

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Козлов А.К., Гурулев А.А. — Особенности радиотеплового изучения наледей в микроволновом диапазоне // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.3.43976 EDN: VIWRLS URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=43976](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=43976)

## Особенности радиотеплового изучения наледей в микроволновом диапазоне

Козлов Алексей Константинович

ORCID: 0000-0002-8413-6049

младший научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

672014, Россия, Забайкальский край, г. Чита, ул. Недорезова, 16а

✉ aleksej.kozlov.97@mail.ru



Гурулев Александр Александрович

ORCID: 0000-0003-2232-3583

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

672014, Россия, Забайкальский край, г. Чита, ул. Недорезова, 16а

✉ lgc255@mail.ru



[Статья из рубрики "Подземные и поверхностные воды холодных равнинных и горных регионов"](#)

### DOI:

10.7256/2453-8922.2023.3.43976

### EDN:

VIWRLS

### Дата направления статьи в редакцию:

07-09-2023

**Аннотация:** Предметом исследования являются наледные образования, которые образуются в результате выхода грунтовых вод на поверхность ледяных покровов или грунта. Данные образования наносят существенный ущерб в хозяйственной деятельности человека. В работе исследовались природные наледи, расположенные на пресном ледяном покрове, а также искусственного происхождения наледные образования на грунте. Исследовались наледи расположенные в Забайкальском крае

вблизи города Читы. Определялась мощность теплового излучения данных объектов в микроволновом диапазоне на длинах волн 2,3 см и 0,88 см. Мощность теплового излучения в микроволновом диапазоне определялась с помощью радиометрических приемников на длины волн 0,88 см и 2,3 см, установленных на автомобиль, либо на неподвижную опору. Исследовались керны льда, изъятого из наледи для определения послойного распределения минерализации льда. Для расчетов теплового излучения наледи использовалась модель плоскослоистой неизотермической среды. Показана возможность регистрации наледных образований по радиотепловому излучению данных объектов в микроволновом диапазоне. В случае существования слоя воды на наледях радиояркостная температура будет существенно ниже, чем объект на поверхности которого отсутствует водная масса. По значению радиояркостной температуры в микроволновом диапазоне для нескольких диапазонов, в результате чего можно косвенно оценивать толщину ледяных образований. При этом необходимо учитывать вариации радиояркостной температуры среды в зависимости от ее толщины из-за интерференции радиотеплового излучения плоскослоистой среды.

### **Ключевые слова:**

наледь, микроволновый диапазон, радиотепловое излучение, дистанционное зондирование, радиометрия, ледяной покров, грунт, подземные воды, радиояркостная температура, Забайкальский край

### **Введение**

Наледные образования, как на грунтах, так и на ледяных покровах рек и озер являются следствием различных факторов и явлений, происходящих в среде, в том числе и за счет климатических изменений. Сильное увеличение температуры приповерхностного слоя тропосфера в Арктическом регионе России (за последние 30 лет в зимний период времени на 4 °C, а в летний на 2,5 °C) [1] привело к ежегодному увеличению осадков. Кроме того, произошло существенное изменение и циркуляции воздушных масс в данном регионе. В результате чего климат западной части Российской Арктики изменился. Как следствие, в Арктическом и Субарктическом зонах Российской Федерации, произошли и климатические изменения температуры почвенного покрова. По данным регионального климата в Российской Арктике наблюдается ускоряющийся рост температуры почвы с одновременным уменьшением толщины и площади снежного покрова в ноябре и апреле [2]. По этой причине происходит и, деградация многолетнемерзлых грунтов [3-5], что может привести к процессам полного разрушения криолитозоны, в последствие чего будет наблюдаться эмиссия парниковых газов. Кроме того, деградация многолетнемерзлых пород повлечет за собой к катастрофическим техногенным последствиям, например, к разрушению строительных конструкций [6]. Так, только, на нефтяных месторождениях Западной Сибири в среднем происходит около 7400 аварий в год, за счет таяния многолетнемерзлых пород [6].

Изменение климата в Субарктической зоне привело к повышению температуры окружающей среды. Не исключением является и Забайкальский край, где прирост температуры составляет в среднем 0,29 °C за последние десять лет, причем, в зимний период времени 0,40 °C за последние десять лет, а летом 0,30 °C за такой же промежуток времени [7]. Максимальный прирост температуры наблюдается в весенний период времени 0,56 °C за последние десять лет. Данное повышение температуры

приземного воздуха приводит к повышению температуры почвенного покрова [8], а соответственно, и к деградации многолетнемерзлотных образований.

Кроме того в Забайкалье произошли изменения и по количеству осадков. С 2017 года в регионе наблюдается увеличение осадков. И причем в ближайшее десятилетие тенденция их увеличения будет сохраняться [9], что приводит к повышению уровня грунтовых вод.

В связи с данными климатическими изменениями в Субарктической зоне России начало увеличиваться и число наледей. Данный факт хорошо прослеживается на примере Забайкальского края [10-11]. Они негативно влияют на различные инженерные сооружения, приводя некоторые из них в негодность [12]. Также наледь существенно влияет на природную среду, являясь своеобразной экосистемой. Она имеет ландшафтобразующее значение, оказывая влияние на рельеф местности, микроклимат, растительный и почвенный покров и т.д. [13].

Таким образом, мониторинг наледных явлений в Субарктическом и Арктическом регионах является актуальной задачей и имеет большое практическое значение.

### **Теоретическое моделирование теплового излучения наледей**

Наледи образуются в результате излиивания природных или техногенных вод на поверхности различных сред, таковыми могут являться грунты, ледяные покровы и др. В результате этого образуются слоистые ледяные структуры [14]. Данная структура хорошо визуально определяется на керне льда, изъятого из наледи. Так, например, в пещерах Хээтэй (Забайкальский край) существует наледное образование, толщиной около четырех метров, в результате попадания внутрь объекта поверхностных сточных вод во время осадков и при таянии снежного покрова. При взятии керна льда данной наледи прослеживается слоистая структура этого объекта. Анализ проб по толщине льда показал существенное отличие и физических свойств наледи по толщине [15]. Кроме визуального наблюдения слоистости объекта и непосредственного изъятия проб образцов льда для выявления отличительных свойств ледяного покрова по высоте существуют контактные приборы для экспресс-анализа характеристик натечного льда, которые выполнены, например, в виде выпаривателя [16].

На поверхности грунтов, как правило, образуются наледи подземных вод, а на поверхности ледяных покровов в результате послойного намораживания речных вод образуются наледи поверхностных вод. На территории России объем наледи поверхностных вод в четыре раза меньше объема наледи подземных вод [17]. По этой причине, большая часть данного образования расположена в руслах рек, например, в местах промерзания до дна ледяного покрова.

Одним из способов дистанционного обнаружения наледных образований является космический мониторинг поверхности земной поверхности. Для этих целей используется радиометрический приемник, принимающий собственное тепловое излучение в инфракрасном (ИК) диапазоне. Оптимальным временем для выявления наледей является тот период, когда уже отсутствует снежный покров. В этот период времени площадь наледей близка к максимальной [18, 19]. В качестве подтверждения данного факта, на рис. 1 представлен снимок, сделанный со спутника Landsat-9 в видимом диапазоне (а) и в ИК-диапазоне (10,6...11,19 мкм) (б). На космоснимках приведен район п. Кадала вблизи г. Чита. Наледи фиксируются по низкой температуре в ИК-диапазоне, что

отражено на рис. 1.

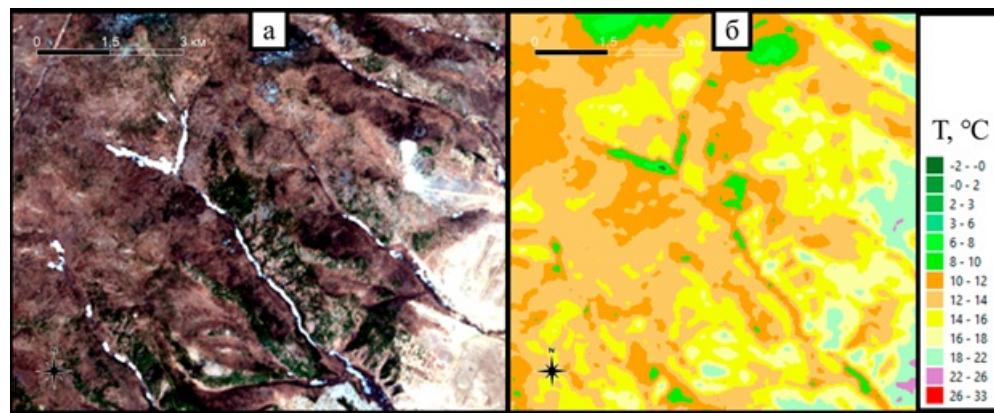


Рисунок 1 – Космоснимок участка Забайкальского края вблизи г. Чита со спутника Landsat-9. а) в видимом диапазоне, б) в ИК (10,6...11,19 мкм). Дата: 03 мая 2023 год.

В результате, с использованием дистанционного мониторинга Земли из космоса в ИК-диапазоне, был создан Атлас наледей Северо-восточной части России [20]. В результате полученных данных на Северо-востоке России было выявлено более 10 тыс. ледяных полей, с суммарной площадью около 14 тыс.  $\text{км}^2$ , т.е. выявлять физико-химические особенности наледных образований с использованием ИК-диапазона практически невозможно, можно оценивать только их площадь.

На помощь выявлению особенностей наледей дистанционным способом может прийти микроволновый диапазон. Особенностью данного диапазона в сантиметровом или в дециметровом интервале длин волн является его всепогодность, а также то, что толщина слоя льда, в котором формируется тепловое излучение, составляет для пресного льда от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров, в зависимости от длины излучения. Так, при исследовании пресного ледяного покрова по мощности радиотеплового излучения, которая фиксируется микроволновыми радиометрами, определяется минерализация ледяного покрова, выявляются его физические свойства и области внедрения в ледяной покров различных примесей во льду, захваченные в ледяной покров во время его становления (растительность, газовые пузыри и т.д.) [21, 22]. По этой причине, можно дистанционно выявлять структурные особенности наледных образований по мощности собственного радиотеплового излучения данной среды.

Как было сказано выше, исследуемый объект, как правило, представляет из себя плоскослоистую структуру, иногда и с резкими переходными границами. По этой причине при расчетах радиояркостной температуры ( $T_y$ ) наледей представляется возможным использовать модель в виде слоистой неизотермической среды, схема которой представлена на рис. 2. При расчете  $T_y$  необходимо учитывать значение относительной комплексной диэлектрической проницаемости каждого слоя ( $\hat{\varepsilon}$ ), температуру, угол наблюдения [23, 24].

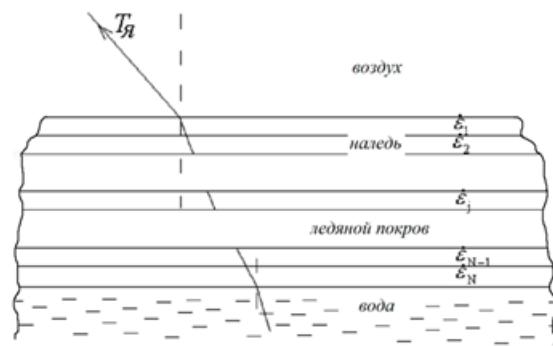


Рисунок 2 – Модель наледного образования на ледяном покрове на основе слоистой неизотермической среды.

В результате расчетов по данной модели можно определить значение  $T_y$  для различных длин волн и сравнить его с полученными натурными результатами мощности теплового излучения наледей, которые расположены, как на грунтах, так и на ледяных покровах. При анализе  $T_y$  на различных длинах волн и для двух ортогональных поляризаций (горизонтальной и вертикальной) можно выявлять особенности структуры наледного образования, например, существует ли жидккая фаза внутри исследуемого объекта и др.

### Методика эксперимента

Для определения радиояркостной температуры наледных образований использовались радиометрические приемники на частоту 13 ГГц и 34 ГГц с чувствительностью 0,1 К и 0,2 К соответственно при постоянной времени 1 с. Калибровка осуществлялась по отраженному от металлического листа излучению безоблачной атмосферы при низкой ее влажности и по собственному тепловому излучению пресной воды с известной температурой. Излучение невзволнованной водной поверхности рассчитывалась по модели полубесконечной среды [25].

Были выполнены два типа измерений наледей.

Первый эксперимент заключался в исследовании искусственной наледи на поверхности грунта в зимнее время. Грунт представлял из себя песчаную смесь с содержанием гумуса около 20 %. Данный объект осуществляли путем ежесуточных добавлений воды с исходной минерализацией около 100 мг/л в рамку с линейными размерами  $140 \times 140 \text{ см}^2$ . Это производилось для создания слоистой структуры наледи, как это встречается в природных условиях. Терморезисторами фиксировалась температура наледи на разных толщинах. Производилась запись метеопараметров атмосферы. Радиометры устанавливались под углом 45°. Регистрация выходного сигнала с радиометров производилась с помощью системы записи сигналов фирмы Agilent. Измерения выполнялись в феврале 2023 года при температуре окружающего воздуха ниже  $-20^\circ\text{C}$ . Фотография установки и ее схема приведена на рис. 3(а) и рис. 3(б).

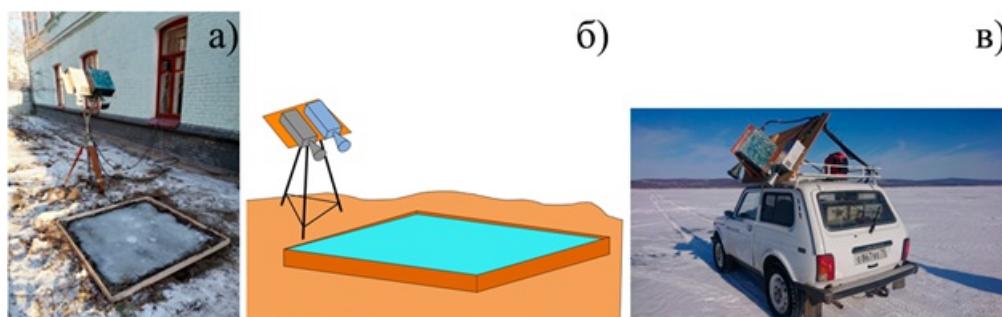


Рисунок 3 – Фотографии радиометрического комплекса для исследования а – искусственной наледи на грунте, б – схема проведения эксперимента по исследованию наледи, в – природной наледи на ледяном покрове.

Второй эксперимент заключался в исследования природной наледи на поверхности ледяного покрова в зимнее время. Измерения выполнялись с использованием передвижного радиометрического комплекса расположенного на автомобиль на частотах 12 ГГц и 34 ГГц. Угол наблюдения составлял 45°. Фотография установки приведена на рис. 3(в). Объектом исследования было наледное образование на реке Ингода вблизи населенного пункта Атамановка (Забайкальский край). Измерения выполнялись в феврале 2023 г. Минерализация ледяного покрова составляла около 1 мг/кг. Толщина наледи не превышала 15 см с исходной минерализацией 150 мг/кг. Толщина ледяного покрова – 130 см. Наледь образовалась в результате натечности на речной ледяной покров грунтовых вод, выдавленных в береговой зоне р. Ингода за счет мерзлотного воздействия на грунт.

Для анализа природных наледей, расположенных на грунте, нами был взят керн льда из наледного образования, расположенного в восточной части города Чита. Максимальная толщина наледного образования составляет 2 метра, при площади коло 80 м<sup>2</sup>. В результате нами обнаружена слоистость данного объекта, что показано на рис. 4(а). Причем следует отметить, что вариации минерализации льда составляют от 40 до 100 мг/кг в выбранном керне льда. Этот факт говорит о том, что минерализация натечной воды различна в разный период времени. Слоистость проявляется в виде различной концентрации газовых включений в ледяном покрове, а также примесей во льду минеральных частиц вымытых грунтовыми водами. При сравнении искусственной наледи также наблюдается слоистость, что показано на рис. 4(б).

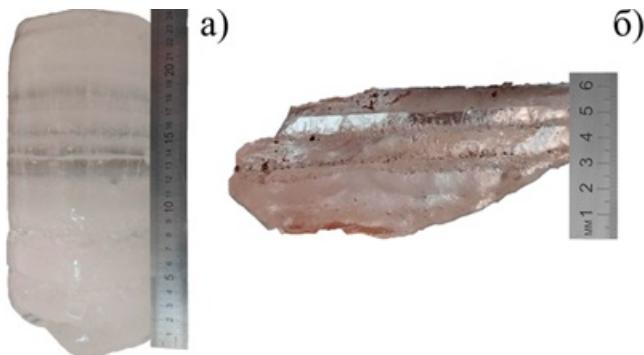


Рисунок 4 –Фотографии а) керна льда, изъятого из природной и б) образец из искусственной наледи, расположенной на грунте.

Таким образом, созданное ледовое образование можно приближенно считать моделью природной наледи, расположенной на грунте.

#### **Полученные результаты и их обоснование**

По данным экспериментов и выполненных расчетов радиояркостных температур наледей были получены следующие результаты.

При исследовании искусственных наледей на грунте было обнаружено, что при натекании воды происходит уменьшение радиояркостной температуры исследуемой среды, как на вертикальной, так и на горизонтальной поляризациях. Это связано с тем, что тепловое излучение формируется в относительно небольшом поверхностном слое и излучение коэффициента Френеля для воды больше, чем у грунта. По этой причине, при

выходе водных масс на земную поверхность радиометрическим методом в микроволновом диапазоне можно наблюдать данный процесс. Так, существует проблема обнаружения выхода вод под снежным покровом, т.к. этот процесс не определяется визуально, то этот вопрос можно разрешить с помощью радиометрического метода наблюдения за объектом. Это возможно за счет того, что снежный покров является практически прозрачным в сантиметровом и в дециметровом диапазонах.

При кристаллизации воды в верхнем слое наледи происходят вариации радиояркостной температуры, что связывается с ростом верхнего слоя растущего льда на водной поверхности. Так как слой воды при эксперименте не превышал 1 см, то на частоте 34 ГГц данные вариации  $T_y$  проходят один цикл, а на частоте 12 ГГц четверть цикла. Если же слой новообразованного льда будет больше, т.е. слой воды, который выходит на наледь будет несколько сантиметров, то вариации радиояркостной температуры будут происходить гораздо дольше. Вариации  $T_y$  при росте ледяного покрова рассмотрены в работе [26]. Как видно из [26] данные вариации зависят от минерализации льда, угла наблюдения и вида поляризации.

Кроме того, температура свежего слоя наледи в начальный момент времени составляет около 0 °C, то по мере ее охлаждения температура будет понижаться. Результаты экспериментального исследования мощности радиотеплового излучения наледи на грунте показаны на рис. 5.

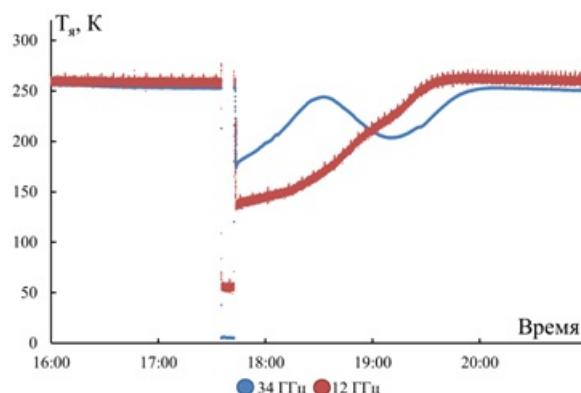


Рисунок 5 – Радиояркостная температура искусственной наледи на грунте на частотах 34 ГГц и 12 ГГц. Дата: 22 февраля 2023 г. Вертикальная поляризация.

Расчетные значения по слоистой неизотермической модели с плоскими границами наледи показали хорошее соответствие с полученными экспериментальными данными.

При радиометрическом измерении природной наледи, расположенной на поверхности ледяного покрова на частотах 12 ГГц и 34 ГГц, было обнаружено, что она приводит к повышению  $T_y$  (рис. 6). Этот факт связывается с тем, что на поверхности ледяного покрова, которая по минерализации близка к дистиллированной воде, существует слой льда с повышенной минерализацией. Как было показано в работе [21], увеличение минерализации в ледяном покрове приводит к повышению радиояркостной температуры исследуемого объекта.

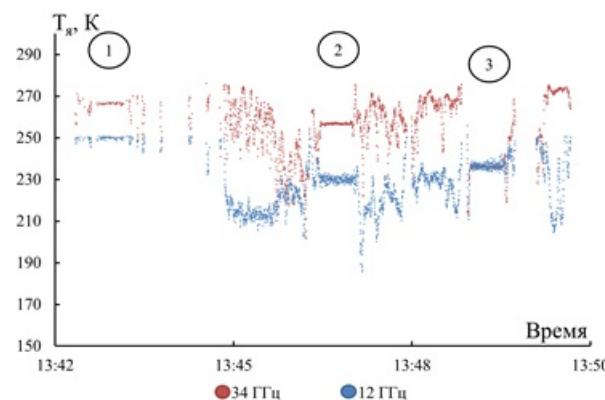


Рисунок 6 – Радиояркостная температура наледи на ледяном покрове р. Ингода на частотах 34 ГГц и 12 ГГц. Дата: 01 февраля 2023 г. Вертикальная поляризация. 1 – река; 2 – наледь; 3 – река

Ранее в работе [27] также было показано повышение значения  $T_{\text{я}}$  в сантиметровом диапазоне пресного ледяного покрова из-за влияния наледи на нем. Фотография исследуемой в тот момент наледи приведена на рис. 7(а) и трассовая запись значения  $T_{\text{я}}$  на длине волны 2,3 см на вертикальной поляризации показана на рис. 7(б).

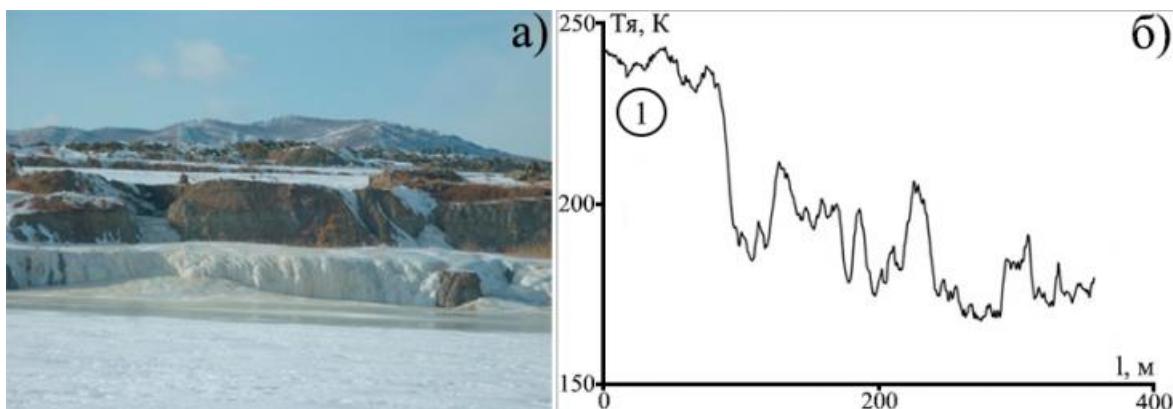


Рисунок 7 – а) Фото наледи на техногенном водоеме в г. Балее, б) Трассовая запись  $T_{\text{я}}$  ледяного покрова. Цифрой 1 обозначен участок ледяного покрова с наледью толщиной 10 см. Март 2014 год.

При расчетах по слоистой неизотермической среды были получены следующие результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Расчеты значений радиояркостной температуры (в Кельвинах) в зависимости от слоя структуры на горизонтальной (ГП) и вертикальной (ВП) поляризациях

Структура	2 см		5 см		10 см		20 см	
	ГП	ВП	ГП	ВП	ГП	ВП	ГП	ВП
Воздух / грунт (1 м)	197,9	249,9	187,7	244,2	184,1	242	183	241,3
Воздух / лед (5 см) / грунт (1 м)	221,7	258,5	228,5	260,2	236,2	261,3	199	247,9
Воздух / лед (10 см) / грунт (1 м)	222,6	258,3	235,4	261,5	223,2	257,8	238,7	262
Воздух / лед (50 см) / грунт (1 м)	221,9	256,9	221,7	257,5	220,2	256,4	211,3	253,1
Воздух / лед (100 см) / вода (10 см)	162,8	193,2	136,7	164	130,7	157,5	128,5	155

Воздух / лед (5 см) / лед (100 см) / вода (10 см)	189	220,9	147,2	175,1	136,4	163,2	130,8	157,5
Воздух / лед (10 см) / лед (100 см) / вода (10 см)	203,5	236,6	156,7	185	141,5	168,6	133,6	160,2
Воздух / лед (50 см) / лед (100 см) / вода (10 см)	221,7	256,7	199,1	231,3	173,4	202,5	151,3	178,5

Как правило, образование наледей происходит при довольно низких температурах нижнего слоя атмосферы. В связи, с чем водная поверхность может быть достаточно сильно переохлаждена. При фазовом превращении переохлажденной воды в лед при температуре воды  $-23^{\circ}\text{C}$  может образоваться не широко распространенный в земных условиях лед I<sub>h</sub>, а лед 0, который ранее был открыт при компьютерном моделировании [28] и экспериментально найден при микроволновых измерениях [29]. Данная модификация льда, представляет из себя сегнетоэлектрик, следовательно, лед 0 обладает особыми физико-химическими свойствами отличительными от льда I<sub>h</sub>. Так тонкий слой сегнетоэлектрического льда на диэлектрике, которым является лед I<sub>h</sub>, приведет к образованию среды обладающими проводящими свойствами, схожими с металлической поверхностью [30]. По этой причине при дистанционном исследовании свежеобразованного верхнего слоя наледи при достаточно низких температурах следует учитывать тот факт, что в данной среде может образовываться и сегнетоэлектрическая фаза льда.

Также следует учитывать внутреннюю структуру наледи. Как показано в работе [31], в миллиметровом диапазоне на тепловое излучение влияет рассеяние на внутренних неоднородностях среды, которое, по мнению авторов [31], возникает на кристаллогидратах солей и может быть вызвано повышенной электропроводностью тонких пленок воды на поверхностях этих кристаллов.

## Выводы

Таким образом, экспериментальное и теоретическое исследование теплового излучения наледи, как на грунтах, так и на ледяном покрове позволяют сделать следующие выводы.

1 . В результате натурных, лабораторных и теоретических изысканиях показана возможность регистрации наледных образований по радиотепловому излучению данных объектов в микроволновом диапазоне, что можно использовать для их регистрации с использованием низколетящих летательных аппаратов с установленной на них микроволновой радиометрической аппаратурой.

2. В случае существования слоя воды на наледях радиояркостная температура, которая характеризует мощность собственного радиотеплового излучения среды, будет существенно ниже, чем объект, на поверхности которого отсутствует водная масса. Следует отметить, что снежный покров над исследуемым объектом, не вносит существенного вклада в значение радиояркостной температуры в сантиметровом и дециметровом диапазонах.

3 . По значению радиояркостной температуры в микроволновом диапазоне для нескольких диапазонов можно косвенно судить о мощности наледного образования, т.е.

оценивать толщину наледи. При этом необходимо учитывать вариации радиояркостной температуры среды в зависимости от ее толщины из-за интерференции радиотеплового излучения плоскослоистой среды.

4 . Следует учитывать внешнюю температуру, при которой происходит образование наледи. При температурах ниже  $-23^{\circ}\text{C}$ , из переохлажденной воды может образоваться сегнетоэлектрический лед 0, новая модификация кристаллического льда отличительная от широкораспространенного льда Ih.

5 . Комплексное использование дистанционных методов зондирования наледных образований в широком интервале частот, которые включают в себя видимый, инфракрасный и микроволновый диапазоны расширяют возможность мониторинга таких сред.

## **Библиография**

1. Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980-2021 гг. Часть 1. Температура воздуха, осадки, ветер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 3. С. 258-277. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277.
2. Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980-2021 гг. Часть 2. Температура почвы, снег, влажность // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 4. С. 352-369. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369.
3. Шерстюков А.Б. Многолетняя мерзлота России в условиях глобального потепления климата // Эволюция и динамика экосистем. 2007. № 4. С. 8-11.
4. Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15 (4). С. 15-18.
5. Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. Chapter 4 // Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. Р. 337-383.
6. Порфириев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89 (12). С. 1228-1239.
7. Носкова Е.В., Вахнина И.Л. Анализ современных пространственно-временных изменений температуры воздуха в Забайкальском крае // Географический вестник. 2023. № 1 (64). С. 116-126. DOI: 10.17072/2079-7877-2023-1-116-126.
8. Балыбина А.С., Трофимова И.Е. Динамика температуры почвы на территории Забайкалья в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 109-116.
9. Смахтин В. К. Оценка изменений температуры воздуха и осадков на территории Забайкалья // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 138-146. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-138-146.
10. Звягинцева В.В., Звягинцев О.Ю. Динамика образования наледи в условиях восточного Забайкалья: исследование с использованием данных дистанционного

- зондирования Земли // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28. № 7. С. 17-25. DOI: 10.21209/2227924520222871725.
11. Иванова М. А., Звягинцев В. В. Наледные явления Забайкальского края (современное состояние, прогноз) // Техносферная безопасность Байкальского региона: сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Чита: ЗабГУ, 2019. С. 159–166.
  12. Шестернев Д. М., Верхотуров А. Г. Воздействие наледей на инженерные сооружения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 22, № 10. С. 30–40. DOI: 10.21209/2227-9245-2016-22-10-30-40.
  13. Алексеев В.Р. Ландшафтная индикация наледных явлений. Новосибирск: Наука, 2005. 364 с.
  14. Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. М.: Наука. 1999. 255 с.
  15. Железняк И.И., Цыренжапов С.В., Гурулев А.А. Исследование пластового льда, минеральных образований и воздуха многолетнемерзлой карстовой пещеры Хээтэй в Забайкалье // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26. № 7. С. 33-43. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-33-43.
  16. Лукьянов П.Ю., Железняк И.И., Гурулев А.А. Устройство для послойного измерения физических свойств ледяного массива в условиях его естественного залегания // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 6. С. 90-93. DOI: 10.7868/S0032816217060076.
  17. Алексеев В.Р. Наледи. Новосибирск: Наука, 1987. 159 с.
  18. Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В. Картографирование наледей в трансграничном бассейне р. Чикой // Географический вестник. 2022. № 3 (62). С. 169-179. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179.
  19. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data // Remote Sens. Environ. 1995. Vol. 54. P. 127–140. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P.
  20. Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Семакина А.В. Каталог и атлас гигантских наледей-тарынов северо-востока России // В сборнике: Четвертые Виноградовские чтения. гидрология от познания к мировоззрению. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2020. С. 1037-1042.
  21. 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.
  22. Гурулев А.А., Крылов С.Д. Использование радиотеплового излучения для контроля загрязнения дельты реки Селенги // География и природные ресурсы. 2004. № 1. С. 72-75.
  23. Клепиков И.Н., Шарков Е.А. Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных неизотермических сред//Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3-15.
  24. Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю., Синицкий А.И. Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период ледостава // Исследование Земли из космоса. 2020. № 3. С. 59-76. DOI: 10.31857/S0205961420030070.

25. Никитин О.Р., Садовский И.Н., Ковалёв М.В. СВЧ-радиометрия водной поверхности // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2008. № 10. С. 106-112.
26. 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.
27. Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Влияние наледей на радиотепловое излучение пресных ледяных покровов // Естественные и технические науки. 2018. № 8 (122). С. 109-111.
28. Quigley D., Alfè D., Slater B. On the stability of ice 0, ice I, and Ih // Journ. of Chemical Physics. 2014. V. 141. P. 161102.
29. Бордонский Г.С., Орлов А.О. Признаки возникновения льда "0" в увлажнённых нанопористых средах при электромагнитных измерениях // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 105. № 8. С. 483-488.
30. Korobeynikov S.M., Royak M.E., Melekhou A.V., Agoris D.P., Pyrgioti E., Soloveitchik Yu.G. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38. No. 6. P. 915-921. DOI: 10.1088/0022-3727/38/6/021.
31. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Изучение фактора потерь льда наледи из пресной воды в миллиметровом диапазоне // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23. № 3. С. 532-541. DOI: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-532-541.

## **Результаты процедуры рецензирования статьи**

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предмет исследования являются, по мнению автора, особенности радиотеплового изучения наледных образований на грунтах и на ледяных покровах рек и озер в микроволновом диапазоне.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов дистанционного обнаружения наледных образований космический мониторинг поверхности земной поверхности. Для этих целей используется радиометрический приемник, принимающий собственное тепловое излучение в инфракрасном (ИК) диапазоне, а также анализ литературных данных. Для определения радиояркостной температуры наледных образований использовались радиометрические приемники на частоту 13 ГГц и 34 ГГц с чувствительностью 0,1 К и 0,2 К соответственно при постоянной времени 1 с. Автором предпринятой экспедиционные полевые методы исследования, взятие керна льда из наледного образования, эксперименты в исследования природной наледи на поверхности ледяного покрова в зимнее время с последующих камеральной обработкой.

Актуальность затронутой темы мониторинге безусловна и состоит в получении информации о наледных явлений в Субарктическом и Арктическом регионах при ежегодном увеличении осадков является актуальной задачей и имеет большое практическое значение. Расчетные значения по слоистой неизотермической модели с плоскими границами наледи показали хорошее соответствие с полученными экспериментальными данными. Исследования автора статьи помогают понять механизм реакции на изменение погодно-климатических условий для теории криолитогенеза.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделает вывод о результатах натурных, лабораторных и теоретических изысканиях возможности регистрации наледных образований по радиотепловому излучению данных объектов в микроволновом диапазоне, которую можно использовать для их регистрации с использованием низколетящих летательных аппаратов с установленной на них микроволновой радиометрической аппаратуры. Это является важным дополнением в развитии геокриологии.

Стиль, структура, содержание стиля изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс образования льда в почве. Комплексное использование дистанционных методов зондирования наледных образований в широком интервале частот, которые включают в себя видимый, инфракрасный и микроволновый диапазоны расширяют возможность мониторинга таких сред. В лабораторных условиях рассмотрены процессы изучения, что делает представленные автором статьи результаты весьма интересными.

Однако есть ряд вопросов, в частности:

Автору статьи следовало бы приводя данные о росте температуры за последние 10 лет в течение года, а также в зимний и летний период, желательно было бы предоставить информацию о статистическом анализе отклонений от среднего значения, значение погрешности, значение корреляции.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.