.А. Гурулева, март 2024 г.

Fig. 4. Photographs of brightness temperature measurements of growing freshwater ice cover at a frequency of 34 GHz. Ice cover without snow (a), ice cover with freshly fallen snow (b). Photo by A.A. Gurulev, March 2024

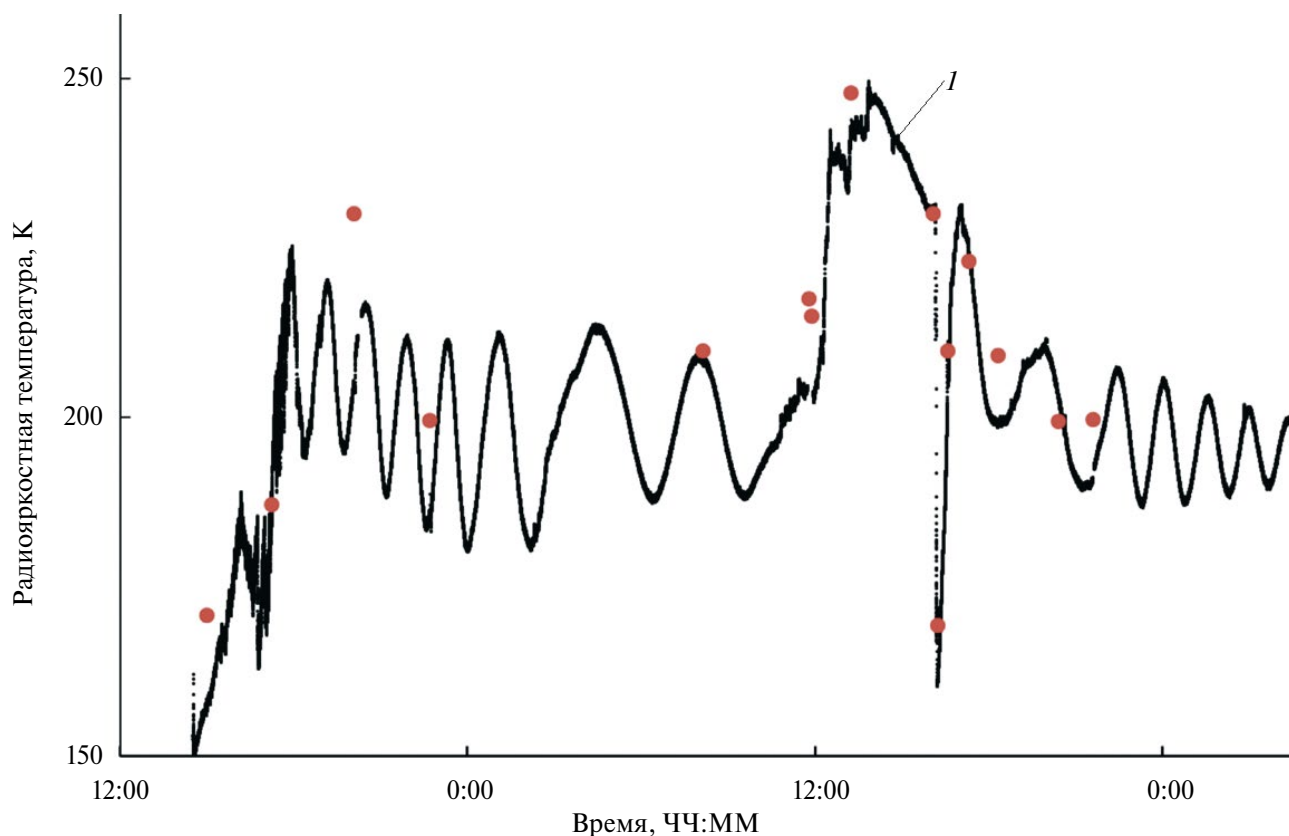


Рис. 5. Радиояркостьная температура растущего пресного ледяного покрова на частоте 34 ГГц. Угол наблюдения 20°. Красными точками отмечено значение $T_{\text{я}}$ на угле наблюдения 15°. Дата: 12–14 марта 2024 г. *I* – свежесыпавший снег на поверхности ледяного покрова

Fig. 5. Brightness temperature of growing fresh ice cover at 34 GHz. Observation angle 20°. Red dots indicate the $T_{\text{я}}$ value at an observation angle of 15°. Date: March 12–14, 2024. *I* – freshly fallen snow on the surface of the ice cover

точками на графике выделены участки времени, когда происходили измерения при угле наблюдения 15°. Как видно по этим точкам, значение радиояркостьной температуры существенно отличается от значений, полученных при наблюдении под углом в 20°.

Лёд представляет собой динамический объект, физические свойства которого могут меняться с течением времени, что связывается с изменением внешних факторов воздействия на данную среду. К ним можно отнести ветровые нагрузки, температурные изменения, внешнее давление, освещённость и т.п. Ниже рассмотрены некоторые из них.

При исследовании пластической деформации металлов были обнаружены волны течения, скорость которых составляет всего 0.01 мм/с и имеет характерную длину волны около 1 см (Зуев и др., 2008). Такие волны также могут существовать и в пресных ледяных покровах за счёт

термических напряжений. Они перемещаются в среде с малой скоростью. Следовательно, исследуемый объект будет представлять собой ледяной покров с внедрённой в него дифракционной решёткой с периодом, приблизительно равным одному сантиметру, что было обнаружено в работе (Гурулев и др., 2023). Данные волны могут влиять на мощность теплового излучения, что также необходимо учитывать при радиометрических исследованиях криосферных образований.

Перед началом таяния льда обнаружено резкое уменьшение ϵ'' как в видимом, так и в микроволновом диапазоне (Бордонский и др., 2023). Данный факт может приводить к уменьшению мощности радиотеплового излучения, а соответственно, и к неправильной интерпретации получаемых данных. Например, в работе (Казанцев, Бордонский, 2025) представлены расчётные значения радиояркостьной температуры ледяного покрова при моделировании этого эффекта, и было показано, что понижение $T_{\text{я}}$

может достигать значений ~ 30 К. С другой стороны, во время деструкции льда в нём наблюдается повышение концентрации влаги, вследствие чего диэлектрическая проницаемость льда возрастает, что приводит к повышению $T_{\text{я}}$. Следовательно, высокое значение $T_{\text{я}}$ может быть интерпретировано как значение $T_{\text{я}}$ относительно толстого и прочного льда, как и значение $T_{\text{я}}$ тонкого увлажнённого льда. Приведённые результаты исследования по пассивным методам дистанционного зондирования криосферных образований в микроволновом диапазоне применимы и для активных радиолокационных измерений на больших длинах волн.

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА

Выполнены лётные испытания изготовленного радиометрического приёмника, установленного на БПЛА (с грузоподъёмностью до 4 кг). По результатам испытаний получена трассовая запись радиояркостной температуры небольшого тестового участка вблизи автодороги, покрытого снежным покровом, фотография которого приведена на рис. 6, а. Температура воздуха во время лётных испытаний составляла -21°C , а температура грунта под снежным покровом составляла -16°C .

На рис. 6, б представлены значения радиояркостной температуры исследуемой трассы. Обнаруживается дорожное бетонное покрытие, на котором расположен сухой снежный покров толщиной до 25 см. На данном участке значение радиояркостной температуры выше на ~ 20 К, что связано с различными излучательными характеристиками грунта и бетонного покрытия. Ширина бетонного дорожного покрытия составляет ~ 3 м. Цифрой 4 (см. рис. 6, б) отмечено начало данного покрытия. Отмечен пологий переход от грунта к бетону, что связывается с его особенностью (неравномерный слой бетона по толщине), а также с трансформацией слоя грунта с осадками при его замерзании. В результате показано, что радиометрические исследования на длине волны 0.88 см с использованием БПЛА имеют практическое значение.

Также выполнены измерения радиотеплового излучения участка грунта с неровным рельефом. Исследуемый участок местности представлял собой холм насыпного грунта диаметром около 10 м и высотой до 5 м, также рядом находилось углубление до двух метров от горизонта. Обнаружено, что значение радиояркостной температуры увеличивается на 5–6 К при изменении угла рельефа относительно горизонта. Данный эффект связывается с увеличением угла наблюдения радиометрического приёмника.

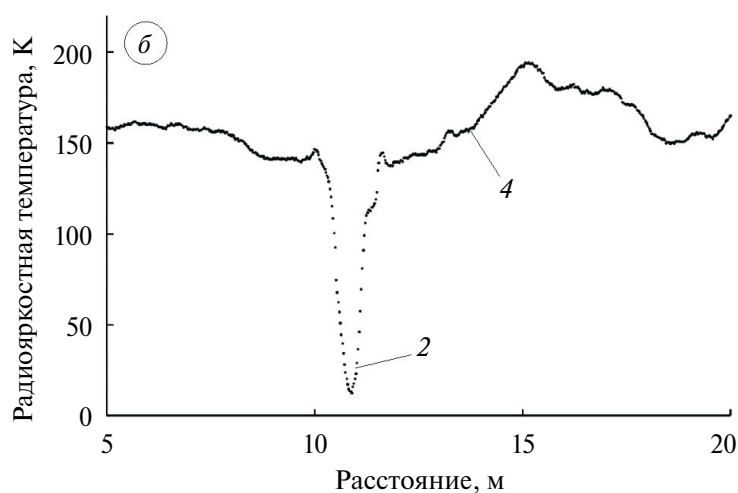
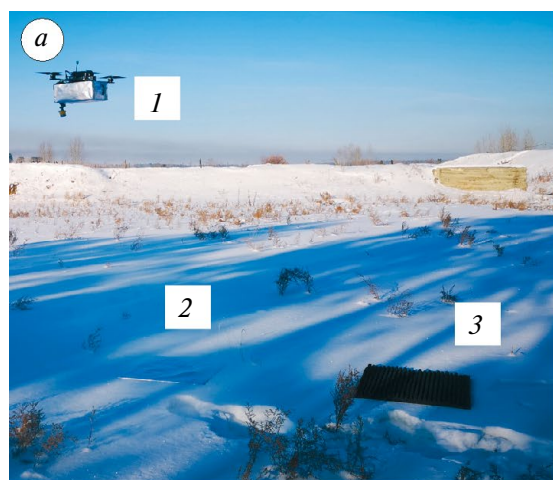


Рис. 6. Фотография лётных испытаний радиометра (а), трассовая запись радиояркостной температуры во время лётных испытаний радиометра на длине волны 0.88 см (б). Дата: 06.12.2024. Фото А.А. Гурулева, декабрь 2024 г. 1 – радиометр на длину волны 0.88 см, установленный на БПЛА, 2 – лист металла, 3 – эталон черного тела, 4 – дорожное бетонное покрытие

Fig. 6. Photograph of flight tests of the radiometer (а), track record of the brightness temperature during flight tests of the radiometer at a wavelength of 0.88 cm (б). Date: December 06, 2024. Photo by A.A. Gurulev, December 2024). 1 – radiometer for a wavelength of 0.88 cm, installed on the UAV, 2 – sheet of metal, 3 – black body standard, 4 – concrete road surface

При расположении БПЛА с радиометром над определённым участком горизонтальной заснеженной поверхности грунта наблюдались вариации значений радиояркостной температуры. Они были связаны с системой стабилизации квадрокоптера в пространстве, которая регулирует мощность двигателей, изменяя углы тангажа и крена БПЛА.

Таким образом, натурные измерения собственного теплового излучения мёрзлого грунта показали эффективность применения БПЛА с установленным на его борту радиометрическим приёмником на длину волны 0.88 см. При этом следует учитывать углы наклона местности и расположение радиометра в пространстве, вводя поправочные коэффициенты, для интерпретации полученных радиометрических данных с использованием зарегистрированных углов (квадрокоптера и карты рельефа).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из графиков (см. рис. 2–3, 5), необходимо производить фиксирование угловых характеристик радиометрического приёмника. Это связано с тем, что ошибка при измерениях подобных плоскостных сред может достигать 30 К, а это существенный показатель. Экспериментальные данные (см. рис. 6, б) показывают, что действительно имеются некоторые вариации $T_{\text{я}}$, которые могут быть связаны как с небольшим изменением угловых характеристик БПЛА, так и с особенностями подстилающей поверхности, а также с наклонными характеристиками зондируемой поверхности. В случае, когда производятся измерения $T_{\text{я}}$ подстилающей поверхности, которая расположена под некоторым углом к радиометрическому приёмнику, необходимо проводить коррекцию полученных данных, принимая во внимание изменения угловых характеристик.

ВЫВОДЫ

Таким образом, выполненное исследование по радиометрическим измерениям в миллиметровом диапазоне криосферных образований с использованием БПЛА показало следующие особенности.

Во-первых, при радиометрических измерениях необходимо учитывать угол наблюдения и постоянно вести его регистрацию; во-вторых, во время измерений радиояркостной температуры

криосферных объектов, расположенных на наклонных поверхностях, следует составлять карту рельефа, на которой будут указаны углы площадок поверхности относительно горизонта, для интерпретации получаемых сигналов с радиометра; в-третьих, измерения мощности радиотеплового излучения криосферных образований в микроволновом диапазоне с использованием радиометров, установленных на борт БПЛА, являются уникальным средством для диагностики их состояний, особенно в труднодоступных местах; и, наконец, в-четвёртых, следует учитывать вариации значений $T_{\text{я}}$ при измерениях плоскостных сред с малыми диэлектрическими потерями, которые связаны с интерференцией электромагнитного излучения слоистых сред с малым промежуточным слоем, например пресного ледяного покрова, расположенного на водной поверхности.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-27-00278 “Разработка методики радиометрического исследования криосферных образований с использованием беспилотных летательных средств в миллиметровом диапазоне”.

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation grant 24-27-00278 “Development of a methodology for radiometric research of cryospheric formations using unmanned aerial vehicles in millimeter terms”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Смоляницкий В.М., Афанасьева Е.В., Раев М.Д., Шарков Е.А. Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, не определяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 22–38.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421060026>
- Бордонский Г.С. Диэлектрические потери пресного льда на СВЧ // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 11. С. 1620–1622.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 210–215.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Казанцев В.А., Середин Д.В. Экспериментальное обнаружение просветления пресного льда в оптическом диапазоне вблизи 0 °С // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. № 10. С. 1374–1379.
<https://doi.org/10.61011/OS.2023.10.56889.5302-23>

- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О. Диэлектрическая проницаемость глубоко переохлажденной воды по данным измерений на частотах 7.6 и 9.7 ГГц // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 3. С. 259–267.
<https://doi.org/10.31857/S0033849422030044>
- Бордонский Г.С., Золотарева Л.Н., Крылов С.Д. Оценка пространственного распределения высшей водной растительности по радиотепловому излучению ледяного покрова в СВЧ-диапазоне // Исследование Земли из космоса. 1994. № 3. С. 96–102.
- Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: Изд-во ГЕОС, 2014. 528 с.
- Гурулев А.А., Бордонский Г.С. Холодная вода и ее влияние на электромагнитные свойства криосферных объектов // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 1 (24). С. 62–70.
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-62-70>
- Гурулев А.А., Бордонский Г.С., Орлов А.О. Регистрация автоволн пластического течения в ледяных структурах при радиолокационных измерениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 222–229.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-222-229>
- Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Тепловое излучение трехслойной среды с тонким промежуточным слоем // Исследование Земли из космоса. 2011. № 4. С. 5–11.
- Жук В.Р., Козлов И.Е., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б. Применение БПЛА-измерений для оценки динамики прикромочной ледовой зоны в Карском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 235–245.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-235-245>
- Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 328 с.
- Казанцев В.А., Бордонский Г.С. Оценка влияния “просветления” льда вблизи 0 °С на радиояркостную температуру снежных и ледяных покровов в длинноволновой части сантиметрового диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 259–267.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-1-259-267>
- Клепиков И.Н., Шарков Е.А. Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных неізотермических сред // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3–15.
- Котляков В.М., Мачерет Ю.Я., Сосновский А.В., Глазовский А.Ф. Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 45–56.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-45-56>
- Кубряков А.А., Лишаев П.Н., Чепыженко А.И., Алексерова А.А., Кубрякова Е.А., Медведева А.В., Станичный С.В. Влияние субмезомасштабных вихрей на перенос взвешенного вещества в прибрежной зоне Крыма по данным БПЛА, спутниковых и контактных измерений // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. С. 182–197.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-235-245>
- Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
- Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьева Е.С. Ледовитость арктических морей и её связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 134–148.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420010029>
- Нагурный А.П., Алексеев Г.В., Коростелев В.Г. Изменение толщины морского льда в Северном Ледовитом океане зимой в 1970–1990 гг. // Метеорология и гидрология. 2005. № 7. С. 45–51.
- Пасько О.А., Токарева О.С., Ибрагимов Э.А. Анализ экологической опасности снежных отвалов на примере города Томска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 135–144.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-135-144>
- Репина И.А., Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Иванов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29–36.
- Романец И.И., Мудриченко Н.М. Новые цифровые решения: использование дронов в сельском хозяйстве // Экономика и предпринимательство. 2024. № 5 (166). С. 582–586.
<https://doi.org/10.34925/EIP.2024.166.5.116>
- Сидоров И.А., Гудков А.Г., Шашиурин В.Д., Чижиков С.В., Новичихин Е.П., Хохлов Н.Ф., Порохов И.О., Пчелинцев В.Э., Агандеев Р.В. Дистанционное определение влажностного портрета дамбы СВЧ-радиометром с борта беспилотного летательного аппарата // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2022. Т. 14. № 3. С. 5–13.
<https://doi.org/10.18127/j22250980-202203-01>
- Топольский Н.Г., Симаков В.В., Зеркаль А.Д., Серегин Г.М., Мокшанцев А.В., Агеев С.В. Многофункциональный портативный радар для измерения толщины льда // Технологии техносферной безопасности. 2012. № 1 (41). 20 с.
- Хвостов И.В., Романов А.Н., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Некоторые особенности микроволнового радиотеплового излучения пресноводных водоемов с ледовым покровом // Современные проблемы

- дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 149–154.
- Хромов С.П., Петросянец М.А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 2012. 584 с.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Целев В.Ю. О перспективных направлениях развития методов гидрометеорологических наблюдений за снежным и ледовым покровом // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 335–343. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-71-335-343>
- Шавлов А.В. Свойства льда при высокой концентрации структурных дефектов // Криосфера Земли. 1997. Т. 1. № 1. С. 78–86.
- Holten V., Limmer D.T., Molinero V., Anisimov M.A. Nature of the anomalies in the supercooled liquid state of the mW model of water // J. Chem. Phys. 2013. V. 138. № 17. P. 174501.

Citation: Gurulev A.A., Kazantsev V.A., Kozlov A.K. Features of microwave measurements of cryospheric formations using UAVs. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (3): 447–460. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525030073

Features of Microwave Measurements of Cryospheric Formations Using UAVs

© 2025 A. A. Gurulev[#], V. A. Kazantsev, A. K. Kozlov

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, Chita, Russia

[#]*e-mail: lgc255@mail.ru*

Received April 8, 2025; Revised May 28, 2025; Accepted June 26, 2025

The paper presents the results of remote studies of cryospheric formations in the microwave range using unmanned aerial vehicles (UAVs). For these purposes, a radiometric receiver with a frequency of 34 GHz with a bandwidth of 2.3 GHz with a fluctuation sensitivity of 0.05 K at a time constant of 1 s was installed on board the UAV. The directional pattern of the corrugated antenna was about 10°. It is shown that this method of monitoring in the millimeter range of media containing ice inclusions is an urgent task, especially in hard-to-reach places. There are a number of difficulties in interpreting the obtained brightness temperature of the radiating medium, which characterizes the power of thermal radiation. The first difficulty lies in the fact that the obtained value of this temperature depends on the angle of observation, therefore, at the time of radiometric studies of cryospheric formations, it is necessary to measure the position of the UAV in space (pitch and roll angles). In addition, it is necessary to take into account the terrain, namely the angles of its inclination relative to the horizon. The second difficulty in interpreting the data obtained from microwave measurements of thermal radiation power is the peculiarity of the medium under study. For example, for a plane-layered three-layer medium with a relatively thin intermediate layer, interference of the brightness temperature is observed, both on vertical and horizontal polarization. Inclusions in cryospheric formations with sharply different dielectric characteristics from the medium itself, for example, gas bubbles in ice, should also be taken into account. The work will be of interest to researchers involved in monitoring various cryospheric environments, both for practical (ice crossings) and scientific (glaciers) purposes.

Keywords: microwave range, freshwater ice cover, cryospheric formations, UAV, brightness temperature

REFERENCES

- Alekseeva T.A., Sokolova Yu.V., Tikhonov V.V., Smolyanitskii V.M., Afanas'eva E.V., Raev M.D., Sharkov E.A. Analysis of the Arctic Ocean sea ice area undetected by the ASI algorithm using satellite microwave radiometry data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth Research from Space. 2021, 6: 22–38. <https://doi.org/10.31857/S0205961421060026> [In Russian].
- Bordonskiy G.S. Dielectric losses of fresh ice at microwave frequencies. *Radiotekhnika i elektronika*. Radio

- engineering and electronics. 1995, 40 (11): 1620–1622 [In Russian].
- Bordonskiy G.S., Gurulev A.A. Features of radiothermal radiation of ice covers of reservoirs with different degrees of mineralization. *Vodnye resursy*. Water resources. 2008, 35 (2): 210–215 [In Russian].
- Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Kazantsev V.A., Seredin D.V. Experimental detection of clearing of fresh ice in the optical range near 0 °C. *Optika i spektroskopiya*. Optics and spectroscopy. 2023, 131 (10): 1374–1379. <https://doi.org/10.61011/OS.2023.10.56889.5302-23> [In Russian].
- Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O. Dielectric constant of deeply supercooled water according to measurements at frequencies of 7.6 and 9.7 GHz. *Radiotekhnika i elektronika*. Radio engineering and electronics. 2022, 67 (3): 259–267. <https://doi.org/10.31857/S0033849422030044> [In Russian].
- Bordonskiy G.S., Zolotareva L.H., Krylov S.D. Assessment of the spatial distribution of higher aquatic vegetation based on the radiothermal radiation of the ice cover in the microwave range. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth Research from Space. 1994, 3: 96–102 [In Russian].
- Glazovskii A.F., Macheret Yu.Ya. *Voda v lednikakh. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distantsionnykh issledovaniy*. Water in glaciers. Methods and results of geophysical and remote sensing studies. Moscow: GEOS, 2014: 528 p. [In Russian].
- Gurulev A.A., Bordonskiy G.S. Cold water and its influence on the electromagnetic properties of cryospheric objects. *Rossiiskaya Arktika*. Russian Arctic. 2024, 6 (1): 62–70. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-62-70> [In Russian].
- Gurulev A.A., Bordonskiy G.S., Orlov A.O. Registration of autowaves of plastic flow in ice structures during radar measurements. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2023, 20 (3): 222–229. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-222-229> [In Russian].
- Gurulev A.A., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V. Thermal radiation of a three-layer medium with a thin intermediate layer. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Exploration of the Earth from space. 2011, 4: 5–11 [In Russian].
- Zhuk V.R., Kozlov I.E., Kubryakov A.A., Solov'ev D.M., Osadchiev A.A., Stepanova N.B. Application of UAV measurements to assess the dynamics of the marginal ice zone in the Kara Sea. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2022, 19 (5): 235–245. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-235-245> [In Russian].
- Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. *Fizika makrokalizatsii plasticheskogo techeniya*. Physics of macrocalization of plastic flow. Novosibirsk: Science, 2008: 328 p. [In Russian].
- Kazantsev V.A., Bordonskiy G.S. Assessment of the influence of ice “brightening” near 0 °C on the radio brightness temperature of snow and ice covers in the long-wave part of the centimeter range. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2025, 22 (1): 259–267. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-1-259-267> [In Russian].
- Klepikov I.N., Sharkov E.A. Theoretical studies of the self-radiation of sharply inhomogeneous non-isothermal media. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth exploration from space. 1992, 6: 3–15 [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Macheret Yu.Ya., Sosnovskii A.V., Glazovskii A.F. The speed of propagation of radio waves in dry and wet snow cover. *Led i Sneg*. Ice and snow. 2017, 57 (1): 45–56. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-45-56> [In Russian].
- Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Chepyzhenko A.I., Alekserova A.A., Kubryakova E.A., Medvedeva A.V., Stanichnyi S.V. The influence of submesoscale eddies on the transport of suspended matter in the coastal zone of Crimea according to UAV, satellite and contact measurements. *Okeanologiya*. Oceanology. 2021, 61 (2): 182–197. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-235-245> [In Russian].
- Kutuza B.G., Danilychev M.V., Yakovlev O.I. *Sputnikovyi monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti*. Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface. Moscow: LENAND, 2016: 336 p. [In Russian].
- Matveeva T.A., Semenov V.A., Astaf'eva E.S. Ice cover of the Arctic seas and its relationship with surface air temperature in the Northern Hemisphere. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 134–148. <https://doi.org/10.31857/S2076673420010029> [In Russian].
- Nagurnyi A.P., Alekseev G.V., Korostelev V.G. Changes in sea ice thickness in the Arctic Ocean in winter in 1970–1990. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2005, 7: 45–51. [In Russian].
- Pas'ko O.A., Tokareva O.S., Ibragimov E.A. Analysis of the environmental hazard of snow dumps using the city of Tomsk as an example. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2020, 17 (3): 135–144. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-135-144> [In Russian].

- Repina I.A., Tikhonov V.V., Alekseeva T.A., Ivanov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N. Yu. Electrodynamical model of Arctic ice cover radiation for solving problems of satellite microwave radiometry. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth Research from Space. 2012, 5: 29. [In Russian].
- Romanets I.I., Mudrichenko N.M. New digital solutions: using drones in agriculture. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. Economy and entrepreneurship. 2024, 5 (166): 582–586.
<https://doi.org/10.34925/EIP.2024.166.5.116> [In Russian].
- Sidorov I.A., Gudkov A.G., Shashurin V.D., Chizhikov S.V., Novichikhin E.P., Khokhlov N.F., Porokhov I.O., Pchelintsev V.E., Agandeev R.V. Remote determination of the humidity portrait of a dam using a microwave radiometer from an unmanned aerial vehicle. *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye – XXI vek*. Nanotechnology: development, application – 21st century. 2022, 14 (3): 5–13.
<https://doi.org/10.18127/j22250980-202203-01> [In Russian].
- Topol'skii N.G., Simakov V.V., Zerkal' A.D., Seregin G.M., Mokshantsev A.V., Ageev S.V. Multifunctional portable radar for measuring ice thickness. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti*. Technologies of technosphere safety. 2012, 1 (41): 20 [In Russian].
- Khvostov I.V., Romanov A.N., Tikhonov V.V., Sharkov E.A. Some features of microwave radiothermal radiation of freshwater bodies with ice cover. *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017, 14 (4): 149–154 [In Russian].
- Khromov S.P., Petrosyants M.A. *Meteorologiya i klimatologiya*. Meteorology and climatology. Moscow: Moscow University Press, 2012: 584 p. [In Russian].
- Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovskii A.F., Murav'ev A. Ya., Nikitin S.A., Lavrent'ev I.I. New catalog of Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (3): 341–358.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093> [In Russian].
- Tsepelev V.Yu. On promising directions for the development of methods of hydrometeorological observations of snow and ice cover. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology. 2023, 71: 335–343.
<https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-71-335-343> [In Russian].
- Shavlov A.V. Properties of ice with a high concentration of structural defects. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 1997, 1 (1): 78–86 [In Russian].
- Holten V., Limmer D.T., Molinero V., Anisimov M.A. Nature of the anomalies in the supercooled liquid state of the mW model of water. *J. Chem. Phys.* 2013, 138 (17): 174501.