

Изменение теплового излучения снежного покрова в миллиметровом и инфракрасном диапазонах при воздействии солнечного излучения

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

*Институт природных ресурсов экологии и криологии СО РАН
Чита, 672002, Россия
E-mail: lgc255@mail.ru*

Выполнены измерения радиотеплового и инфракрасного излучения снежного покрова в миллиметровом диапазоне на длинах волн 8,8; 3,3 мм и в инфракрасном диапазоне на участке 8–14 мкм. Изучалось воздействие циклического нагрева снега излучением Солнца. Измерения проведены в стационарных условиях на площадке, где была реализована возможность её затенения при движении Солнца для создания быстрых изменений температуры снега, характерных для природной среды. В эксперименте установлены суточные и более быстрые изменения яркостной температуры излучения, определяемой как приращениями термодинамической температуры среды, так и динамическими процессами, например, вследствие возникновения эффекта просветления слоёв снега. Просветление ледяных частиц определяется возникновением их пластической деформации из-за градиента температуры в среде. При этом возникает течение кристаллов льда по их базисным плоскостям с образованием квазижидких плёнок с высокой электропроводностью. Такая ситуация характерна для начальной стадии пластической деформации, наблюдаемой при ползучести ледяных структур. Данная особенность связывается с возможностью плазмонного усиления электромагнитного излучения, приводящего к просветлению снега и льда. Полученные результаты показывают эффективность использования предложенного комплекса радиометров миллиметрового и инфракрасного диапазонов для решения задач в области криологии и экологии, например, для определения особенностей таяния снега и областей загрязнения снежного покрова.

Ключевые слова: радиометрия, снежный покров, миллиметровый диапазон, тепловой инфракрасный диапазон

Одобрена к печати: 05.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-305-313

Введение

В настоящее время радары космического базирования достигли пространственного разрешения земной поверхности, близкого для приборов оптического диапазона (Шарков, 2014). Активные микроволновые системы в сочетании с пассивными системами позволяют более эффективно решать задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Бордонский и др., 2014). Однако используемые спутниковые радиометры имеют низкую разрешающую способность, порядка 10 км в дециметровом диапазоне (Тихонов и др., 2017) и 1 км на миллиметровых волнах (Заболотских, Балашова, 2021), что сдерживает их применение в практике ДЗЗ.

Вместе с тем переход на более короткие длины волн, в принципе, позволяет улучшить пространственное разрешение радиометрических систем. Однако миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны недостаточно исследованы для использования в ДЗЗ из-за возрастания затухания электромагнитных волн в атмосфере и плохой изученности вариаций излучательной способности природных образований при изменении погодных условий.

Определённым решением задачи в данном направлении можно считать установку радиометров миллиметрового диапазона на беспилотные летательные аппараты (БПЛА), что позволяет достичь пространственного разрешения порядка 1 м и тем самым использовать предполагаемую информативность радиометрии на миллиметровых волнах.

Цель настоящей работы — исследовать перспективность совместного применения радиометрии миллиметрового и теплового инфракрасного (ИК) диапазона при высоком простран-

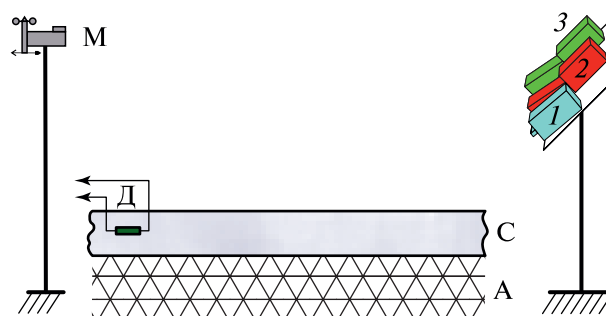
ственном разрешении (при установке приборов на БПЛА) для изучения приповерхностных криогенных образований, в частности снежно-ледяного покрова, мёрзлых почв и грунтов, подверженных вариациям потока солнечного излучения.

Методика исследований

А. Установка. Для решения поставленной задачи выполнены исследования теплового излучения снега в условиях, близких к натурным, на специальной площадке, расположенной на территории Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита). Для создания изменений потока солнечного излучения опытная площадка располагалась таким образом, чтобы в середине дня излучение Солнца перекрывалось стоящим рядом зданием. Высокая прозрачность атмосферы Забайкалья создавала условия существенных колебаний суточной температуры верхнего слоя снега, особенно в конце зимнего периода.

В эксперименте были использованы радиометры на длины волн (λ) 8,8; 3,3 мкм с полосой частот ~ 3 ГГц и на ИК-участок 8–14 мкм. Флуктуационный порог чувствительности приборов 0,1 К при постоянной времени 0,1 с. На *рис. 1* приведена схема экспериментальной установки. Радиометры устанавливались на высоте ~ 1 м над поверхностью снега. Диаграммы направленности антенн и объектива ИК-радиометра по уровню 0,5 около 5° . Угол наблюдения составлял $\sim 45^\circ$, и измерения выполнены на вертикальной поляризации. Калибровку приборов осуществляли по излучению безоблачного неба и эталонам чёрного тела. Ошибки измерений оценивались значениями порядка 1 К.

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



Б. Исследования. Были выполнены измерения радиотеплового и ИК-излучения снежного покрова, подвергающегося циклическому суточному воздействию солнечного излучения в январе — марте 2026 г. Забайкальский край характеризуется высокой прозрачностью атмосферы и невысоким снежным покровом. Поэтому для него можно ожидать значительной суточной и месячной трансформации снежного покрова. Особенно это должно быть значимым для верхних слоёв в толщине покрова до 10–30 см. Изменение структуры этих слоёв приводит к сильным приращениям радиотеплового и ИК-излучения поверхности и позволяет решать ряд специальных задач криологии и экологии. Примером могут быть задачи исследования таяния верхних слоёв снежного покрова и регистрации особенностей поверхностных загрязнений, которые связаны с процессами таяния — перемерзания снега (Бордонский и др., 1988).

Результаты измерений

Измерения выполнялись на заснеженном участке крыши здания с диэлектрическим покрытием и толщиной снежного покрова в начале измерений ~ 10 см (в январе 2026 г.). В течение времени наблюдений два раза выпадали осадки, увеличивая толщину снега на ~ 1 см. Параметры снега: общая толщина в конце февраля ~ 12 см, плотность $0,28$ г/см³, размер гра-

нул $\sim 0,2\text{--}3$ мм в средней части покрова (в середине февраля). Концентрация снега загрязняющими солями S по высоте, определённая из кондуктометрических измерений, в верхнем слое толщиной 1 см в конце февраля 2026 г. ~ 250 мг/кг. На глубине 4 см эта величина ~ 50 мг/кг и ~ 10 мг/кг на глубинах 10–12 см — *рис. 2*.

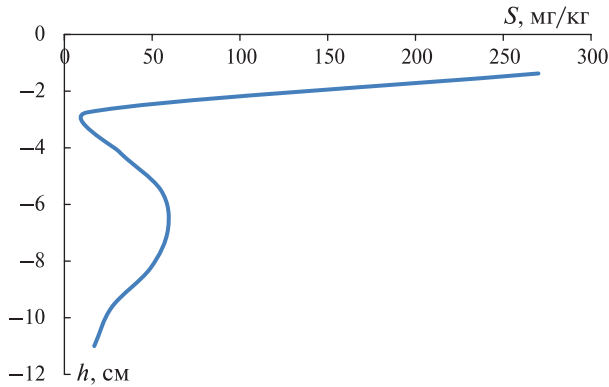


Рис. 2. Распределение концентрации солей S по высоте h снежного покрова по кондуктометрическим измерениям талой воды, в предположении о преобладании в загрязнениях хлорида натрия. Ошибка измерения $S \sim 20\%$. Дата измерений: 24.02.2026

В течение трёх месяцев измерений в ночное время в некоторые сутки температура понижалась до -35°C , а в дневное время в марте наблюдалось её повышение до 0°C . Резкие колебания, которые особенно были выражены при суточных вариациях, достигающих 20°C и более, создавали существенные изменения радиояростной $T_{\text{я}}$ и радиационной $T_{\text{р}}$ температуры в микроволновом и ИК-диапазоне соответственно. Эти изменения были связаны с ростом интенсивности, падающего на объект исследования теплового излучения Солнца, в течение трёх месяцев. Нагревание среды определяли по датчику (Д) температуры T_0 , расположенному внутри снежного покрова (см. *рис. 1*), а также по значению $T_{\text{р}}$ поверхностного слоя покрова.

Температурный ход измеренных значений T_0 , $T_{\text{я}}$ и $T_{\text{р}}$ показан на *рис. 3*.

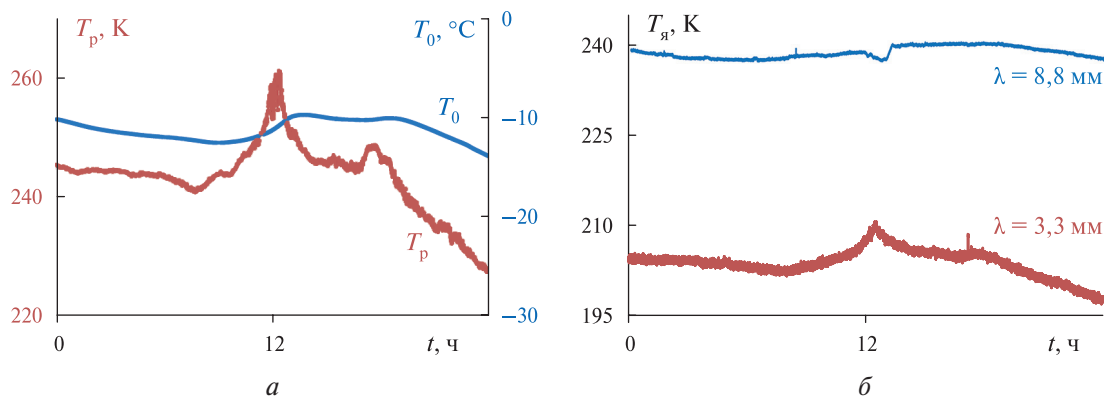


Рис. 3. Зависимость от времени t : *а* — термодинамической температуры T_0 внутри слоя снега на глубине 6 см и радиационной температуры тонкого поверхностного слоя в ИК-диапазоне; *б* — радиояростной температуры объекта на двух длинах волн. Дата измерений: 03.03.2026

Из представленных на *рис. 3* графиков следует, что в течение суток наблюдается изменение радиационных характеристик снега. Особенно это заметно в районе 12:00, во время максимума притока к поверхности солнечной радиации. Как отмечено выше, особенность выбранного исследуемого участка заключалась в том, что он по мере движения Солнца затенялся рядом расположенным зданием. Это приводило к изменению знака приращения температуры излучения во времени. Данный характер полученных зависимостей был замечен

для всех дней проведения измерений. Однако в зависимости от даты наблюдения, т.е. высоты нахождения Солнца над горизонтом и температуры воздуха, на графиках выявились особенности процесса изменения сигналов, требующие пояснения.

Например, на *рис. 4* приведены зависимости измеренной температуры излучения 22.02.2026, когда температура покрова на глубине 6 см изменялась несколько быстрее, чем для представленной на *рис. 3* (ΔT_0 за 3 ч выросло в 1,6 раза) в интервале от 10:00 до 13:00.

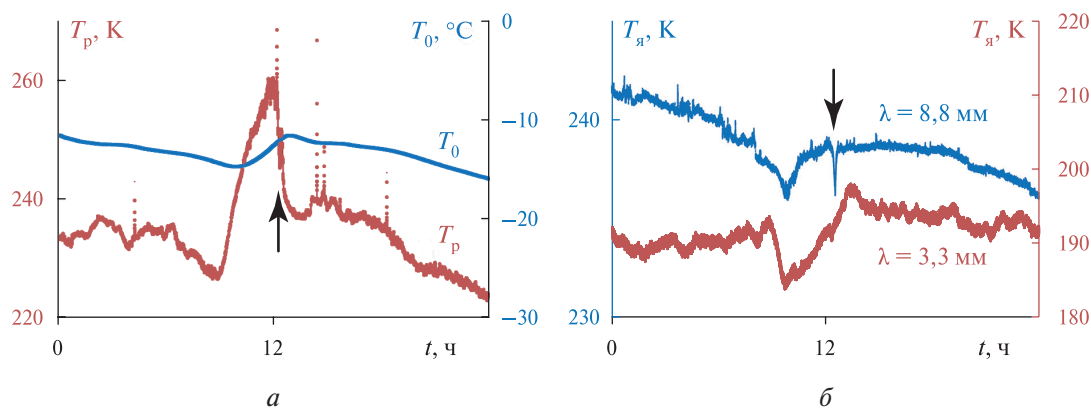


Рис. 4. Зависимость от времени: *а* — термодинамической температуры T_0 и радиационной температуры тонкого поверхностного слоя в ИК-диапазоне; *б* — то же для радиояркой температуры на двух длинах волн. Дата измерений: 22.02.2026

В области наибольших изменений термодинамической температуры внутри снежного слоя (отмечено стрелками на *рис. 4*) наблюдались скачки с понижением температуры излучения. Эти скачки оказались наиболее выраженными на волне 8,8 мм и менее всего заметны на 3,3 мм. Скачки при изменении температуры T_0 также отмечали на ряде других графиков T_y и T_p .

В последующие дни в конце февраля, когда наблюдалась безоблачная атмосфера — до начала марта — и когда верхний слой снега нагревался до 0°C , особенность графиков также заключалась в приращении радиационной температуры в область понижения её значений вне зависимости от знака приращений термодинамической температуры T_0 .

На зависимостях температуры от времени от 26.02.2026 наблюдали выбросы понижения значений T_y , T_p и T_0 (*рис. 5*). Однако на волне 3,3 мм обнаружено специфическое изменение T_y в виде её возрастания, отмеченное на *рис. 5* стрелкой. В этом случае началось затенение исследуемого участка и резкое понижение его термодинамической температуры, особенно заметное для слоя формирования ИК-излучения. Эта особенность также наблюдалась на 8,8 мм, однако со сдвигом на более позднее время ~20 мин.

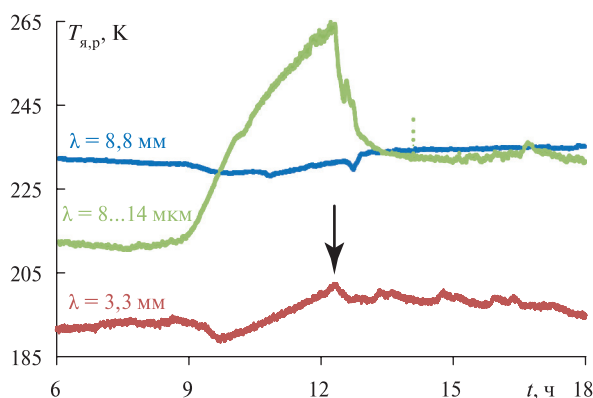


Рис. 5. Изменение радиояркой температуры снежного слоя на волнах 3,3 и 8,8 мм и радиационной температуры в тепловом ИК-диапазоне со временем. Дата измерений: 26.02.2026

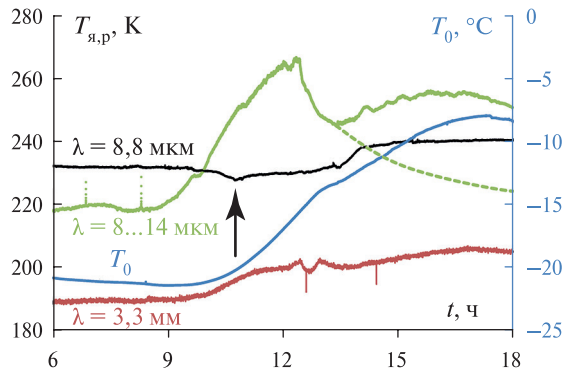


Рис. 6. Результаты измерений, аналогичные предыдущим (см. рис. 5). Дата измерений: 02.03.2026. Штриховой линией представлено возможное изменение радиационной температуры ИК-излучения, наблюдаемое в предыдущих измерениях при более низкой температуре снега

Результаты, полученные при более сильном нагревании снега тепловым излучением Солнца в марте 2026 г., представлены на рис. 6. Стрелкой отмечено понижение радиояркостной температуры на 8,8 мм после 10:40, когда температура слоя на глубине выше 6 см достигла значения около -23 °С. Данное наблюдение можно связать с возрастанием рассеяния излучения при фазовом переходе льда 0, образовавшегося ранее в покрове, в лёд Ih. Это следует из того, что радиационная температура поверхности снега из ИК-измерений составляла ~ 250 К, т.е. её термодинамическая температура приблизительно равнялась -23 °С, а T_0 на глубине 6 см порядка -20 °С (вблизи 10:40). При этом в 09:00 температура верхнего слоя из ИК-измерений достигала -53 °С, а T_0 имела значение -21 °С.

Обсуждение результатов

Для правильной оценки полученных результатов измерений необходимо учитывать распределение концентрации солевых включений в снежном покрове по высоте. На рис. 2 была представлена зависимость концентрации солей по измерениям электропроводности талой воды от высоты. Из-за относительно низкого содержания растворимых солей в объекте можно было ожидать, что твёрдые нерастворимые частицы, выпадающие на снег, также имеют невысокую концентрацию. Поэтому предполагалось, что они не влияют на радиационные характеристики снега.

Как следует из рис. 2, в процессе метаморфизма снега имеет место накопление солей в верхнем слое покрова, достигающих значения 250 мг/кг в сантиметровом слое. Соли появились в результате выпадения их из атмосферы. С другой стороны, эффект связан с движением солевых включений в сторону источника тепла из нижележащих слоёв и может существенно влиять на радиационные характеристики поверхностных слоёв снега в коротковолновом участке миллиметрового диапазона и, особенно, в тепловом ИК-диапазоне. Такая ситуация определяется фазовым переходом гидрата хлорида натрия из жидкого в твёрдое состояние и наоборот при температуре эвтектики $-21,2$ °С (Бордонский и др., 1988), при колебаниях температуры вблизи её данного значения. Как было установлено, например, при нагревании поверхностного слоя и разрушения кристаллогидратов солей наблюдается резкое понижение радиационной температуры до значений 252 К (близкое к точке эвтектики) при поверхностной концентрации соли ~ 1000 г/м² (Бордонский и др., 1988), что соответствует концентрации соли 100 мг/кг в слое 0,1 мм.

Данным эффектом можно объяснить понижение радиояркостной температуры на волне 3,3 мм около 09:40 (см. рис. 5). При этом в ИК-диапазоне эффект не проявлялся, так как в слое $\sim 0,1$ –1 мм концентрация солей была невелика из-за выпадения на поверхность исследуемого объекта в предшествующие дни чистого снега толщиной ~ 1 см.

Особенность в виде резких изменений температуры излучения с понижением её значений при росте термодинамической температуры и остановки этого процесса (при попадании исследуемого объекта в тень) представлена на рис. 4, 5. Она может объясняться возникновением эффекта просветления льда вблизи температуры фазового перехода лёд – вода для

верхних слоёв как в ИК-диапазоне (самого верхнего слоя, порядка десятков микрометров), так и в миллиметровом диапазоне в зависимости от изменения потерь в слоях (Бордонский, Казанцев, 2025). Просветление связывается с возникновением термических напряжений в ледяных кристаллах снежинок из-за градиента термодинамической температуры и появлением пластического течения кристаллов по их базисным плоскостям.

Особенности изменений яркостной температуры, представленные на *рис. 6*, можно объяснить началом таяния верхнего слоя снега вблизи 12:00, когда температура верхнего слоя толщиной ~1 см достигала значений около 0 °С (что следует из значений радиационной температуры, которая ниже термодинамической на несколько градусов из-за влияния испарения воды).

Отмеченные механизмы особенностей излучения поверхностного слоя снега толщиной до 10 см при нагревании слоя солнечным излучением в конце зимнего и начале весеннего периода не исчерпываются представленными в настоящей работе явлениями. Например, в случае достижения существенно более значительных перепадов дневной и ночной температуры воздуха ($\Delta T \sim 20...30$ °С) в среде могут образоваться слои, содержащие структуры из недавно обнаруженной модификации льда 0 (Quigley et al., 2014; Russo et al., 2014; Slater, Quigley, 2014). Этот лёд (при невысоком давлении) возникает при температуре ниже –23 °С. Он был экспериментально подтверждён в работах (Бордонский, Орлов, 2017; Бордонский и др., 2024). При образовании сверхтонких слоёв льда 0 на поверхности малых диэлектрических частиц на границах сред в контактном слое возникает повышенная электропроводность, приводящая к резонансу поверхностных плазмонных мод и сильному рассеянию электромагнитного излучения. В случае частиц неправильной формы рассеяние наблюдается до радиочастотного диапазона. Данную особенность, как предполагается, наблюдали на графике для T_{γ} на волне 8,8 мм (см. *рис. 6*).

Сообщение о наблюдениях такого эффекта в микроволновом диапазоне на длинах волн от 3 мм до 2 см в снежном покрове пресного озера было представлено в работе (Бордонский и др., 2022). Эффект в виде осцилляций радиояркостной температуры с приращениями в несколько десятков градусов Кельвина возник при приходе циклона, при котором в поверхностном слое холодного снега произошла конденсация водяных паров с образованием льда 0 при температуре снега ниже –23 °С.

Таким образом, выполненные с комплексом радиометров измерения невысокого снежного покрова в Забайкалье в январе – марте 2026 г. в условиях разогрева верхнего слоя показали сильные вариации температуры излучения на длинах волн 3,3, 8,8 мм и особенно в тепловом ИК-диапазоне. Эти вариации определяются суточными и месячными изменениями термодинамической температуры слоёв снега, которые в слое ~0,1 мм достигали 20–30 °С. На глубине 6 см от поверхности изменения температуры составляли ~5 °С. Возникающие отклонения мощности теплового излучения определялись термодинамической температурой объекта, скоростью её изменения (нагрева и охлаждения), а также влиянием загрязнения снега растворимыми в воде соединениями при их накоплении из-за миграции в верхние слои снежного покрова.

В результате измерений были предположительно установлены механизмы, формирующие особенности теплового излучения снега, при изменении термодинамической температуры верхнего слоя глубиной до 10 см, вызванные солнечным излучением. Эти особенности связаны с динамическими явлениями из-за возникновения пластической деформации частиц и накоплением солей на поверхности. Кроме того, в снеге происходят фазовые переходы: таяние верхнего слоя при 0 °С, возникновение и исчезновение криогидратов солей и, возможно, образование особых структур из слоёв льда 0 при температуре ниже –23 °С.

Выводы

Снежный покров при суточном нагревании и охлаждении прямым излучением Солнца может существенно изменять свои радиационные характеристики. Интересной особенностью становится возникновение динамических явлений, при которых проявляются быстрые изме-

нения температуры излучения. Это изменение характеристик из-за эффекта просветления среды, вариаций мощности излучения при физико-химических превращениях структуры объекта при взаимодействии ледяных частиц и загрязнений из атмосферы, а также образования новой кристаллической модификации воды — льда 0 при температуре ниже -23°C .

Представленные процессы могут регистрироваться при измерениях собственного излучения верхнего слоя снежного покрова толщиной ~ 10 см при достижении высокого пространственного разрешения порядка 1 м. Такие параметры могут быть достигнуты при радиометрических измерениях в миллиметровом диапазоне на двух частотах, дополнительно включающие тепловой ИК-диапазон, при установке аппаратуры на низколетящие аппараты, например БПЛА.

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

Литература

1. Бордонский Г. С., Казанцев В. А. Широкополосные измерения диэлектрических характеристик льда вблизи температуры 0°C // Журн. техн. физики. 2025. Т. 95. № 7. С. 1427–1433. DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60666.13–25.
2. Бордонский Г. С., Орлов А. О. Признаки возникновения льда «0» в увлажненных нанопористых средах при электромагнитных измерениях // Письма в Журн. эксперим. и теорет. физики. 2017. Т. 105. № 7–8. С. 483–488. DOI: 10.7868/S0370274X17080045.
3. Бордонский Г. С., Крылов С. Д., Поляков С. В., Рябова Л. Д. О вариациях инфракрасного излучения снежно-ледяного покрова // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 6. С. 83–87.
4. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 228–240.
5. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Казанцев В. А. и др. Радиояркостьная температура пресного ледяного покрова в период ледостава // Материалы 20-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 151. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
6. Бордонский Г. С., Казанцев В. А., Козлов А. К. Поиски льда 0 в земной атмосфере // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 6. С. 968–976. DOI: 10.31857/S0002351524060089.
7. Заболотских Е. В., Балашова Е. А. Динамика морского льда в Печорском море зимой 2019/2020 // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2021 Т. 14. № 1 С. 97–105. DOI: 10.7868/S207366732101010X.
8. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Романов А. Н., Шарков Е. А. Анализ изменений ледяного покрова пресноводных водоемов по данным SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 46–53. DOI: 10.7868/S0205961417060045.
9. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
10. Quigley D., Alfè D., Slater B. Communication: On the stability of ice 0, ice i, and I_h // J. Chemical Physics. 2014. V. 141. No 16. Article 161102. 5 p. DOI: 10.1063/1.4900772.
11. 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. P. 733–793. DOI: 10.1038/nmat3977.
12. Slater B., Quigley D. Zeroing in on ice // Nature Materials. 2014. V. 13. P. 670–671. DOI: 10.1038/nmat4017.

Changes in thermal radiation of snow cover in the millimeter and infrared ranges under the influence of solar radiation

G. S. Bordonskiy, V. A. Kazantsev, A. K. Kozlov

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita 672002, Russia
E-mail: lgc255@mail.ru

Measurements of radiothermal and infrared radiation of snow cover were conducted in the millimeter range at wavelengths of 8.8 and 3.3 mm, as well as in the infrared range of 8–14 μm , under the influence of cyclic heating of snow by solar radiation. The measurements were performed under stationary conditions at a site where the Sun's movement allowed for shading to create rapid changes in snow temperature, typical of a natural environment. The experiment revealed diurnal and more rapid changes in brightness temperatures, determined by both increments in the thermodynamic temperature of the environment and dynamic processes, such as the occurrence of snow layer clearing. Ice particle clearing is determined by the occurrence of plastic deformation due to the temperature gradient in the environment. This causes ice crystals to flow along their basal planes, forming quasi-liquid films with high electrical conductivity. This situation is characteristic of the initial stage of plastic deformation observed during creep of ice structures. This phenomenon is associated with the possibility of plasmonic amplification of electromagnetic radiation leading to the clearing of snow and ice. The obtained results demonstrate the effectiveness of using the proposed complex of millimeter and infrared radiometers for solving problems in the field of cryology and ecology, for example, for determining the characteristics of snow melting and identifying areas of snow cover contamination.

Keywords: radiometry, snow cover, millimeter range, thermal infrared range

Accepted: 05.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-305-313

References

1. Bordonskiy G. S., Kazantsev V. A., Broadband measurements of dielectric characteristics of ice near 0 °C temperature, *Technical Physics*, 2025, V. 70, No. 7, pp. 1344–1350, DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60666.13-25.
2. Bordonskiy G. S., Orlov A. O., Signatures of the appearance of ice 0 in wetted nanoporous media at electromagnetic measurements, *JETP Letters*, 2017, V. 105, No. 8, pp. 492–496, DOI: 10.1134/S0021364017080021.
3. Bordonskiy G. S., Krylov S. D., Polyakov S. V., Ryabova L. D., About variations of infrared radiation from snow and ice cover, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1988, No. 6, pp. 83–87 (in Russian).
4. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V., Difference between radar and radiometric signatures (the case of eutrophic lake ice cover), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 2, pp. 228–240 (in Russian).
5. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Kazantsev V. A. et al., Radio brightness temperature of freshwater ice cover during freeze-up, *Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 20th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 2022, p. 151 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
6. Bordonskiy G. S., Kazantsev V. A., Kozlov A. K., The search for ice 0 in the Earth's atmosphere, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2024, V. 60, No. 6, pp. 706–713, DOI: 10.1134/S0001433824700646.
7. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Sea ice dynamics in the Pechora Sea in winter 2019/2020, *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2021, V. 14, No. 1, pp. 97–105 (in Russian), DOI: 10.7868/S207366732101010X.
8. Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Romanov A. N., Sharkov E. A., Analysis of changes in the ice cover of freshwater lakes by SMOS data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, V. 54, No. 9, pp. 1135–1140, DOI: 10.1134/S0001433818090384.
9. Sharkov E. A., *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy* (Radio thermal remote sensing of the Earth: physical fundamentals), V. 1, Moscow: IKI RAN, 2014, 544 p. (in Russian).
10. Quigley D., Alfè D., Slater B., Communication: On the stability of ice 0, ice i, and I_h , *J. Chemical Physics*, 2014, V. 141, No. 16, Article 161102, 5 p., DOI: 10.1063/1.4900772.

11. 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, pp. 733–793, DOI: 10.1038/nmat3977.
12. Slater B., Quigley D., Zeroing in on ice, *Nature Materials*, 2014, V. 13, pp. 670–671, DOI: 10.1038/nmat4017.