

Тепловые деформации и радиояркостная температура ледяного покрова пресных водоёмов

© 2020 г. С.В. Цыренжапов*, А.А. Гурулев

Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Чита, Россия

*lgc255@mail.ru

Thermal deformations and brightness temperature of the ice cover of freshwater bodies

S.V. Tsyrenzhapov*, A.A. Gurulev

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Chita, Russia

*lgc255@mail.ru

Received August 27, 2019 / Revised February 12, 2020 / Accepted June 7, 2020

Keywords: *deformation, dry cracks, ice cover, microwave remote sensing.*

Summary

The paper presents results of experimental studies of the deformation of a freshwater ice cover. The works were carried out on the Lake Arakhley located in the Trans-Baikal Region, where winters are characterized by small amount of snow and sharp daily changes in the air temperature reaching 25 °C. As a result of this, the temperature gradient of the surface layer of the ice cover exceeds 1 °C/cm. This causes formation of the dry cracks in the upper layers of the cover. The authors measured daily variations in the temperature of the ice cover at various depths by its thickness. Results of the experiment made possible to propose the explanation for the formation of dry cracks and the depth of them, which reaches 20 cm in the Trans-Baikal Region. According to studies using a differential strain gauge, it was found that the upper layer of the ice cover is in a stressed state due to changes in its temperature. This is evident from the fact that when the temperature of the upper layer of ice changes, the distance between the reference points slightly changes too. When the air temperature approaches the temperature of the «ice–water» phase transition, the ice cover is unloaded. We assume that the dry cracks can also be formed when the stress state of ice is released at even lower temperatures. Interest in these structural changes had been arisen in connection with possible variations in the electromagnetic properties of the ice cover, which can be detected by non-contact radio wave measurements. These variations result from the presence of a quasi-liquid layer on the surfaces of dry cracks (together with hoar-frost and snow in them), which can exist down to a temperature of –90 °C. Its presence increases the complex relative permittivity of a medium consisting of a solid (ice) and a liquid phase (water film). Calculations of the radiometric temperature within the centimeter range in a flat-layer non-isothermal medium have shown that the presence of dry cracks in the ice cover increases radio temperature up to 5 K on both, vertical and horizontal polarizations. This value is recorded during radiometric measurements, and this factor should be taken into account during the remote sensing of freshwater ice covers.

Citation: Tsyrenzhapov S.V., Gurulev A.A. Thermal deformations and brightness temperature of the ice cover of freshwater bodies. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (3): 445–452. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420030051.

Поступила 27 августа 2019 г. / После доработки 12 февраля 2020 г. / Принята к печати 7 июня 2020 г.

Ключевые слова: *деформация, ледяной покров, микроволновое дистанционное зондирование, сухие трещины.*

Проведены экспериментальные исследования сухих трещин, вызванных вариациями температуры верхних слоёв в пресном ледяном покрове озера Арахлей (Забайкальский край). С использованием дифференциального датчика деформации установлено, что верхний слой ледяного покрова из-за изменения его температуры находится в напряжённом состоянии. При достижении предела текучести происходит быстрая разгрузка напряжений с образованием сухих трещин. Расчёты радиояркостной температуры в сантиметровом диапазоне с использованием плоскостной неизоотермической среды показали увеличение этой температуры до 5 К при наличии сухих трещин в ледяном покрове.

Введение

Ледяной покров пресных водоёмов имеет широко разветвлённую сеть трещин, которые образуются в силу разных причин. Например, в работе [1] формирование станковых трещин на Байкале связывают с ослаблением льда на определённых участках из-за направленного роста кристаллов под

влиянием подлёдных течений, возникающих под воздействием сейшевых колебаний. Станковые трещины — это сквозные разрывы в ледяном покрове, однако существуют и сухие разрывы во льду, обусловленные термическими и динамическими нагрузками на него [2, 3]. В ледяном покрове трещины, по мнению авторов работы [3], чаще всего возникают параллельно базисным плоскостям или

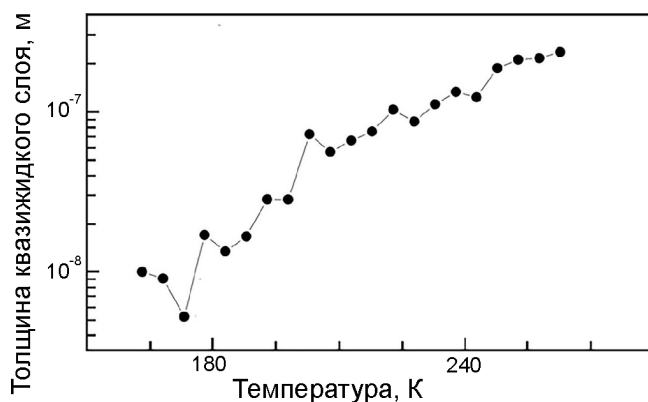


Рис. 1. Температурные зависимости толщины квазижидкого слоя на поверхности гранул льда [5]

Fig. 1. Temperature dependences of the thickness of a quasi-liquid layer on the surface of ice granules [5]

перпендикулярно им, что хорошо видно на ледяном покрове пресных водоёмов. В результате этого изменяются его физические свойства. Так, наличие сухих трещин на 15% уменьшает допустимые нагрузки на лёд при проезде по нему транспортных средств (в случае прочного кристалльно-прозрачного льда без включений) [4]. Кроме механических свойств, изменяются и электромагнитные свойства льда, содержащего сухие трещины, что может привести к ошибочной интерпретации радиолокационных данных, получаемых с различных летательных аппаратов или при наземных измерениях.

Это связано с существованием на поверхности льда квазижидкого слоя, который может существенно изменять диэлектрические свойства ледяного покрова, особенно при большой удельной поверхности инея или снега в трещинах.

На рис. 1 приведена зависимость толщины квазижидкого слоя d на ледяной поверхности в зависимости от температуры T [5]. При таких толщинах свойства переохлаждённой воды близки к свойствам объёмной воды [6, 7], не являются исключением и её диэлектрические свойства [8, 9]. Отметим, что квазижидкий слой сохраняется до низких температур (около 90 К). В случае больших удельных поверхностей трещин в единице объёма льда (и, следовательно, большого объёма квазижидких слоёв) изменяются значения действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей относительной диэлектрической проницаемости среды ϵ . Так как ϵ'' жидкой воды на четыре порядка больше этой величины для льда, радиофизические свойства ледяного покрова существенно изменятся, если относительный объём квазижидких слоёв достигнет значений $10^{-6} \div 10^{-5}$. Так, на частоте 9,7 ГГц при температуре льда и воды -5°C ϵ' и ϵ'' при увеличении объёмной концентрации воды будут также расти (рис. 2).

Расчёт выполнялся по рефракционной модели, приведённой в работе [10]: $\epsilon^{0,5} = \rho_1 \epsilon_1^{0,5} + (1 - \rho_1) \epsilon_2^{0,5}$, где ρ_1 — относительная объёмная концентрация воды; ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость воды;

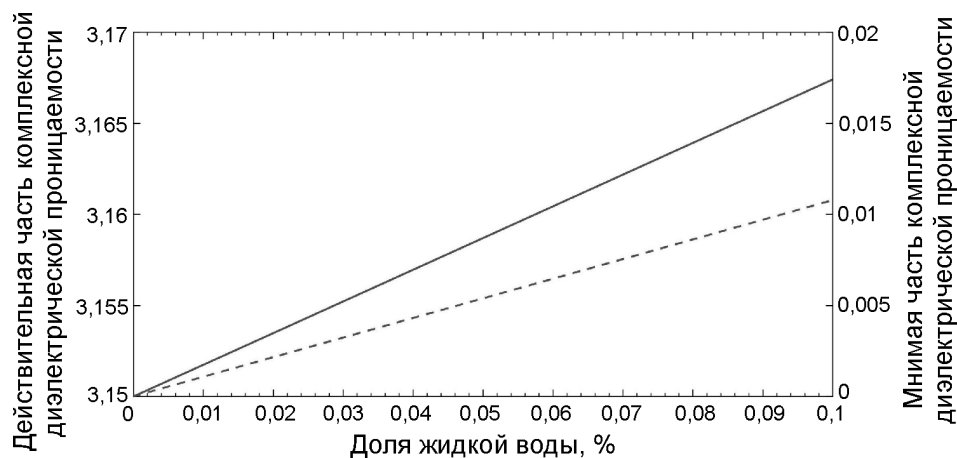


Рис. 2. Зависимость мнимой (пунктирная линия) и действительной (сплошная линия) частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости двухкомпонентной среды (вода—лёд) в зависимости от объёмной концентрации воды на частоте 9,7 ГГц.

Температура среды равна -5°C

Fig. 2. Dependence of the imaginary and real parts of the relative complex permittivity of a two-component medium (water—ice) depending on the volumetric concentration of water at a frequency of 9.7 GHz.

The temperature is -5°C

ε_2 — диэлектрическая проницаемость льда. Значение мнимой и действительной частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости для переохлаждённой воды определялось из работы [8], а для льда — из работы [11]. Сами сухие трещины не дают заметного значения объёмной концентрации воды во льду, однако они обычно заполняются снегом и инеем, которые увеличивают площадь поверхности; кроме того, они могут быть влажными, что существенно увеличит значения ε' и ε'' среды [12].

Таким образом, исследование сухих трещин и их свойств, связанных с наличием квазижидкого слоя, — актуальная задача для дистанционного зондирования и решения других прикладных задач. Нами выполнены измерения температурных деформаций ледяного покрова пресного озера в весенний период и распределения температуры по глубине покрова, а также сделаны оценки приращений радиояркостной температуры в сантиметровом диапазоне для радиометрических измерений.

Методика измерений

Для изучения температурных деформаций ледяного покрова пресного озера Арахлей, расположенного в Забайкальском крае, в нём на различных глубинах были установлены терморезисторы. На поверхности ледяного покрова размещался датчик деформации. Оз. Арахлей длиной и шириной около 10 км и с исходной минерализацией воды около 160 мг/л [13] в зимний период покрывается ледяным покровом толщиной до 150 см [14] с минерализацией 1 мг/кг. Снежный покров на поверхности ледяного покрова в редких случаях достигает 20 см. Есть площади, полностью свободные от снега, что связано с особыми климатическими условиями Забайкальского края.

Терморезисторы помещались в ледяной покров с шагом 5 см по глубине путём естественного вмораживания. Показания сопротивлений с датчиков температуры записывали с помощью системы сбора данных фирмы «Agilent» в режиме реального времени. Перед установкой термодатчиков выполнена их калибровка в термокамере «Espec SU-261», которая позволила откалибровать датчики с точностью до 0,1 °C в широком интервале температур.

Существуют как контактные, так и бесконтактные методы [15] измерения характеристик

ледяного покрова, которые позволяют определять его механические параметры. Как правило, такие наблюдения — точечные, но для увеличения эффективности применяют распределённые волоконно-оптические датчики, имеющие хороший механический контакт со льдом. По локальным деформациям кабеля с помощью когерентного рефлектометра можно фиксировать любые его подвижки, даже незначительные [16, 17]. К распространённым контактными методами, регистрирующим деформации ледяного покрова, относятся резистивные, индуктивные и резонансные, использующие соответствующие виды преобразователей [15].

В настоящем исследовании использован индуктивный преобразователь, а именно: радиочастотный дифференциальный измеритель деформации [18]. Принцип работы такого измерителя основан на применении дифференциальной схемы измерения высокочастотного напряжения при перемещении ферритового сердечника в катушке индуктивности относительно её центральной части, что позволяет получать высокую стабильность измерителя, а также высокую его чувствительность (около 1 мкм). Датчик устанавливался на ледяном покрове оз. Арахлей в 200 м от берега.

Фотография датчика приведена на рис. 3. Длина стержня — 70 см. Опорные точки, между которыми выполняли измерения, жёстко фиксировали в ледяном покрове на диэлектрических стержнях с целью исключения их сдвига при подтаивании под действием солнечной радиации. Измерения выполняли в весенний период перед началом деструкции ледяного покрова, когда в связи со значительным перепадом ночных и дневных температур вблизи температуры фазового перехода лёд–вода происходят заметные деформации ледяного покрова, в том числе и его пластическое течение.

Полученные результаты и их обсуждение

Визуально в ледяном покрове в весенний период (март) присутствует обильная сеть сухих трещин (см. рис. 3), образование которых связано с большим перепадом дневных и ночных температур. В Забайкалье такие перепады могут достигать 25 °C [19]. Как установлено из визуальных наблюдений, глубина сухих трещин обычно не превышает 20 см. Это связано с тем, что значительные



Рис. 3. Фотография датчика деформации, установленного на ледяном покрове оз. Арахлей

Fig. 3. Photo of a strain gauge installed on the ice cover of Lake Arakhley

вариации температуры во льду в течение суток как раз прослеживаются именно до таких глубин. На рис. 4 приведены полученные в середине марта на протяжении нескольких дней экспериментальные результаты по измерениям температуры в толще ледяного покрова на глубинах 1, 5, 10 и 15 см. Как видно из приведённых графиков, суточные вариации температуры внутри ледяного покрова на глубине 15 см незначительны и приблизительно составляют 1°C . По этой причине глубина сухих трещин в ледяном покрове и не превышает 20 см.

Согласно формуле для линейного расширения твёрдого тела $\Delta L = \alpha L \Delta T$ (ΔL — линейное увеличение размеров тела длиной L , α — коэффициент линейного теплового расширения льда, ΔT — изменение температуры тела), лёд под действием циклических изменений температур претерпевает сильные деформации. Для льда α зависит от температуры, и при температурах $0 \div -20^{\circ}\text{C}$ его значение составляет около $50 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ [20]. Из формулы для ΔL можно получить изменение линейного размера поверхности льда при его нагревании или охлаждении. Так, при изменении температуры льда на 10°C при размере ледяного поля 1 м его линейный размер увеличится при нагревании или уменьшится при охлаждении на 0,5 мм. Этот эффект и приводит к появлению сухих трещин в ледяном покрове.

На водоёмах, где суточные вариации температуры верхнего слоя льда не так велики, как в Забайкалье, сухих трещин в ледяном покрове практически

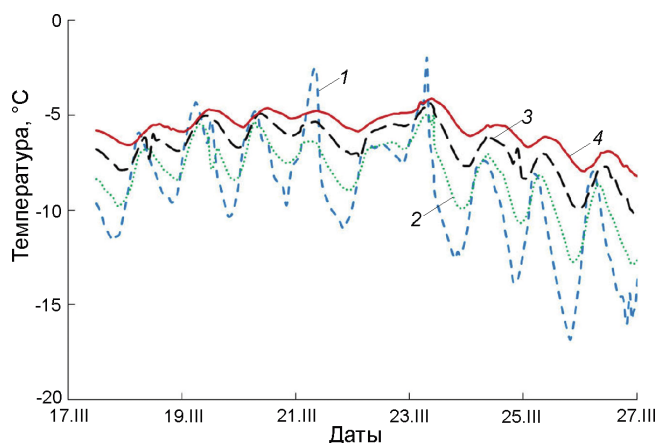


Рис. 4. Временной ход температуры внутри ледяного покрова на глубинах, см:

1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15

Fig. 4. Temporal course of temperature inside the ice cover at depths, cm:

1 — 1; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15

нет. На оз. Байкал при средней ширине водоёма порядка 50 км одноактное суточное расширение ледяного покрова в весенний период может достигать 45,5 м [21]. У берега ледяной покров припаян ко дну, что ограничивает возможность его смещения относительно береговой линии, поэтому при падении температуры ночью (сжатии ледяного покрова), а также повышении температуры днём (его расширении) во льду возникают сильные напряжения. Такие систематические изменения приводят к деформации ледяного покрова и образованию трещин в нём, в том числе и сухих.

Данные о величине деформации верхнего слоя ледяного покрова в течение полутора суток в ледяном покрове приведены на рис. 5. При изменении температуры воздуха в течение суток экстремумы деформации растяжения—сжатия ледяного покрова на исследуемом участке льда наблюдаются в ранние утренние и поздние дневные часы. Отметим, что при приближении температуры воздуха к температуре фазового перехода лёд—вода лёд начинает расширяться, при этом наблюдаются флуктуации этих подвижек, достигающие 5 мкм на длине 70 см. При понижении температуры лёд начинает сжиматься, при этом изменение расстояния между опорными точками достигало 40 мкм. Конкретные измерения ещё раз подтверждают, что в природном ледяном покрове практически всегда существуют механические напряжения, которые возникают в результате нагревания и охлаждения

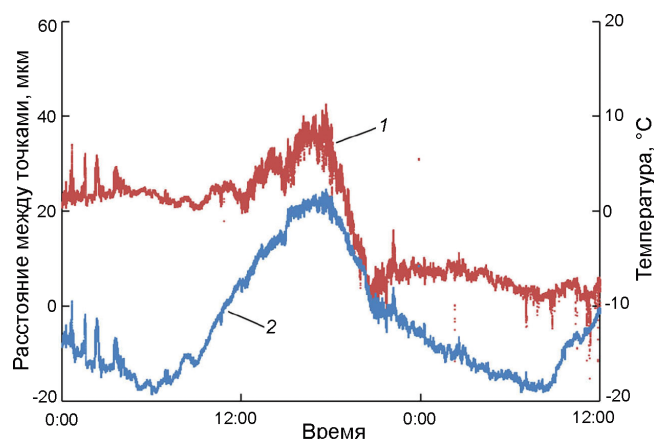


Рис. 5. Деформация ледяного покрова на оз. Арахлей 27 и 28 февраля 2019 г.:

1 – изменение расстояния между двумя точками, расстояние между которыми 70 см; 2 – температура воздуха на высоте 5 см от ледяного покрова

Fig. 5. Deformation of the ice cover on the lake Arakhley. February 27 and 28, 2019:

1 – change in the distance between two points, the distance between which is 70 cm; 2 – air temperature at a height of 5 cm from the ice cover

верхних слоёв ледяного покрова. Лёд, находясь в таком состоянии, изменяет не только механические, но и свои диэлектрические характеристики [22, 23]. При достижении предела текучести льда электромагнитные потери во льду в микроволновом диапазоне кратковременно уменьшаются [22]. Этот факт можно использовать при радиозондировании ледяных тел.

Один из способов радиозондирования ледяных покровов – пассивный метод радиометрии, при котором определяется мощность собственного радиотеплового излучения объекта. Этот метод имеет ряд преимуществ, в частности, он относится к всепогодному, поэтому нет необходимости использовать естественную (солнечный свет) или искусственную подсветку поверхности объекта. Излучение формируется в достаточно глубоком поверхностном слое, что позволяет устанавливать ряд характеристик исследуемой среды. Яркий пример использования микроволновой радиометрии – мониторинг ледяных покровов арктических морей [24], позволяющий определять градации ледяного покрова, его границы, наличие снежиц и т.п.

Физическая величина, характеризующая мощность собственного радиотеплового излучения среды, – радиояркость температуры $T_{\text{я}}$, значение которой зависит от ряда факторов, а именно: тер-

модинамической температуры объекта, угла наблюдения, диэлектрических свойств среды и т.д. Появляющиеся сухие трещины и попадающие в них иней и снег приводят к росту концентрации переохлаждённой воды в верхнем слое ледяного покрова. Эта особенность существенно увеличит мнимую часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда (см. рис. 2), что приведёт к росту значения его радиояростной температуры.

В целом поверхность ледяного покрова пресных озёр представляет собой достаточно плоский слой, вариации по высоте которого не превышают 5 мм. Хотя существуют и достаточно шероховатые участки поверхности льда, как на рис. 3, но они, как правило, не превышают 5–10% общей площади водного объекта. Эти свойства ледяного покрова можно использовать при расчёте его радиотеплового излучения, так как они не влияют на значение радиояростной температуры, характеризующей мощность собственного радиотеплового излучения в сантиметровом диапазоне, но их влияние существенно в миллиметровом диапазоне.

Авторами были выполнены расчёты $T_{\text{я}}$ как на вертикальной (ВП), так и на горизонтальной (ГП) поляризациях для четырёхслойной плоскостойкой среды, состоящей из: а) воздушной среды; б) слоя увлажнённого льда толщиной 20 см с температурой -5°C , в котором имеются сухие трещины, набитые снегом; в) слоя сухого льда при температуре -5°C толщиной 80 см; г) полубесконечного слоя воды при температуре 1°C . Расчёты выполнены для длины волны 3 см (в свободном пространстве) и угле наблюдения 45° . Радиояростная температура рассчитывалась для неизотермической плоскостойкой среды, в которой учитываются отражающие и поглощающие свойства каждого слоя [25]. Данная методика расчёта заключается в том, что рассчитывается собственное микроволновое излучение, в котором излучающей системой служит водная поверхность, покрытая несколькими слоями ледяного покрова, над которыми расположен толстый слой атмосферы. В результате расчётов определена зависимость $T_{\text{я}}$ от доли жидкой воды в тонком (20 см) слое льда, находящемся на сухом ледяном покрове пресного водного объекта (рис. 6). Установлено, что при объёмной доли жидкой воды 0,1% приращение радиояростной температуры составляет 30 К на вертикальной и горизонтальной поляриза-

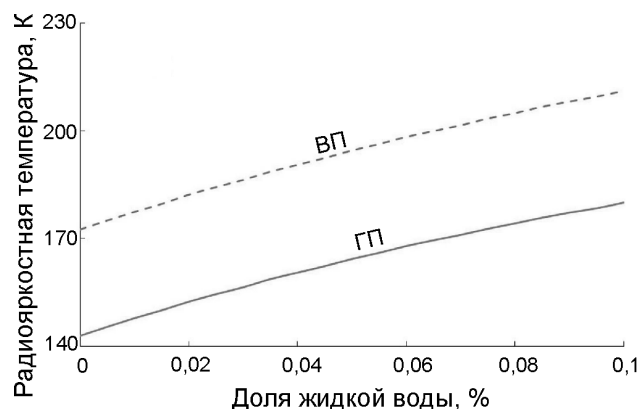


Рис. 6. Зависимость радиояркостной температуры ледяного покрова толщиной 1 м от доли жидкой воды в верхнем 20-сантиметровом слое на вертикальной (ВП) и горизонтальной (ГП) поляризациях.

Угол наблюдения — 45°, температура льда — 5 °С, частота излучения 10 ГГц

Fig. 6. Dependence of the radio brightness temperature of the ice sheet, one meter thick, on the fraction of liquid water in the upper 20 cm layer on the vertical (ВП) and horizontal (ГП) polarizations.

Viewing angle 45°, ice temperature — 5 °С, frequency of received radiation 10 GHz

циях. Отметим, что при увеличении длины волны приращение значения T_y будет больше, а при её уменьшении — меньше.

В природных ледяных покровах доля жидкой воды за счёт сухих трещин, заполненных снегом, мала и её значение не превышает, по предварительным оценкам согласно исследованиям [5, 26], 0,01%. Однако, когда ширина таких трещин достигает нескольких сантиметров и они полностью заполнены снегом, количество влаги в такой среде будет близко к 0,1%. Другой пример такого случая — торосы, часто наблюдаемые на ледяном покрове, где удельная площадь поверхности (снега, инея) с квазижидким слоем также имеет высокое значение, в результате чего доля воды в единице объёма среды существенно выше, чем у ненарушенного плоскостной ледяного покрова. При натурных трассовых измерениях радиояркостной температуры пресных ледяных покровов в сантиметровом диапазоне в случае торосов наблюдавшееся значение радиояркостной температуры превышает фоновое значение на несколько десятков градусов Кельвина [27]. Эта величина соответствует приблизительно 0,1% жидкости в ледяном покрове. В случае сухих трещин приращение будет достигать нескольких градусов, что вполне может

быть зарегистрировано современными радиометрическими устройствами, например, при построении радиоизображений.

Что касается радиолокационных изображений, то трещины хорошо видны с космических аппаратов, на которых установлена радиолокационная аппаратура. Структура трещин, ледяных плит и блоков отчётливо прослеживается на радарных изображениях, что показано в исследовании [28]. Кроме того, по радиолокационным снимкам, с помощью которых устанавливают трещины в ледяном покрове, можно определять и подвижки ледяных блоков. Однако работ по радиолокационному определению сухих трещин и способу классификации трещин в научной литературе нет.

Выводы

1. При изменении суточной температуры верхних слоёв ледяного покрова и достижении градиента температуры ~70 °С/м в нём возникают механические напряжения, сброс которых наблюдается при образовании сухих трещин, особенно в случае приближения к температуре фазового перехода лёд—вода.

2. В момент сброса напряжённого состояния льда расстояние между опорными точками в ледяном покрове испытывает локальные флуктуации, значение которых достигает десятков микрометров на один метр. Такой эффект наблюдался в марте в береговой зоне оз. Арахлей в 200 м от берега. Для других водоёмов и времени года требуются дополнительные исследования.

3. В результате расчётов радиояркостной температуры пресного ледяного покрова на водной поверхности по слоистой неизотермической структуре (плоскостной четырехслойная среда) было установлено влияние сухих трещин на приращение радиояркостной температуры. При наличии поверхностных плёнок воды на ледяных структурах (снег, забитый в сухие трещины) радиояркостная температура увеличивается как на вертикальной, так и на горизонтальной поляризации. Для природных объектов при концентрации доли жидкой воды 0,01% приращение достигает 5 К на обеих поляризациях. Этот эффект можно зафиксировать при радиометрических измерениях, и его необходимо учитывать при радиометрических исследованиях ледяных покровов пресных водоёмов в конце

периода ледостава, когда удельный объём сухих трещин в ледяном покрове максимален. По радиометрическим измерениям можно определять минерализацию ледяного покрова, его толщину, а наличие сухих трещин внесёт погрешность в измерения этих величин.

4. В ледяном покрове пресных водоёмов Забайкальского края наблюдается обширная сеть сухих

трещин глубиной до 20 см, возникающих в мало-снежные зимы в резко континентальном климате, когда суточные вариации температуры достигают 25 °С. Радиофизические характеристики льда с сухими трещинами требуют специальных исследований, когда необходимо определять удельную площадь поверхности полостей, заполняющих их частиц и объём квазижидких слоёв.

Литература

References

1. *Бордонский Г.С.* Причины возникновения стальных трещин в ледяных покровах озёр // География и прир. ресурсы. 2007. № 2. С. 69–76.
2. *Гляциологический словарь* / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
3. *Войтковский К.Ф.* Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 255 с.
4. Методические рекомендации работ по оценке грузоподъёмности ледовых переправ. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2017. 42 с.
5. *Копосов Г.Д., Тягунин А.В.* Калориметрические исследования квазижидкого слоя на поверхности гранул льда // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94. Вып. 5. С. 406–409.
6. *Castrillon S.R.-V., Giovambattista N., Arsay I.A., Debenedetti P.G.* Structure and Energetics of Thin Film Water // Journ. of Physical Chemistry. C. 2011. V. 115. P. 4624–4635. doi: 10.1021/jp1083967.
7. *Solveyra E.G., Llave E., Scherlis D.A., Molinero V.* Melting and crystallization of ice in partially filled nanopores // Journ. of Physical Chemistry. B. 2011. V. 115. P. 14196–14204. doi: 10.1021/jp205008w.
8. *Бордонский Г.С., Орлов А.О., Хапин Ю.Б.* Коэффициент затухания и диэлектрическая проницаемость переохлажденной объемной воды в интервале температур 0...–90 °С на частотах 11...140 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 255–270. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-255-270.
9. *Цыренжапов С.В., Гурулев А.А., Орлов А.О.* Измерение содержания незамерзшей воды в пеностекле при отрицательных температурах // Изв. Уральского гос. горного ун-та. 2018. № 3 (51). С. 83–88. doi: 10.21440/2307-2091-2018-3-83-88.
10. *Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
11. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
12. *Котляков В.М., Мачерет Ю.Я., Сосновский А.В., Глазовский А.Ф.* Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56.
13. *Веселков Г.О., Чечель Л.П.* Изменение параметров химического состава в водной толще озера Арахлей (Восточное Забайкалье) // Аспирант. Приложение к журналу Вестн. Забайкальского гос. ун-та. 2018. Т. 12. № 2. С. 29–35. doi: 10.21209/2074-9155-2018-12-2-29-35.
1. *Bordonsky G.S.* The causes of permanent cracks in ice covers of lakes. *Geografiya i prirodnyye resursy*. Geography and Natural Resources. 2007, 2: 69–76. [In Russian].
2. *Glyatsiologicheskiy slovar*. Glaciological Dictionary / Ed. V.M. Kotlyakov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
3. *Voitkovskiy K.F. Osnovy glyatsiologii*. Principles of glaciology. Moscow: Nauka, 1999: 255 p. [In Russian].
4. *Metodicheskie rekomendatsii rabot po otsenke gruzopod'emnosti ledovykh pereprav*. Guidelines for assessing the carrying capacity of ice crossings. Moscow: Federal Highway Agency (Rosavtodor), 2017: 42 p. [In Russian].
5. *Koposov G.D., Tyagunin A.V.* Calorimetric studies of a quasi-liquid layer on the surfaces of ice granules. Journ. of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2011, 94 (5): 374–377. doi: 10.1134/S0021364011170073.
6. *Castrillon S.R.-V., Giovambattista N., Arsay I.A., Debenedetti P.G.* Structure and Energetics of Thin Film Water. Journ. of Physical Chemistry. C. 2011, 115: 4624–4635. doi: org/10.1021/jp1083967.
7. *Solveyra E.G., Llave E., Scherlis D.A., Molinero V.* Melting and crystallization of ice in partially filled nanopores. Journ. of Physical Chemistry. B. 2011, 115: 14196–14204. doi: 10.1021/jp205008w.
8. *Bordonskiy G.S., Orlov A.O., Khapin Yu.B.* Attenuation coefficient and dielectric permittivity of supercooled volume water in the temperature range 0...–90 °C at frequencies 11...140 GHz. *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2017, 14 (3): 255–270. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-255-270. [In Russian].
9. *Tsyrenzhapov S.V., Gurulev A.A., Orlov A.O.* Measurement of the content of unfrozen water in cellular glass at low temperatures. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. Bulletin of the Ural State Mining University. 2018, 3 (51): 83–88. [In Russian].
10. *Shutko A.M. SVCh-radiometriya vodnoy poverkhnosti i pochvogrunтов*. Microwave radiometry of the water surface and soil. Moscow: Science, 1986: 190 p. [In Russian].
11. *Macheret Yu. Ya. Radiozondirovaniye lednikov*. Radio sounding of glaciers. Moscow: Scientific world, 2006: 392 p. [In Russian].
12. *Kotlyakov V.M., Macheret Yu. Ya., Sosnovsky A.V., Glazovsky A.F.* Speed of radio wave propagation in dry and wet snow. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56. [In Russian].
13. *Veselkov G.O., Chechel L.P.* Changing parameters of chemical composition in the water column of the lake Arakhley (Eastern Transbaikalia). *Aspirant. Prilozheniye k zhurnalu Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. Postgraduate student. Appendix to the journal: Bulletin of the Trans-Baikal State University. 2018, 12 (2): 29–35. [In Russian].

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. Степанюк И.А., Смирнов В.Н. Методы измерений характеристик динамики ледяного покрова. М.: Интеграция, 2001. 136 с.
16. Алексеев А.Э., Вдовенко В.С., Горшков Б.Г., Потанов В.Т., Симикин Д.Е. Когерентный двухчастотный фазочувствительный рефлектометр с амплитудной модуляцией зондирующих импульсов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 4. С. 384–388.
17. Masoudi A., Belal M., Newson T.P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR // Measurement Science and Technology. 2013. V. 24. Is. 8. P. 085204.
18. Бордонский Г.С., Рябова Л.Д. Радиочастотный дифференциальный измеритель деформации // Учен. зап. Забайкальского гос. ун-та. 2015. № 3 (62). С. 26–29.
19. Климат Читы / Под ред. Ц.А. Швер, И.А. Зильберштейна. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
20. Butkovich T.R. Thermal Expansion of Ice // Journ. of Applied Physics. 1959. V. 30. Is. 3. P. 350–353. doi: 10.1063/1.1735166.
21. Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 289–299.
22. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. Электромагнитные потери пресного льда в микроволновом диапазоне при 0 °С // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 6. С. 587–592. doi: 10.7868/S0033849414060060.
23. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. «Просветление» льда в микроволновом диапазоне при текучести // Письма в Журнал техн. физики. 2009. Т. 35. № 22. С. 46–54.
24. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. 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. Is. 21. P. 2481. doi: 10.3390/rs11212481.
25. Клепиков И.Н., Шарков Е.А. Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных неизотермических сред // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3–15.
26. Domine F., Taillandier A.-S., Simpson W.R. A parameterization of the specific surface area of seasonal snow for field use and for models of snowpack evolution // Journ. of Geophys. Research. 2007. V. 112. F02031. doi: 10.1029/2006JF000512.
27. Бордонский Г.С. Тепловое излучение ледяного покрова пресных водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 102 с.
28. Кирбизжекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Татков Г.И., Захаров А.И., Быков М.Е., Дмитриев А.В., Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Результаты исследований динамики ледового покрова озера Байкал методами спутниковой радиолокации ALOS PALSAR и GPS-навигации // Вестн. Бурятского науч. центра СО РАН. 2012. № 1 (5). С. 42–59.
14. Smakhtin V.K. Ice regime of Transbaikalia lakes in the present-day warming. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (2): 225–230. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-225-230. [In Russian].
15. Stepanyuk I.A., Smirnov V.N. *Metody izmereniy kharakteristik dinamiki ledyanogo pokrova*. Methods of measuring the characteristics of ice cover dynamics. Moscow: Integration, 2001:136 p. [In Russian].
16. Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Simikin D.E. A coherent dual-frequency phase-sensitive reflectometer with amplitude modulation of probing pulses. *Journ. of Communications Technology and Electronics*. 2016, 61 (4): 439–442. doi: 10.1134/S1064226916040033.
17. Masoudi A., Belal M., Newson T.P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR. *Measurement Science and Technology*. 2013, 24 (8): 085204. doi: 10.1088/0957-0233/24/8/085204.
18. Bordonsky G.S., Ryabova L.D. The RF Differential Strain Gauge. *Uchenye zapiski Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. Scientific notes of the Trans-Baikal State University. 2015, 3 (62): 26–29. [In Russian].
19. *Klimat Chity*. Climate of Chita / Eds. C.A. Schwer, I.A. Zil'bershteyn. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 246 p. [In Russian].
20. Butkovich T.R. Thermal expansion of ice. *Journ. of Applied Physics*. 1959, 30 (3): 350–353. doi: 10.1063/1.1735166.
21. Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Boryakov S.A., Granin N.G. Deformation and seismic effects in the ice cover of Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics*. 2009. 50 (3): 214–221. doi: 10.1016/j.rgg.2008.08.005.
22. Bordonskii G.S., Gurulev A.A., Krylov S.D. Electromagnetic loss of fresh ice in microwave range at a temperature of 0 °C. *Journ. of Communications Technology and Electronics*. 2014, 59 (6): 536–540. doi: 10.1134/S1064226914060060.
23. Bordonskii G.S., Gurulev A.A., Krylov S.D. Ice clarification in the microwave range near the yield point. *Technical Physics Letters*. 2009, 35 (11): 1047–1050. doi: 10.1134/S1063785009110224.
24. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice concentrations from the NASA team, ASI, and VASIA2 algorithms with summer and winter ship data. *Remote Sensing*. 2019, 11 (21): 2481. doi: 10.3390/rs11212481.
25. Klepikov I.N., Sharkov E.A. Theoretic investigations of extremely inhomogeneous nonisothermic media emission. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. Soviet Journal of Remote Sensing. 1992, 6: 3–15. [In Russian].
26. Domine F., Taillandier A.-S., Simpson W.R. A parameterization of the specific surface area of seasonal snow for field use and for models of snowpack evolution. *Journ. of Geophys. Research*. 2007, 112: F02031. doi: 10.1029/2006JF000512.
27. Bordonskiy G.S. *Teplovoye izluchenie ledyanogo pokrova presnykh vodoemov*. Thermal radiation of the ice cover of fresh water bodies. Novosibirsk: Science, 1990: 102 p. [In Russian].
28. Kirbizhekova I.I., Chimitdorzhiev T.V., Tubanov T.A., Tat'kov G.I., Zakharov A.I., Bykov M.E., Dmitriev A.V., Filatov A.V., Evtyushkin A.V. The results of lake Baikal ice cover dynamics research by methods of ALOS PALSAR satellite radar-location and GPS-navigation. *Vestnik buryatskogo nauchnogo tsentra sibirskogo otdeleniya rossiiskoy akademii nauk*. Bulletin of the Buryat scientific center of the Siberian branch of the Russian academy of sciences. 2012, 1 (5): 42–59. [In Russian].