

Особенности радарного и радиометрического зондирования береговой зоны пресных озёр в микроволновом диапазоне в зимний период времени

А. А. Гурулев, В. А. Казанцев, А. К. Козлов

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

Проведены натурные радиометрические исследования пресного ледяного покрова в береговой зоне пресного водоёма, расположенного в Забайкальском крае, на длинах волн 0,3; 0,8 и 2,3 см. Кроме того, выполнены радарные измерения данного объекта исследования на длинах волн 0,8 и 2,3 см. Показано, что существуют различия в полученных данных между радарными и радиометрическими методами исследования подобных сред. При радиометрических исследованиях ледяного покрова толщиной более 1 м в сантиметровом диапазоне определяется граница раздела ледяного покрова, лежащего на водной поверхности и на грунте. В миллиметровом диапазоне, ввиду отражательных и излучательных особенностей снежного и ледяного покрова, данная граница прослеживается нечётко. В миллиметровом диапазоне наблюдается уменьшенное значение радиояркостной температуры снежно-ледяного покрова для случая со снегом, в котором отсутствуют ледяные зёрна. Это связывается с зернистостью снежного покрова, имеющего характерные размеры зёрен в несколько миллиметров. Их наличие приводит к увеличению рассеяния излучения в данном диапазоне. Для оперативности мониторинга береговой зоны пресных водоёмов целесообразно использовать БПЛА, на борту которого устанавливается радиометрический и радарный комплекс. Данная методика при высоком пространственном разрешении позволяет эффективнее определять внутренние особенности ледяного покрова, расположенного на грунтовой и водной поверхности в береговой зоне водоёма.

Ключевые слова: микроволновый диапазон, радарный метод, микроволновая радиометрия, пресный ледяной покров, береговая зона

Одобрена к печати: 08.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-253-263

Введение

Мониторинг озёрного льда в момент его деструкции — актуальная задача для практических нужд. Как правило, его разрушение начинается с загрязнённых участков водоёма или с береговой линии. Например, по этой причине выезд на ледяной покров в весенний период запрещён. Нарушение этих правил может привести к отрицательным последствиям, даже если при визуальном осмотре представляется возможность «безопасного» движения по данному объекту. Однако визуальный внешний осмотр поверхности льда не даёт полной картины состояния ледяного покрова. Также выборочная проверка состояния льда тоже не является достоверной. В местах отбора проб льда ледяной покров может представлять собой довольно прочный объект, однако вблизи от изъятия образцов может располагаться область подтаявшего льда и, соответственно, он будет менее прочный или недостаточной толщины для передвижения по нему на автомобиле или другом транспортном средстве. Так, в работе (Гурулев и др., 2013) приведён пример, где показано, что область загрязнённого ледяного покрова представляет собой особый участок, где при непосредственном изъятии проб можно неверно интерпретировать полученный результат.

Дороги по ледяному покрову строят таким образом, чтобы был минимальный риск разрушения льда под транспортным средством. По этой причине зимники прокладываются вблизи береговой зоны. Следует отметить, что существуют различные методы мониторинга автомобильных дорог, расположенных на ледяном покрове.

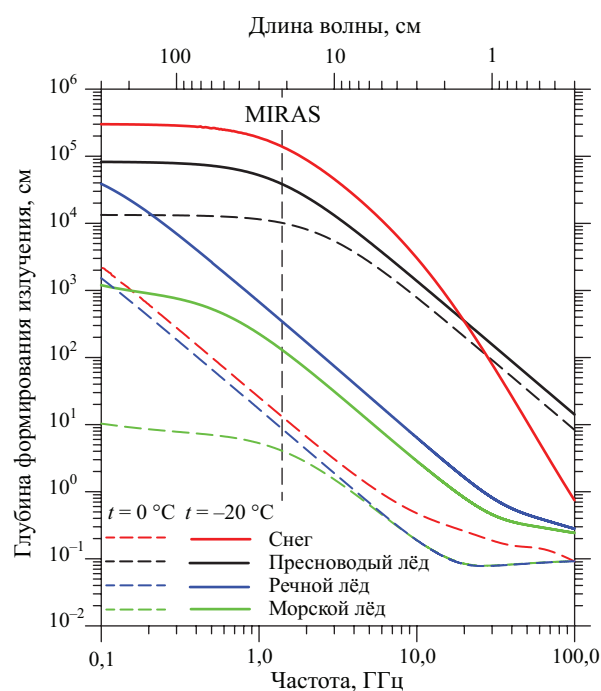


Рис. 1. Глубина формирования излучения для снега, пресноводного, морского и речного льда (Тихонов и др., 2020) (MIRAS — *англ.* Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis)

Кроме непосредственного изъятия проб льда, существуют и дистанционные методы диагностирования состояния данных объектов. Для этих целей используют электромагнитные волны, лежащие в радиодиапазоне. Из-за особенностей диэлектрических потерь льда ледяной покров представляется практически прозрачным в данном диапазоне, поэтому при радарных исследованиях ледяных покровов можно судить об их толщине. Так, в работах (Лаврентьев и др., 2023; Топольский и др., 2012) показано, как с использованием георадаров можно определить толщину пресного льда, расположенного как на водной поверхности, так и на грунте. В случае пассивного радиолокационного метода следует отметить, что глубина формирующего тепловое излучение пресного льда достигает нескольких десятков метров и зависит от длины волны и концентрации примесей во льду (Бордонский, Гурулев, 2008). На рис. 1 приведён график зависимости глубины излучающего слоя для различных типов льдов от частоты электромагнитного излучения (Тихонов и др., 2020). Эти данные позволяют по собственному излучению ледяного покрова судить о его интегральных физико-химических характеристиках и среде, на которой он расположен.

Следует отметить, что ледяной покров служит индикатором состояния водного объекта. Так, например, во время его становления в лёд происходит захват солевых включений, и, таким образом, по мощности радиотеплового излучения ледяного покрова можно оценивать его минерализацию и, соответственно, косвенно судить о солёности исходных вод. Так, в работе (Тихонов и др., 2020) показано, что в Обской губе по пространственному распределению радиояркостной температуры разделяется пресноводная её часть и морская.

Для водоёмов активная биологическая деятельность происходит вблизи береговой зоны. Данный факт имеет и отрицательные последствия. Так, на Байкале (Куликова и др., 2021) в его прибрежной зоне стали распространяться водоросли рода *Spirogyra*, которые продуцируют токсины. Выявлять пространственное распределение по акватории водоёма высшей водной растительности, захваченной в лёд, можно также с использованием микроволновых методов зондирования пресных ледяных покровов (Бордонский и др., 2014). Примером выявления эвтрофикации водоёма вблизи береговой зоны служит работа (Бордонский и др., 1994), где карта распределения высшей водной растительности сопоставлена с распределением радиояркостной температуры для эвтрофированного водоёма.

Ввиду физико-химических особенностей береговой зоны водоёмов, интерпретация спутниковых данных вызывает некоторые затруднения. Например, в пиксель космоснимков попадает не только водная поверхность, но и грунт. Для зимнего периода электромагнитные характеристики ледяного покрова, лежащего на водной поверхности, и ледяного покрова, расположенного на грунте, а также сам грунт со снежным покровом отличаются. По этой причине необходимо учитывать влияние береговой зоны при модельных расчётах радиояркостной температуры исследуемых областей водных объектов. Так, в работе (Тихонов и др., 2024) на примере данных радиометра MIRAS спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) выполнено моделирование межгодовой динамики радиояркостной температуры различных областей Енисейского зал. с учётом береговой зоны. В результате было определено положение зоны смешения пресных и солёных вод данного объекта в период ледостава.

Таким образом, можно отметить, что береговая зона водоёмов играет большую роль в биопродуктивности данных объектов, имеет высокое практическое значение для логистики в зимнее время, а также важна для решения экологических проблем. Поскольку лёд является индикатором состояния окружающей среды, то мониторинг узкой береговой зоны пресных водоёмов в зимний период может иметь особое значение. Для этих целей рационально использовать микроволновый диапазон при радиозондировании данного криосферного объекта как в активном (Valence et al., 2022; Vergnano et al., 2022), так и в пассивном режиме (Бордонский и др., 1994; Alekseeva et al., 2019). В настоящей работе исследованы возможности радиозондирования береговой зоны озёр при достижении пространственного разрешения порядка одного метра.

Методика эксперимента

Для выполнения натурных измерений микроволновых излучательных и отражательных характеристик ледяного покрова пресного водоёма в береговой зоне в 2024–2025 гг. был выбран ледяной покров оз. Арахлей, находящегося в Забайкальском крае (Россия). Данный водоём является пресным с минерализацией исходных вод около 100 мг/кг. В конце зимнего периода минерализация льда составляет ~1 мг/кг (Бордонский, Крылов, 2000; Венславский и др., 2020; Смахтин, 2018). В ледяном покрове озера обнаруживаются как водоросли, так и беспозвоночные, описанные в работе (Афониная и др., 2017). Следует отметить, что прибрежный лёд структурно разнообразнее, чем лёд из глубоководной части озера (Афониная и др., 2017).

Для исследования были выбраны два участка ледяного покрова. Первый участок имел размеры 40×20 м. Его особенность заключалась в том, что часть ледяного покрова располагалась на водной поверхности, а вторая часть на песчаном грунте. Второй участок находился вблизи берега и имел размеры 15×40 м. В данном участке ледяной покров полностью располагался на грунте, и на нём проходила автомобильная дорога вдоль береговой линии. Угол уклона дна (φ) в месте исследования составляет $\text{tg}(\varphi) = 1/50$. Фотография места измерения с возвышенности показана на *рис. 2*. В момент исследований толщина ледяного покрова, лежащего на водной поверхности, составляла ~1 м, снежного покрова — от 10 до 15 см. Температура воздуха — около -5°C . Измерения осуществлялись в безоблачную, безветренную погоду.



Рис. 2. Фотография места исследования радиолокационных характеристик ледяного покрова оз. Арахлей. 1 и 2 — участки измерений, 3 — дорога

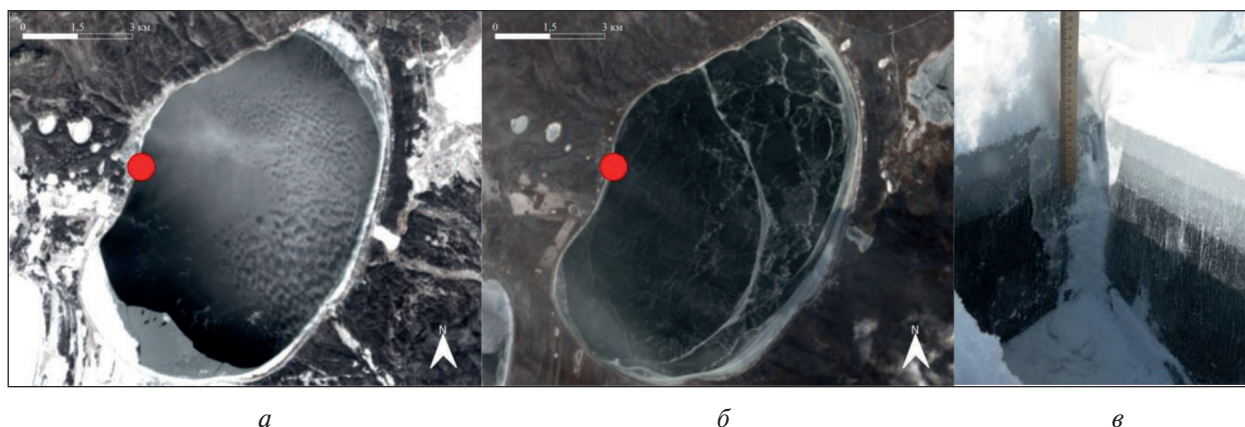


Рис. 3. Снимки оз. Арахлей в видимом диапазоне: *а* — 5 ноября 2024 г., космоснимок со спутника Landsat-8; *б* — 15 ноября 2022 г., изображение со спутника Landsat-9; *в* — 13 марта 2025 г., фотография ледяного покрова в разрезе

Следует отметить особенность льда: в момент его становления на водную поверхность выпали осадки в виде снега, который и стал причиной начала образования ледяного покрова. Поэтому верхний слой льда имел матовую область толщиной до 10 см. Ранее такой лёд фиксировался на водоёме, расположенном вблизи г. Читы, описанный в работе (Гурулев и др., 2025). Данный объект хорошо распознавался по космоснимкам в панхроматическом режиме. Для оз. Арахлей также по данным с искусственного спутника Земли в видимом диапазоне наблюдался матовый лёд, расположенный на водном объекте. На рис. 3 приведён космоснимок свежееобразованного ледяного покрова 2024 г. (см. рис. 3а) и для сравнения — космоснимок 2022 г. (см. рис. 3б), когда лёд при своём становлении не захватывал свежеевыпавший снег. На рис. 3в представлена фотография стенки углубления после изъятия льда из ледяного покрова в марте 2025 г. Как видно, матовый слой снега имел толщину ~10 см. Причём следует

отметить, что в некоторых местах ледяного покрова имела, как на приведённой фотографии, двухслойная матовая структура с чётко отличающимися границами. На рис. 3 точкой отмечено место измерений излучательных и отражательных свойств ледяного покрова.

Как видно из рис. 3б, ледяной покров, в котором отсутствует слой смеси льда и снега, в ноябре 2022 г. имеет трещины, связанные с термическими напряжениями, возникающими в нём за счёт перепадов дневной и ночной температуры, а также за счёт ветрового воздействия на него. В зимнем сезоне 2024—2025 гг. данные трещины в это же время отсутствуют.

Измерения заключались в следующем.

Измерения излучательных характеристик снежно-ледяного покрова береговой зоны.

На систему передвижения, установленную на полозья, размещалась аппаратура, принимающая радиотепловое излучение на длинах волн 0,3; 0,8 и 2,3 см.



Рис. 4. Фотография приёмного комплекса с генераторами для измерения радиолокационных характеристик береговой зоны пресного водоёма

Приём излучения осуществлялся на вертикальной поляризации. Флуктуационная чувствительность радиометров при постоянной времени 1 с: 0,3 см — 0,2 К; 0,8 см — 0,05 К; 2,3 см — 0,2 К. Угол наблюдения составлял 45°. Расстояние от поверхности снежного покрова до рупорных антенн ~150 см. Фотография измерительной установки приведена на *рис. 4* (см. с. 256).

Калибровку микроволновых радиометров осуществляли по эталонам двух чёрных тел с разной термодинамической температурой. Запись велась на систему сбора данных фирмы Agilent.

Измерения отражательных (рассеивающих) характеристик снежно-ледяного покрова береговой зоны.

Радарные измерения осуществлялись в непрерывном режиме с использованием генераторов и радиометров. Излучатели и приёмники отделялись металлическим экраном.

Для исключения влияния собственного радиотеплового излучения исследуемой среды радиометры были «загрублены» с использованием аттенюаторов на входе. На передвижную платформу устанавливались микроволновые генераторы на диодах Ганна, на длины волн 2,3 и 0,8 см. На фотографии (см. *рис. 4*) они показаны в левой части. В итоге рассеянный сигнал принимался на радиометрическую аппаратуру при обратном рассеянии излучения слоистой структуры «воздух — снег — ледяной покров — вода/грунт».

Полученные результаты и их обсуждение

В ходе выполненных исследований были получены следующие результаты.

При измерениях теплового излучения на длинах волн 0,3; 0,8 и 2,3 см ледяного покрова, лежащего на водной поверхности и грунте, т. е. участка 1 (см. *рис. 2*), получено распределение радиояркой температуры, приведённое на *рис. 5*. Как видно из представленных карт, при увеличении длины волны излучения можно определять границу, на которой лёд расположен на воде и на грунте. Радиояркая температура на длине волны 2,3 см снежно-ледяного покрова, лежащего на водной поверхности, имеет существенно меньшее значение по сравнению со льдом, расположенным на грунте (около 20–30 К).

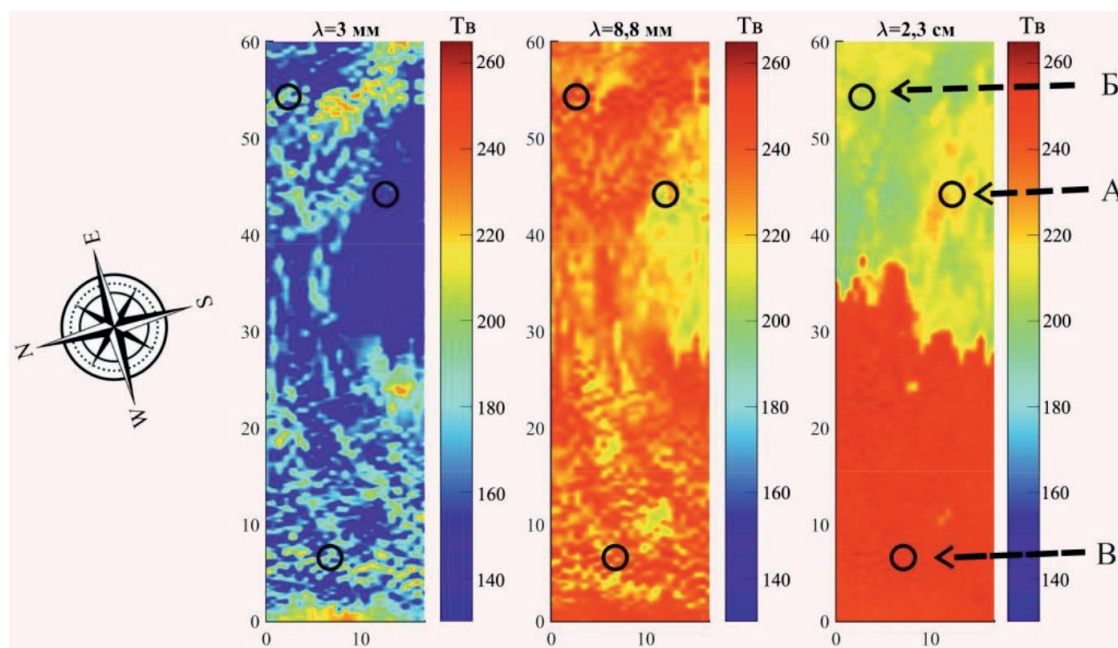


Рис. 5. Поверхностное распределение радиояркой температуры T_b (в К) пресного снежно-ледяного покрова участка 1 на трёх длинах волн λ . Дата: 13 марта 2025 г. Размеры участков в метрах. А, Б, В — места отбора проб

На длине волны 0,8 см данная граница прослеживается нечётко, а на 0,3 см её не видно. Этот факт связан с тем, что верхняя часть ледяного покрова имеет матовую слоистую структуру. По этой причине в ледяном покрове существуют естественные рассеиватели излучения на данной длине волны. Кроме того, для миллиметрового диапазона невелика глубина формирования излучения (см. *рис. 1*).

Взятие проб льда и снега в трёх точках показало, что значение радиояркостной температуры на длине волны 0,8 см зависит от физико-химических свойств льда верхнего слоя ледяного покрова. В точке А толщина матового слоя льда составляла 3 см, а в точках Б и В она имела двухслойную структуру, представленную на фотографии (см. *рис. 3в*), и достигала глубины до 10 см. Повышенное значение радиояркостной температуры на данной длине волны наблюдалось именно в точках Б и В. Объяснение данного факта было дано в работе (Бордонский и др., 2016), в которой показано, что наличие газовых пузырей в ледяном покрове и на границе раздела «лёд – вода» приводит к повышению мощности теплового излучения в микроволновом диапазоне.

Таким образом, влияние матового верхнего слоя льда на значение радиояркостной температуры излучающей слоистой системы («воздух – снег – матовый лёд – прозрачный лёд – вода») на длине волны 0,8 см значительно.

Для длины волны 0,3 см особое влияние на радиояркостную температуру оказывает снежный покров. За счёт продолжительного воздействия солнечных лучей и других внешних влияний на снежный покров (колебаний температуры, диффузии молекул воды) в некоторых местах исследуемых участков он представлял собой фирн (зернистый снег) (Патерсон, 1972). Фирн имел зёрна размерами до 2 мм, т. е. соизмеримыми с длиной волны излучения. По этой причине происходит возрастание эффектов рассеяния микроволнового излучения на данной длине волны.

При радарных измерениях на длинах волн 0,8 и 2,3 см участка ледяного покрова под номером 1 наблюдаются области льда, в которых коэффициент обратного рассеяния находится в противофазе (*рис. 6*). Данный эффект связывается с различием геометрических размеров рассеивателей, находящихся в верхнем слое ледяного покрова. Также практически отсутствует переходная область между льдом, расположенным на водной поверхности, и льдом, расположенным на грунте, как это наблюдается на длине волны 2,3 см на *рис. 5*.

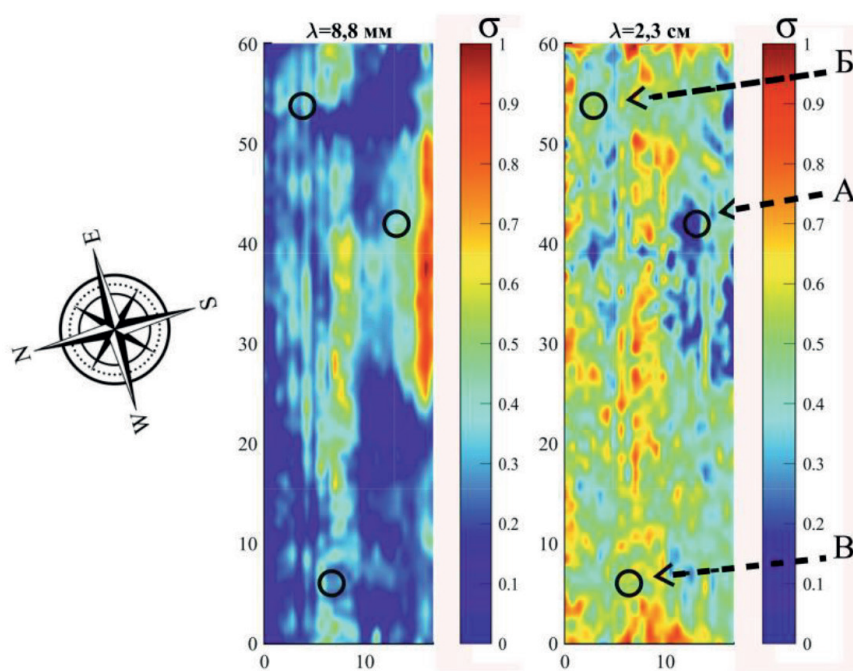


Рис. 6. Радарное изображение пресного снежно-ледяного покрова участка 1. Дата: 13 марта 2025 г. Интенсивность обратного рассеяния σ (в усл. ед.). А, Б, В — места отбора проб

Исследование ледяного покрова, находящегося на участке 2, показало следующие результаты, которые приведены на *рис. 7*. При радиометрических наблюдениях выявлены участки с повышенным значением радиояркой температуры на длинах волн 0,3 и 2,3 см, что связывается с увеличением минерализации льда. В данном месте располагается автомобильная дорога и за счёт техногенного воздействия на исследуемый криосферный объект происходит увеличение концентрации загрязнений в ледяном покрове. Кроме того, происходит уплотнение снега и изменение его радиометрических характеристик. Из этого следует, что при картировании пресных ледяных покровов с использованием микроволновых радиометров, расположенных на борту беспилотного летательного аппарата, и получении их радиоизображений при высоком пространственном разрешении можно выявлять места расположения ледовых дорог.

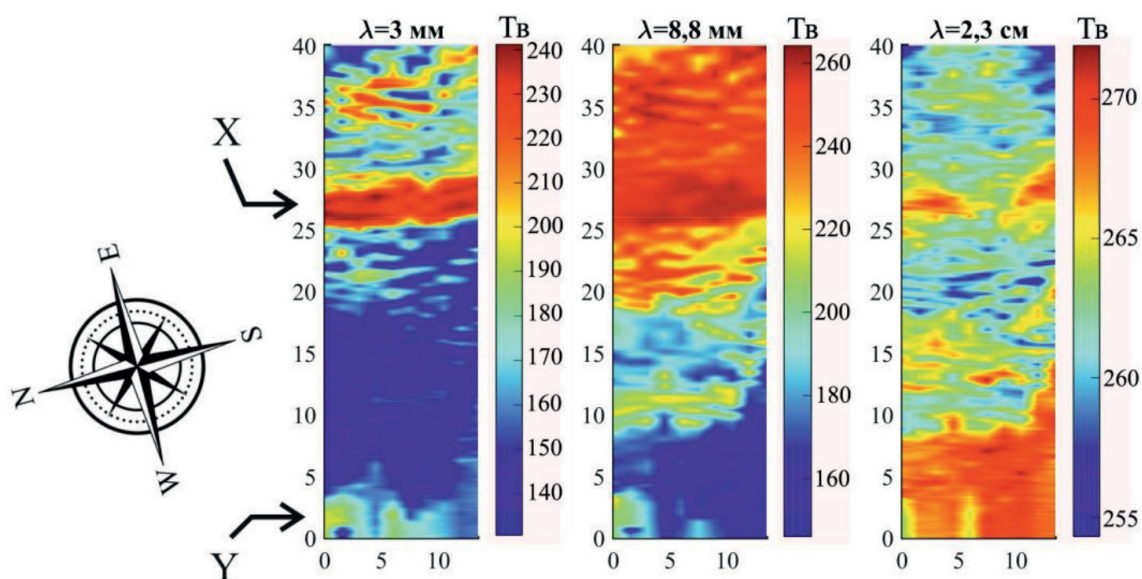


Рис. 7. Поверхностное распределение радиояркой температуры пресного снежно-ледяного покрова участка 2 на трёх длинах волн. Дата: 14 марта 2025 г. X — дорога на поверхности снега, Y — область с толщиной снежного покрова ~30 см

По причине наличия снега в виде зёрен на длинах волн миллиметрового диапазона наблюдается пониженное значение радиояркой температуры, что отмечено на рисунках знаком «Y» (в этом месте толщина снежного покрова достигала 30 см). Данный эффект связан с повышенными рассеивающими свойствами излучающей среды. На длине волны сантиметрового диапазона, напротив, наблюдается повышенное значение радиояркой температуры.

На *рис. 8* (см. с. 260) представлены радарные изображения участка 2. На данных изображениях автодорога, проложенная по ледяному покрову, не наблюдается, в отличие от радиометрических изображений.

Так же, как и на *рис. 6*, наблюдаются антикорреляционные зависимости отражённого излучения для сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Следует подчеркнуть, что измерения для каждой длины волны выполнены практически с одним и тем же пространственным разрешением.

На *рис. 8* наблюдаются большие вариации отражённого сигнала (в десятки раз) на длине волны 0,8 см в отличие от 2,3 см. Данный факт связывается с рассеивающей особенностью зернистого снега, который имел миллиметровые размеры зёрен.

Излучательные и рассеивающие характеристики мёрзлого грунта, покрытого снежным покровом и ледяным покровом со снегом, имеют существенные отличия, которые связаны с физико-химическими особенностями исследуемой среды.

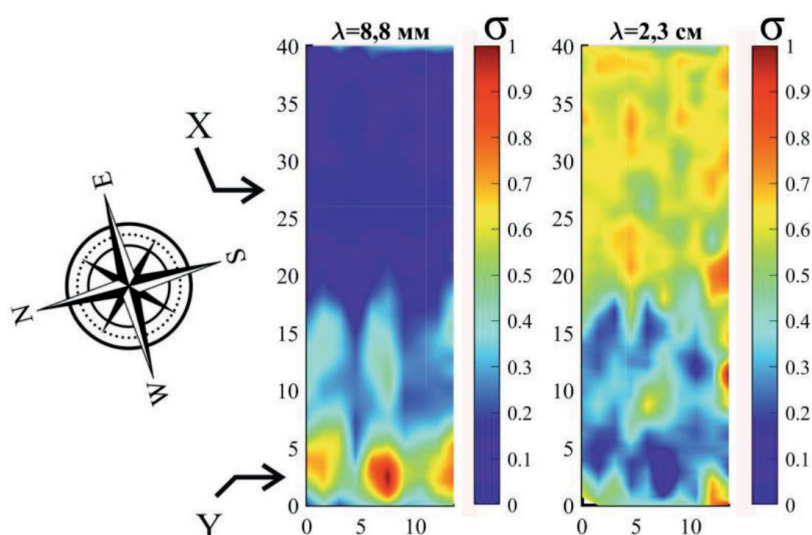


Рис. 8. Радарное изображение пресного снежно-ледяного покрова участка 2. Дата: 14 марта 2025 г. Интенсивность обратного рассеяния в условных единицах. X — дорога на поверхности снега, Y — область с толщиной снежного покрова ~30 см

Можно получать радиоизображение криосферных объектов оперативнее, если устанавливать радиометрический комплекс на борт беспилотного летательного аппарата. Данная методика позволит добиться высокого пространственного разрешения и более эффективно определять внутренние особенности ледяного покрова, расположенного как на грунте, так и на водной поверхности. При этом необходимо учитывать зависимость радиояркостной температуры от угла наблюдения при радиометрических измерениях и эффекты рассеяния, учитывать особенности электромагнитного поведения плоскостойких сред, в которых возникают интерференционные явления (Бордонский и др., 2025).

Выводы

Таким образом, были получены следующие результаты.

1. Высокое пространственное разрешение при спектральных исследованиях в миллиметровом и сантиметровом диапазонах позволяет существенно повысить информативность дистанционных измерений. Активные и пассивные радиолокационные методы зондирования в микроволновом диапазоне береговой зоны пресного озера показали, что существуют различия в данных между радарными и радиометрическими методами измерений исследуемых сред. Важной особенностью становится то, что они представляют собой взаимно дополняющие методы.
2. При радиометрических исследованиях ледяного покрова толщиной более одного метра в сантиметровом диапазоне определяется граница раздела ледяного покрова, лежащего на водной поверхности и грунте. В миллиметровом диапазоне, ввиду отражательных и излучательных особенностей снежного и ледяного покрова, данная граница не прослеживается.
3. В миллиметровом диапазоне наблюдается пониженное значение радиояркостной температуры по сравнению со снегом, в котором отсутствуют ледяные зёрна. В эксперименте наблюдали характерные размеры зёрен в несколько миллиметров. Их наличие приводит к увеличению рассеяния излучения в данном диапазоне, например, на длине волны 0,8 см радиояркостная температура объекта понижалась на ~20 К при толщине снега ~30 см.
4. Для оперативности мониторинга береговой зоны пресных водоёмов целесообразно использование беспилотного летательного аппарата, на борту которого устанавли-

вается радиометрический и радарный комплекс. Данная методика при высоком пространственном разрешении позволяет определять многие внутренние особенности ледяного покрова, особенности снежно-ледяной поверхности и береговой зоны. При этом необходимо учитывать зависимость радиофизических характеристик снежно-ледяного покрова от угла наблюдения, особенно при изучении плоскостойких сред, в которых возникают интерференционные явления.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-27-00278 «Разработка методики радиометрического исследования криосферных образований с использованием беспилотных летательных средств в миллиметровом диапазоне», <https://rscf.ru/project/24-27-00278/>.

Литература

1. Афонина Е. Ю., Ташлыкова Н. А., Цыбекмитова Г. Ц., Обязов В. А. Водоросли и беспозвоночные во льду пресноводного водоема (Забайкальский край) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 5. С. 72–81. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(72-81).
2. 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.
3. Бордонский Г. С., Крылов С. Д. Миграция солевых включений в ледяных покровах озер Забайкалья // Изв. РАН. Сер. геогр. 2000. № 4. С. 98–102.
4. Бордонский Г. С., Золотарева Л. Н., Крылов С. Д. Оценка пространственного распределения высшей водной растительности по радиотепловому излучению ледяного покрова в СВЧ-диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 3. С. 96–102.
5. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Различия 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.
6. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д. и др. Определение областей донного газоотделения на акваториях с пресным льдом по данным радарных и радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 150–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-150-161.
7. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Казанцев В. А., Козлов А. К. Особенности методики микроволновых радиометрических измерений с борта БПЛА на волне 0,8 см // Техника радиосвязи. 2025. № 1(64). С. 102–111.
8. Венславский В. Б., Орлов А. О., Харин Ю. В. Радиотепловое излучение ледяного покрова озера Арахлей как геоиндикатор изменения водного объекта // Вестн. Забайкальского гос. ун-та. 2020. Т. 26. № 7. С. 6–16. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-6-16.
9. Гурулев А. А., Цыренжапов С. В., Орлов А. О. Выявление внутренних неоднородностей в пресном ледяном покрове с использованием пассивной радиолокации // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 9. С. 38–41.
10. Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В., Усманов М. Т. Комплексный поиск протечки дамбы электромагнитными методами зондирования // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15. № 1. С. 155–172. DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-1-155-172.
11. Куликова Н. Н., Чебыкин Е. П., Волкова Е. А. и др. Элементный состав водорослей рода *Spirogyra* как индикатор загрязнения прибрежной зоны Байкала хозяйственно-бытовыми стоками // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42. № 2. С. 79–91. DOI: 10.15372/GIPR20210209.
12. Лаврентьев И. И., Носенко Г. А., Глазовский А. Ф. и др. Толщина льда и снежного покрова ледника Иган (Полярный Урал) по данным наземного радиозондирования в 2019 и 2021 гг. // Лёд и снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 5–16. DOI: 10.31857/S2076673423010106.
13. Патерсон У. С. Б. Физика ледников. М.: Мир, 1972. 312 с.
14. Смахтин В. К. Ледовый режим озёр Забайкалья в условиях современного потепления // Лёд и снег. 2018. Т. 58. № 2. С. 225–230. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-225-230.
15. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Романов А. Н. и др. Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период ледостава // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 3. С. 59–76. DOI: 10.31857/S0205961420030070.
16. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Романов А. Н., Шарков Е. А. Модель собственного микроволнового излучения устьевых областей арктических рек с учетом попадания в пиксель радиометра поверхности суши // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 3. С. 16–29. DOI: 10.31857/S0205961424030026.

17. 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). 5 с. <https://uwbs.ru/publikacia-agpss-mchs/>.
18. Alekseeva T., Frolov S., Sokolova J. et al. Comparison of Arctic Sea Ice concentrations from the NASA team, ASI, and VASIA2 algorithms with summer and winter ship data // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 21. Article 2481. DOI: 10.3390/rs11212481.
19. Valence E., Baraer M., Rosa E. et al. Drone-based ground-penetrating radar (GPR) application to snow hydrology // The Cryosphere. 2022. V. 16. No. 9. P. 3843–3860. DOI: 10.5194/tc-16-3843-2022.
20. Vergnano A., Franco D., Godio A. Drone-borne ground-penetrating radar for snow cover mapping // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 7. Article 1763. DOI: 10.3390/rs14071763.

Features of radar and radiometric remote sensing of the coastal zone of freshwater lakes in microwave range during the winter period

A. A. Gurulev, V. A. Kazantsev, A. K. Kozlov

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

The work presents *in situ* radiometric studies of freshwater ice cover in the coastal zone of a freshwater water body located in the Trans-Baikal Territory at wavelengths of 0.3, 0.8, and 2.3 cm. Additionally, radar measurements of this research object were conducted at wavelengths of 0.8 and 2.3 cm. It is shown that there are differences in the data obtained by radar and radiometric study methods in application to these environments. Radiometric centimeter range investigation of ice covers thicker than one meter reveals the boundary between ice cover resting on the water surface and the ground. In the millimeter range, due to reflective and emissive properties of snow and ice covers, this boundary is not clearly distinguishable. In the millimeter range, a reduced brightness temperature is observed for snow, which lacks ice grains. This is associated with the granularity of the snow cover, which has characteristic grain sizes of several millimeters. Their presence leads to increased scattering of radiation in this range. For operational monitoring of the coastal zone of freshwater bodies, it is advisable to use UAVs equipped with radiometric and radar systems. This approach, given high spatial resolution, allows for more effective determination of internal features of ice cover located on ground and water surfaces in the coastal zone.

Keywords: microwave range, radar method, microwave radiometry, freshwater ice cover, coastal zone

Accepted: 08.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-253-263

References

1. Afonina E. Yu., Tashlikova N. A., Tsybekmitova G. Ts., Obyazov V. A., Algae and invertebrates in freshwater ice (Zabaikalsky krai), *Earth's Cryosphere*, 2017, V. 21, No. 5, pp. 60–68, DOI: 10.21782/EC1560-7496-2017-5(60-68).
2. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Characteristics of thermal radiation of ice covers on water bodies with different mineralization, *Water Resources*, 2008, V. 35, No. 2, pp. 199–204, DOI: 10.1007/s11268-008-2008-4.
3. Bordonskiy G. S., Krylov S. D., Migration of salt inclusions in the ice sheets of the lakes of Transbaikalia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2000, No. 4, pp. 98–102 (in Russian).
4. Bordonskiy G. S., Zolotareva L. N., Krylov S. D., Estimation of the spatial distribution of higher aquatic vegetation by radiothermal radiation of the ice cover in the microwave range, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1994, No. 3, pp. 96–102 (in Russian).
5. 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).

6. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D. et al., Determination of bottom gas liberation zones in fresh ice water areas according to radar and radiometric measurements data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 3, pp. 150–161 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-150-161.
7. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Kazantsev V. A., Kozlov A. K., Features of the technique of microwave radiometric measurements from a UAV on a 0.8 cm wave, *Tekhnika radiosvyazi*, 2025, No. 1(64), pp. 102–111 (in Russian).
8. Venslavsky V. B., Orlov A. O., Kharin Yu. V., Radiothermal radiation of the ice cover of the Arakhley Lake as a geo-indicator of changes in a water body, *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, V. 26, No. 7, pp. 6–16 (in Russian), DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-6-16.
9. Gurulev A. A., Tsyrenzhapov S. V., Orlov A. O., Detection of internal inhomogeneities in a fresh-water ice cover using passive radio location, *Russian Physics J.*, 2014, V. 56, No. 9, pp. 1013–1017, DOI: 10.1007/s11182-014-0133-x.
10. Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V., Usmanov M. T., Comprehensive search for a dam leak using electromagnetic sensing methods, *Melioratsiya i gidrotekhnika*, 2025, V. 15, No. 1, pp. 155–172 (in Russian), DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-1-155-172.
11. Kulikova N. N., Chebykin E. P., Volkova E. A. et al., The elemental composition of algae of the genus *Spirogyra* as an indicator of pollution of the Baikal near-shore zone with domestic sewage, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2021, V. 42, No. 2, pp. 79–91 (in Russian), DOI: 10.15372/GIPR20210209.
12. Lavrentiev I. I., Nosenko G. A., Glazovsky A. F. et al., Ice and snow thickness of the IGAN Glacier in the Polar Urals from ground-based radio-echo sounding 2019 and 2021, *Ice and Snow*, 2023, V. 63, No. 1, pp. 5–16, DOI: 10.31857/S2076673423010106.
13. Paterson W. S. B., The physics of glaciers, Oxford: Pergamon Press, 1969, 250 p.
14. Smakhtin V. K., Ice regime of Transbaikalia lakes in the present-day warming, *Led i sneg*, 2018, V. 58, No. 2, pp. 225–230 (in Russian), DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-225-230.
15. Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Romanov A. N. et al., L-band radiative features of the Ob bay in the freeze-up period, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 3, pp. 59–76 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420030070.
16. Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Romanov A. N., Sharkov E. A., A model of microwave emission from mouth regions of Arctic rivers providing for radiometer pixel land contamination, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2024, V. 60, No. 9, pp. 1020–1030, DOI: 10.1134/S0001433824700981.
17. Topolsky N. G., Simakov V. V., Zerkal A. D., Seregin G. M., Mokshantsev A. V., Ageev S. V., The multifunctional portable radar for ice thickness measuring, *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti*, 2012, V. 1, No. 41, 5 p. (in Russian), <https://uwbs.ru/publikacia-agpss-mchs/>.
18. Alekseeva T., Frolov S., Sokolova J. et al., Comparison of Arctic Sea Ice concentrations from the NASA team, ASI, and VASIA2 algorithms with summer and winter ship data, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 21, Article 2481, DOI: 10.3390/rs11212481.
19. Valence E., Baraer M., Rosa E. et al., Drone-based ground-penetrating radar (GPR) application to snow hydrology, *The Cryosphere*, 2022, V. 16, No. 9, pp. 3843–3860, DOI: 10.5194/tc-16-3843-2022.
20. Vergnano A., Franco D., Godio A., Drone-borne ground-penetrating radar for snow cover mapping, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 7, Article 1763, DOI: 10.3390/rs14071763.