

УДК 528.8

## РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАЛЕДЕЙ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ (НА ПРИМЕРЕ Р. СМОЛЕНКА ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ)

© 2026 А. А. Гурулев\*, А. О. Орлов, В. А. Казанцев, А. К. Козлов

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

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

Поступила в редакцию 12.08.2025 г.

После доработки 08.10.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

Наледные образования — одно из распространенных природных явлений. Они могут оказывать негативное влияние на технические сооружения и инфраструктуру регионов. Дистанционное зондирование (далее — ДЗ) — один из методов мониторинга наледей в широком диапазоне частот. В работе представлены результаты дистанционного исследования налееди, представляющей слоистую структуру в виде: лед—вода—лед. По интенсивности теплового излучения в микроволновом диапазоне показана возможность мониторинга данных образований. Выяснено, что оптимальная длина волны для оперативного радиометрического мониторинга налееди — дециметровый диапазон. Это связано с относительно высокой минерализацией и увлажненностью этого криогенного явления. Обычно при становлении ледяного покрова на пресных водоемах в него захватывается малое количество солей, и в течение года происходит его опреснение. К концу года минерализация водоема может составлять всего около  $0.0009 \text{ г/дм}^3$ . Для налееди концентрация солей, как правило, имеет более высокое значение от сотен миллиграмм на килограмм до нескольких тысяч миллиграмм, что связано с ее формированием (попаданием на лед или грунт минерализованной воды, которая кристаллизуется под воздействием отрицательных температур приземного воздуха и налееди). По мощности теплового излучения в микроволновом диапазоне можно определять внутренние характеристики таких образований (минерализация, наличие воды под льдом и т.п.). В работе приведены натурные измерения пространственного распределения радиояркостной температуры (характеризует мощность собственного теплового излучения) налееди. Показано, что сантиметровый и миллиметровый диапазоны — взаимодополняющие для мониторинга данных объектов. Для ускорения построения карт распределения радиояркостной температуры налеедных образований актуально применялись беспилотные летательные аппараты (далее — БПЛА) с установленным на них радиометрическим комплексом со сканирующей системой. Показана возможность определения налееди по пространственному распределению индекса загрязненности снега, который определяется при многоспектральной съемке на длинах волн 1.57–1.65, 0.85–0.88 и 0.53–0.59 мкм из космоса.

**Ключевые слова:** наледь, микроволновый диапазон, индекс загрязненности снега, радиометрия

DOI: 10.7868/S2412376526010128

### ВВЕДЕНИЕ

Налееди — одно из распространённых явлений в природной среде. Они встречаются в Канаде, Японии, на Аляске (Алексеев, 1987; Lainis et al., 2024), в России и во многих других странах. Все налееди имеют слоистую структуру, что определяется их происхождением, так как они образуются при замерзании периодически из-

ливающихся природных или техногенных вод (Гляциологический словарь, 1984). Толщина налееди составляет от нескольких миллиметров до десятков метров (Алексеев, 1987). Они могут оказывать негативное влияние на технические сооружения и инфраструктуру регионов. Так, в работе (Стручкова и др., 2020) приведён пример воздействия налееди на магистральный трубопровод. Эти образования негативно влияют

на дорожное покрытие и другие технологические объекты (Turcotte et al., 2023).

При образовании наледей происходит захват в них различных примесей и химических веществ. Это происходит за счёт вовлечения в наледь окружающих горных пород и почв, что приводит к формированию специфических геохимических полей, связанных с криогенным концентрированием наледобразующих вод. Для примера можно привести выход гиперсолёного рассола из ледника, расположенного в Антарктиде. Данный рассол частично замерзает, тем самым образуя наледь на леднике. Такой водопад получил название “кровавый водопад”. Причину его цвета не могли объяснить несколько десятков лет, и только в 2022 г., после исследований, проведённых методами электронной микроскопии проб льда водопада, загадка была разрешена. В пробах обнаружены нанообъекты, в которых и располагались особые включения, окрашивающие изливающиеся воды при воздействии окислительных процессов на воздухе (Skute et al., 2022). Ранее такие исследования не проводились по техническим причинам. Отмечено, что на Земле этот “кровавый” водопад самый холодный. Очевидно, что исследования физико-химических свойств наледей — актуальная научная задача.

Мониторинг наледей выполняют вблизи промышленных объектов, населённых пунктов по причине их негативного влияния на инфраструктуру. Примеры таких исследований — работы (Стетюха, 2006; Шестернев, Верхотуров, 2016; Шелехов и др., 2023), где показано, что наледь приносит заметный экономический ущерб. С точки зрения геоэкологического воздействия наледей на окружающую среду на примере работ (Коваленко, Лихтарович, 2021; Wohl, Scamardo, 2022) показано, что в результате воздействия наледей на горные породы происходит изменение рельефа.

Для определения физико-химических свойств наледей проводили опробование исследуемого объекта. Существуют и дистанционные методы мониторинга данных образований, которые в последнее время набирают популярность (Yoshikawa et al., 2007; Оленченко и др., 2023). Это связано с тем, что до некоторых объектов практически сложно добраться — например, в гористой местности, при отсутствии транспортного подъезда к таким объектам и т.д. Отмечено, что многие наледы небезопасны для их из-

учения контактными методами — например, под тонким слоем льда может располагаться слой воды. Наледи находятся постоянно в динамическом движении и быстро изменяют свою структуру, что требует повторения измерений их параметров через небольшие интервалы времени.

Один из распространённых методов мониторинга наледей — ДЗ в широком диапазоне частот с космических аппаратов. Как правило, для этих целей применяется технология, описанная в работах (Макарьева и др., 2019; Алексеев и др., 2023). Данный метод предполагает нахождение нормализованного дифференциального снежного индекса (NDSI), который определяется после схода устойчивого снежного покрова на земной поверхности. Однако в этой технологии существуют проблемы, связанные с тем, что не всегда возможно определять места расположения наледей и их площадь, например, после выпадения осадков в виде снега. Определение наледей возможно по нормализованному разностному водному индексу (NDWI) при условии наличия воды на поверхности. Преимущество данного метода в том, что существует возможность, независимо от наличия или отсутствия снежного покрова, определять контуры наледы (Баишев и др., 2024).

Один из перспективных методов мониторинга наледей — дистанционный метод исследования данных объектов в микроволновом диапазоне, из-за больших отличий в диэлектрических свойствах льда и воды в данном диапазоне. При этом существует возможность выявлять наличие наледей как по пассивной радиолокации (Козлов, Гурулев, 2023), так и с применением активных радарных методов (Гагарин и др., 2023). Так, для определения наличия наледей при активной радиолокации используются радары с синтезированной апертурой. В работе (Гагарин и др., 2023) приведён пример исследования динамики наледей, расположенных в долинах р. Верхняя Нерюнгра и Самокит, с применением радиолокационных данных, полученных со спутника Sentinel-1 на частоте 5.4 ГГц. Показано, что метод дешифрирования наледей по радиолокационным снимкам позволяет выявлять и внутренние особенности наледы (внутреннего строения наледы, наличие воды внутри неё). Показано, что для пресных водоёмов существует возможность выявлять радиометрическими и радарными методами в микроволновом диапазоне различного рода примеси (высшая водная растительность, газовые пузыри, солевые включения и т.п.), захваченные в лёд в момент его становления. Од-

нако при микроволновых спутниковых методах исследований наледей существуют и трудности. Одним из таких недостатков из-за высокой временной изменчивости её структуры, при относительно редких измерениях, являются сложности правильной интерпретации получаемых космических данных. На помощь могут прийти радарные и радиометрические методы исследования наледных образований с применением высотных летательных средств, с установленным на них измерительным комплексом (Бордонский и др., 2025).

Таким образом, развитие методик ДЗ наледей — актуальная задача. При этом важным дополнительным методом их исследования служат радарный и радиометрический методы, которые позволяют определять внутреннюю структуру наледных образований. Отмечено, что практически отсутствуют работы по исследованию наледей радиометрическими методами в микроволновом диапазоне с повышенным пространственным разрешением. В работе поставлена задача выявления возможностей микроволновой радиометрии для исследования наледей с пространственным разрешением порядка метра.

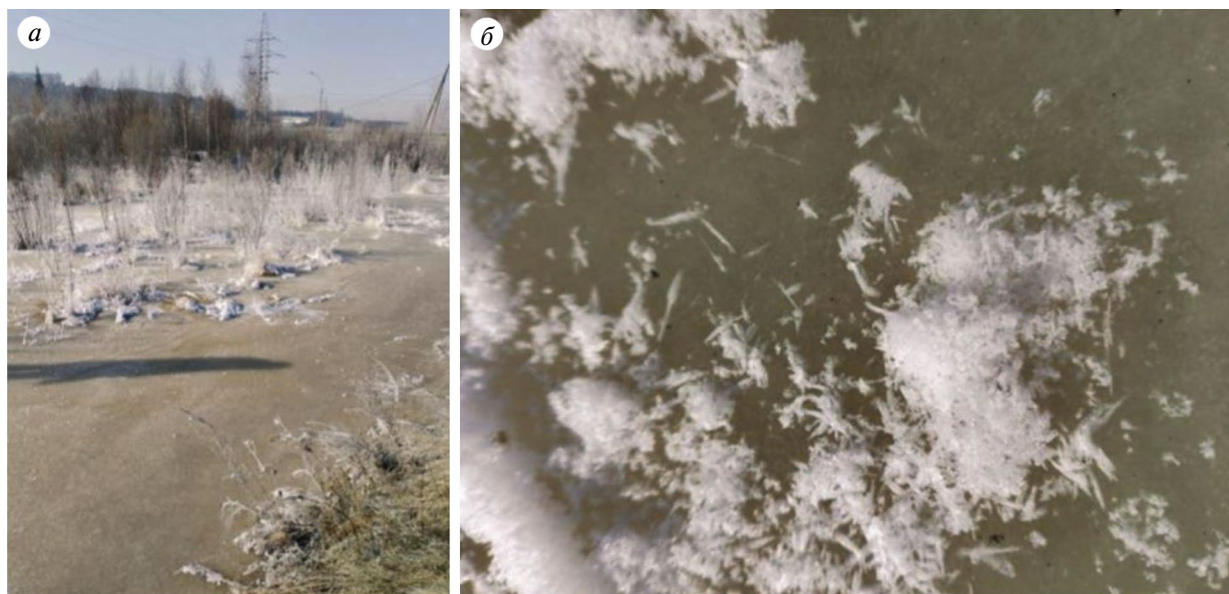
#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования излучательных свойств наледи выбран объект, расположенный в с. Смо-

ленка (Забайкальский край). Данный объект представляет собой наледь, которая образуется в зимний период на р. Смоленка и достигает мощности около 1 м. Описание условий её образования и нанесённый ею экономический ущерб приведены в работе (Звягинцева, Звягинцев, 2022).

Исследования наледи проводились 6 марта 2025 г. Толщина наледи составляла около 50 см: верхний слой льда имел толщину 10 см, ниже располагался слой воды толщиной ~15 см, а дальше слой льда. Минерализация верхнего слоя льда составляла в момент измерения ~300 мг/кг. Её минерализация определялась кондуктометрическим методом. Цвет воды — ржаво-коричневый. На поверхности наледи в некоторых местах находился сублимационный лёд (“ледяные цветы”), который возникает в результате наличия пор в ледяном покрове, по которым поднимается водяной пар (Style, Worster, 2009). В результате перепада температуры между воздухом и паром образуется сублимационный лёд, который и кристаллизуется в форме данных объектов. Фотографии поверхности исследуемой наледи и ледяных цветов приведены на рис. 1. Отмечено, что сублимационный лёд образуется и на поверхности растительности (см. рис. 1, а).

Для измерения теплового излучения исследуемого участка наледи применялись микровол-



**Рис. 1.** Фотографии исследуемой наледи (р. Смоленка) (а) и ледяных цветов на наледи (б). Фото А.А. Гурулева, 6 марта 2025 г.

**Fig. 1.** Photographs of the aufeis under study (Smolenka River) (а) and ice flowers on the aufeis (б). Photo by А.А. Gurulev, March 6, 2025

новые радиометры на длины волн 0.88 и 2.3 см, разработанные и изготовленные в Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. Микроволновые радиометры позволяют определять радиояркую температуру ( $T_{я}$ ) исследуемого объекта, подчиняющуюся закону излучения Планка. Также выполняли измерения в тепловом инфракрасном диапазоне (ИК) от 8 до 14 мкм. Измерения в ИК-диапазоне позволяли определять термодинамическую температуру исследуемой поверхности. Радиометры устанавливали на сани, которые перемещали по ледяному покрову с постоянной скоростью. В данной установке пространственное разрешение составило не менее 1 м. Измерения выполнялись под углом  $45^\circ$  на вертикальной поляризации. Выходные сигналы записывали с применением системы сбора данных фирмы Agilent на компьютер. Фотография приборов показана на рис. 2, а.

Для исследования выбран период перед началом деструкции наледи (начало таяния) при появлении значительных контрастов радиояркости

объекта. В момент измерения температура воздуха составляла  $+3^\circ\text{C}$  в безветренную и безоблачную погоду. Калибровку радиометров выполняли по излучению холодного неба ( $T_{я} \sim 20\text{ K}$ ), отражённого от металлического листа, и по излучению пресной невзволнованной водной поверхности, имеющей температуру  $+1^\circ\text{C}$  ( $T_{я} \sim 170\text{ K}$  для длины волны 0.88 см и  $T_{я} \sim 130\text{ K}$  для длины волны 2.3 см).

Для проверки метода ДЗ наледи в микроволновом диапазоне выбран участок, свободный от растительности (кустарника ивы Шверина, высушенных травянистых растений, растущих вдоль берега реки), размерами  $4 \times 19\text{ м}^2$ , расположенный вблизи береговой зоны (см. рис. 2, б). Угол уклона берега от вертикали составляет около  $30$  градусов.

Выполнены трассовые измерения участка наледи по параллельным профилям, в результате чего получена карта распределения радиоярких температур. Кроме того, после прове-



**Рис. 2.** Фотографии радиометрического комплекса, установленного на сани, для исследования излучательных характеристик наледи (а) и момент их измерений (б). Фото А.А. Гуралева, 6 марта 2025 г.

**Fig. 2.** Photographs of the radiometric complex installed on the sled to study the radiative characteristics of the aufeis (a) and the moment of their measurements (b). Photo by A.A. Gurulev, March 6, 2025

дённых измерений на поверхность наледи стала изливаться вода. Поэтому выполнены радиотепловые измерения изменяющегося во времени состояния наледи при стационарном расположении измерительной аппаратуры. Вода, которая попадала на поверхность наледи, кристаллизовалась, причём рост кристаллов льда начинался с ледяной поверхности (в виде ледяных столбиков). Причина была в том, что температура воздуха имела положительное значение, а ледяной покров имел температуру около  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , измеренную с использованием термопары типа J.

Кроме того, проанализированы космические данные исследуемой наледи со спутника Landsat-8 на различных длинах волн от 25.02.2025. На рис. 3, *a* приведён комбинированный космоснимок в видимом диапазоне. Определялся индекс загрязнённости снежного покрова (далее — ИЗС), который рассчитывается по следующей формуле (Крутских, Кравченко, 2018):

$$\text{ИЗС} = \frac{\text{SWIR1} + \text{NIR}}{\text{Green}},$$

где длины волн каналов соответственно равны  $\text{SWIR1} = 1.57\text{--}1.65\text{ }\mu\text{м}$ ,  $\text{NIR} = 0.85\text{--}0.88\text{ }\mu\text{м}$ ,  $\text{Green} = 0.53\text{--}0.59\text{ }\mu\text{м}$  (см. рис. 3*б*). Также определяли индекс снега  $\text{NDSI}$ , который вычисляется по формуле  $\text{NDSI} = \frac{\text{Green} - \text{SWIR1}}{\text{Green} + \text{SWIR1}}$  (см. рис. 3, *в*).

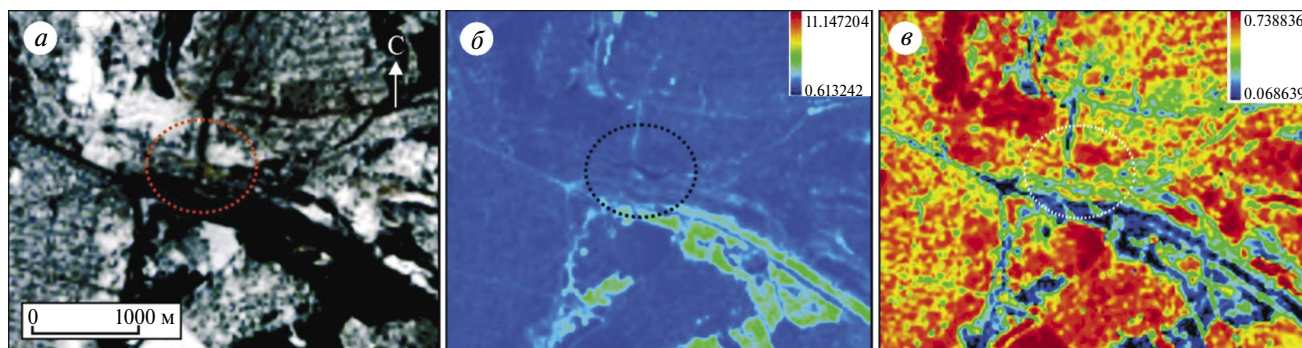
Данные индексы отличаются друг от друга количеством синтезированных каналов и ИЗС выявляет участки поверхности свободного от загрязняющих примесей снежного покрова. Участок наледи (обведён пунктирной линией), расположенный в центре, выделяется тёмно-синим цветом (см. рис. 3, *б*).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа полученных космических данных видно, что площадь наледи выделяется по ИЗС по сравнению с другими данными. В момент получения космоснимка на земной поверхности присутствовал снежный покров, поэтому по  $\text{NDSI}$  обнаружить налечь было невозможно при проведении натурных исследований. Также она практически не определялась в видимом диапазоне. Возможной причиной меньшего значения коэффициента ИЗС наледи по сравнению с ИЗС участка без наледи могло быть наличие сублимационного льда на поверхности и окружающей данный объект растительности.

Радиометрические измерения дали следующие результаты. В тепловом инфракрасном диапазоне значение яркостной температуры по всей площади наледи принимает практически постоянное значение, равное  $\sim 262\text{ K}$ , что обусловлено температурой фазового перехода лёд–вода, равной  $273\text{ K}$ . Меньшее значение яркостной температуры от термодинамической температуры ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) обусловлено тем, что вода не является абсолютно чёрным телом и её коэффициент излучения равен  $\sim 0.96$ . Отмечено, что значения данного коэффициента для льда и воды близки по своей величине (Госсорг, 1988).

При измерении радиояркостной температуры наледи, которая характеризует мощность теплового излучения, для длин волн  $0.88$  и  $2.3\text{ }\mu\text{м}$  получены результаты, показанные на рис. 4, *б–г*. На рис. 4, *a* приведён композит, выполненный из 10 фотографий исследуемой площадки на наледи. На нём отслеживается относительно тонкий слой воды, который фиксируется по отра-



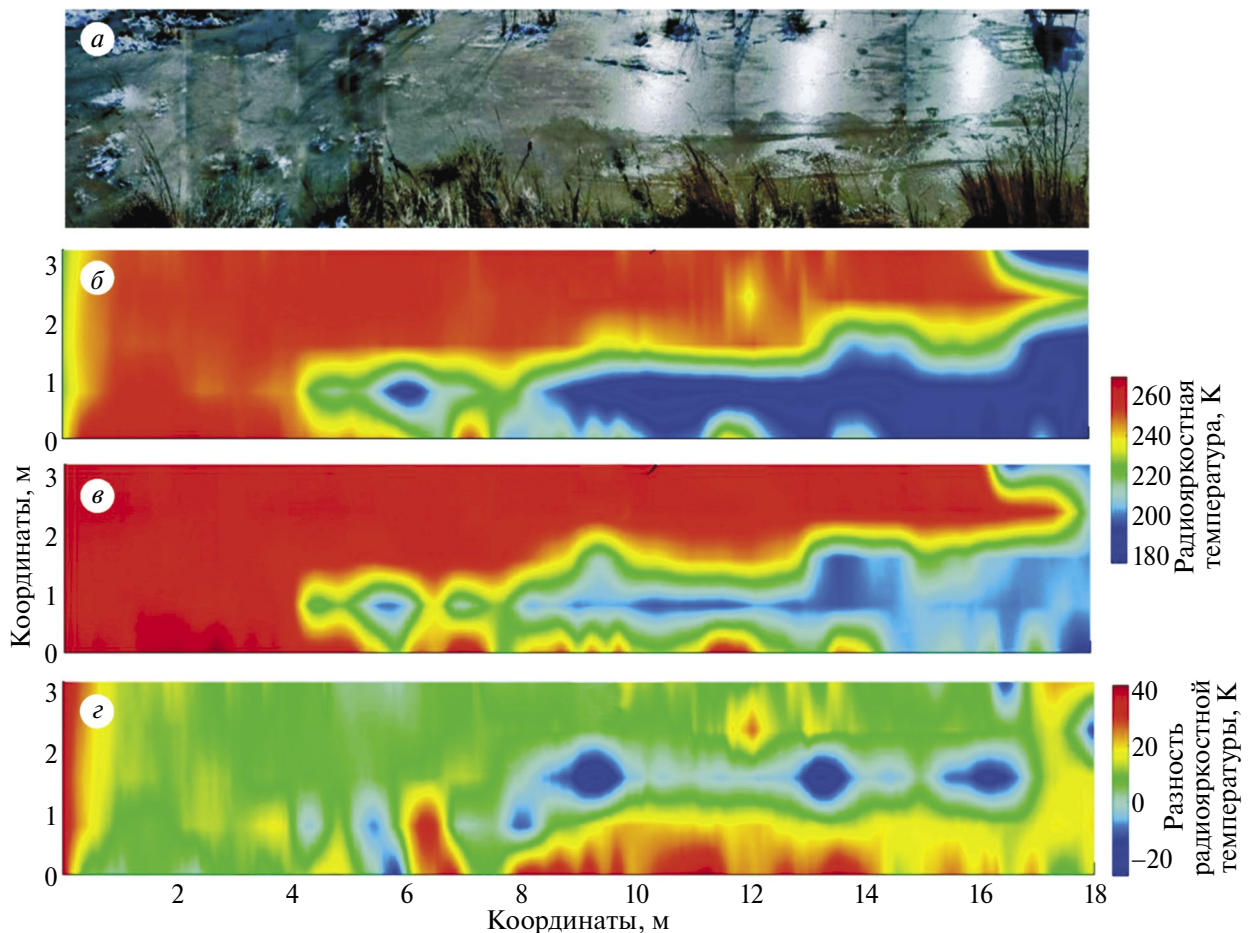
**Рис. 3.** Космический снимок исследуемой наледи в видимом диапазоне (*a*), карта распределения индекса ИЗС (*б*), пространственное распределение индекса  $\text{NDSI}$  (*в*). Дата: 25.02.2025

**Fig. 3.** Satellite image of the augeis surface under study in visible light (*a*), map of the distribution of the SPI (snow pollution) index (*б*), spatial distribution of the  $\text{NDSI}$  index (*в*). Date: February 25, 2025

жённому солнечному излучению. Измерения толщины слоя воды на наледи показали его значение до 5 мм. Наблюдается различие в пространственном распределении радиоярких температур в миллиметровом и сантиметровом диапазонах. Данные различия связаны с тем, что формирующие слои излучения для этих длин волн существенно отличаются друг от друга. Для длины волны 0.88 см при минерализации льда  $0.18 \text{ г/дм}^3$  величина скин-слоя составляет 6 см, а для длины волны 2.3 см равняется 36 см при температуре льда  $-5^\circ\text{C}$ . Соответственно, меньшее значение данного слоя наблюдается для длины волны 0.88 см. С учётом большого значения минерализации льда наледи ( $\sim 0.27 \text{ г/дм}^3$ ) дециметровый слой льда является практически полубесконечной средой для миллиметрового диапазона, так как скин-слой данной среды со-

ставляет всего несколько сантиметров. Для льда без слоя воды на поверхности обнаружены различия  $T_{\text{я}}$  на длине волны 2.3 см. Они достигают значений 15 К на данной длине волны для точек с координатами в метрах (12; 2.5) и (10; 2.5) (см. рис. 4, *в*). Данные вариации обусловлены различием толщины верхнего слоя ледяного покрова, а также пространственными вариациями минерализации льда (отбор проб в трёх точках на местах исследования показал отличия в минерализации льда наледи на  $50 \text{ мг/кг}$ ).

Отмечено, что в точке с координатами (9.5; 1.5) присутствовал слой воды, который не превышал 1 мм. В данной точке наблюдается существенное различие в значениях  $T_{\text{я}}$  для длин волн 0.88 и 2.3 см, что видно из пространственного распределения разности радиоярких темпера-



**Рис. 4.** Композит фотографий исследуемого участка наледи. Съёмка произведена под углом  $\sim 45^\circ$  (*a*). Пространственное распределение радиояркой температуры наледи на длинах волн 0.88 см (*б*), 2.3 см (*в*) и разность  $\Delta T_{\text{я}} = \Delta T_{\text{я}}(0.88 \text{ см}) - T_{\text{я}}(2.3 \text{ см})$  (*з*). Дата: 06.03.2025

**Fig. 4.** Composite photography of the aufeis area under study. The picture was taken at an angle of  $\sim 45^\circ$  (*a*). Spatial distribution of the brightness temperature of the aufeis at wavelengths of 0.88 cm (*b*), 2.3 cm (*v*) and the difference  $\Delta T_{\text{я}} = \Delta T_{\text{я}}(0.88 \text{ cm}) - T_{\text{я}}(2.3 \text{ cm})$  (*z*). Date: March 6, 2025

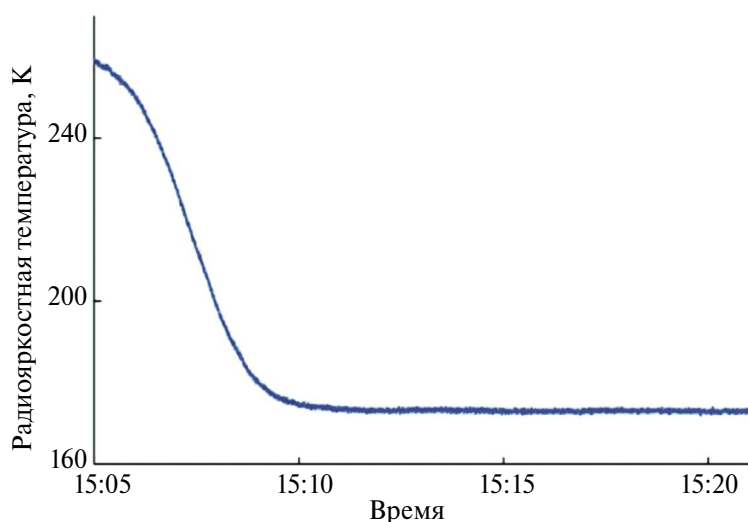
тур (см. рис. 4, з). Это связано с тем, что тепловое излучение для длины волны 0.88 см формируется в слоистой системе (воздух–вода), а на длине волны 2.3 см в структуре, состоящей из четырёх слоёв (воздух–вода–лёд–вода). Представляется, что возможно решить задачу пространственного распределения толщины льда. В случае, если  $\Delta T_y$  имеет значения  $< 0$ , то в данной точке имеется слой воды, не превышающий 1 мм, в обратном случае, когда значения  $\Delta T_y > 0$ , могут быть зафиксированы участки, где толщина льда имеет минимальное значение (формирующий слой льда излучения для длины волны 2.3 см недостаточен, чтобы его считать полубесконечной средой). Данное условие справедливо для равномерного распределения минерализации льда и с учётом того, что под верхним слоем наледи расположен водный слой.

Учтено, что слой воды практически непроницаем для микроволнового диапазона, соответственно, при радиометрических микроволновых измерениях исследуется только верхний ледяной слой наледи. Минимальные значения  $T_y$  связаны с тонким слоем воды (порядка одного миллиметра) на ледяной поверхности. В случае выпадения осадков в виде снега (сухого) картина распределения радиоярких температур практически не изменится (Бордонский и др., 2014), так как он вносит незначительный вклад в мощность радиотеплового излучения, а в сантиметровом диапазоне он практически радиопрозрачный. Это значит, что с помощью микроволновых радио-

метрических методов можно исследовать криогенные образования в виде наледей, покрытых снежным покровом, в том числе и их внутреннюю структуру.

Поскольку наледь содержит повышенное содержание минерализации в отличие от речного и озёрного пресного ледяного покрова и увлажнения в слоях, то целесообразно применение дополнительного канала дециметрового диапазона. В этом случае радиотепловое излучение формируется с больших глубин, что позволяет выявлять внутренние неоднородности данной среды.

Непрерывные измерения теплового излучения с применением радиометрического комплекса быстро изменяющейся структуры наледи выполнены на том же исследуемом участке р. Смоленка. Во второй половине дня 6 марта 2025 г. на ледяной покров начала изливаться вода. На рис. 5 приведён временной ход поведения радиояркой температуры для длины волны 0.88 см. С появлением воды радиояркая температура в микроволновом диапазоне в течение ~3 мин (время попадания воды в область направленности антенн радиометров) уменьшилась на ~100 К, что связано с отличающимися коэффициентами диэлектрической проницаемости воды и льда (значения мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости отличаются друг от друга в сотни раз).



**Рис. 5.** Временной ход радиояркой температуры наледи на вертикальной поляризации при попадании в область диаграммы антенны водяного слоя на длине волны 0.88 см

**Fig. 5.** Time course of the brightness temperature of aufeis on vertical polarization at a wavelength of 0.88 cm when a water layer enters the antenna diagram area

Показано, что радиотепловое излучение наледи динамично во времени, что связывается с периодическим излиянием водных масс на ледяную поверхность исследуемого объекта. Поэтому для мониторинга наледей необходимо получение оперативной информации о данном объекте, что позволит предотвратить возможные катастрофические последствия для различных сооружений. Для решения подобной задачи возможно применение радиометрического комплекса, установленного на БПЛА, который будет производить мониторинг наледи в верховьях ручья. Это позволит увеличить исследуемую площадь и скорость построения радиоизображений наледных образований, а также изучать их динамику. Отмечено, что с применением БПЛА существует возможность микроволнового радиометрического мониторинга труднодоступных мест с высоким пространственным разрешением (Бордонский и др., 2025; Yang et al., 2025).

## ВЫВОДЫ

В ходе выполненных радиометрических измерений и анализов космических снимков в широком спектральном диапазоне получены следующие результаты. Для наледи характерно проникновение жидкой воды в её внутренние слои, что существенно усложняет определение структуры данного объекта при дистанционных измерениях. Применение микроволнового диапазона позволяет оценить структурные особенности данного объекта.

Наледь — быстро изменяющийся во времени объект, содержащий жидкую воду, иногда в переохлаждённом состоянии, что отражается на её излучательных свойствах в микроволновом диапазоне. Для увлажнённого льда характерны повышенные значения радиояркостной температуры во всём микроволновом диапазоне. Слой воды более 1 мм на наледи приводит к понижению мощности теплового излучения. Сухой снежный покров радиопрозрачен при мониторинге данного объекта в сантиметровом диапазоне.

Пространственное распределение радиоярких температур в миллиметровом и сантиметровом диапазонах служит взаимодополняющими друг друга характеристиками наледи, позволяющими определять внутреннюю приповерхностную структуру таких образований (минерализация, наличие воды подо льдом и т.п.).

Перспективным направлением исследования служит применение БПЛА с установленными на его борту микроволновыми радиометрами для ускорения построения карт распределения радиояркой температуры наледных образований.

Для исследования структуры наледи целесообразно применять радиометрический комплекс, состоящий из микроволновых радиометров от миллиметрового до дециметрового диапазонов с целью определения увлажнения более глубоких слоёв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.Р.* Наледи. Новосибирск: Наука, 1987. 160 с.
- Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Землянкова А.А., Остахов А.А.* Гигантские наледи-тарыны северо-востока России // География и природные ресурсы. 2023. Т. 44. № 3. С. 136–143.  
<https://doi.org/10.15372/GIPR20230314>
- Баишев Н.Е., Гагарин Л.А., Шепелев В.В.* Применение индекса NDWI в исследовании природно-техногенных наледей на автодороге “Лена” (Южная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. Т. 29. № 3. С. 408–419.  
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-408-419>
- Бордонский Г.С.* Тепловое излучение ледяного покрова пресных водоемов. Новосибирск: “Наука”, 1990. 104 с.
- 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. С. 102–111.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В.* Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 228–240.
- Гагарин Л.А., Баишев Н.Е., Мельников А.Е.* Дешифровочные признаки наледей подземных вод на радиолокационных снимках Sentinel-1 на примере Верхне-Нерюнгринской и Самокитской наледей Южной Якутии // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. № 6. С. 59–71.  
<https://doi.org/10.15372/KZ20230606>
- Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
- Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.

- Гурулев А.А., Цыренжапов С.В., Орлов А.О. Выявление внутренних неоднородностей в пресном ледяном покрове с использованием пассивной радиолокации // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 9. С. 38–41.
- Звягинцева В.В., Звягинцев О.Ю. Динамика образования наледи в условиях Восточного Забайкалья: исследование с использованием данных дистанционного зондирования земли // Вестник Забайкальского гос. ун-та. 2022. Т. 28. № 7. С. 17–25. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-7-17-25>
- Коваленко С.Н., Лихтарович Е.В. Геологическая деятельность наледей в районе горы Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геология и окружающая среда. 2021. Т. 1. № 1. С. 80–93. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2021.1.80>
- Козлов А.К., Гурулев А.А. Особенности радиотеплового изучения наледей в микроволновом диапазоне // Арктика и Антарктика. 2023. № 3. С. 73–85. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.3.43976>
- Крутских Н.В., Кравченко И.Ю. Использование космоснимков Landsat для геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий // Современные Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 159–168. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168>
- Макарьева О.М., Шихов А.Н., Остахов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 201–212. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>
- Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянскова А.А., Данилов К.П., Остахов А. А., Калганов А.С., Нестерова Н.В., Христофоров И.И. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и Тектонофизика. 2023. Т. 14. № 3. 0702 с. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0702>
- Стетюха В.А. Прогнозирование образования наледей при воздействиях физических процессов горного производства на окружающую среду // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 8. С. 43–46.
- Стручкова Г.П., Шеин Н.С., Капитонова Т.А. Применение методов нечеткого моделирования для оценки влияния наледей на функционирование магистральных трубопроводов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2020. № 4. С. 21–31. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2020-04-2>
- Шелехов И.Ю., Матрасова Е.Н., Клементьев И.А. Исследование средств защиты прилегающей территории от наледи // Тенденции развития науки и образования. 2023. Вып. 101 № 4. С. 194–199. <https://doi.org/10.18411/trnio-09-2023-206>
- Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г. Воздействие наледей на инженерные сооружения // Вестник Забайкальского гос. ун-та. 2016. Т. 22. № 10. С. 30–40. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2016-22-10-30-40>
- Lainis A., Neupauer R.M., Koch J.C., Gooseff M. Seasonal and Decadal Subsurface Thaw Dynamics of an Aufeis Feature Investigated Through Numerical Simulations // Hydrol. Process. 2024. V. 38. № 3. P. e15106. <https://doi.org/10.1002/hyp.151060>
- Skulte E. C., Mikucki J.A., Dyar M.D., Lee P.A., Livi K.J.T., Mitchell S. A Multi-Technique Analysis of Surface Materials from Blood Falls, Antarctica // Front. Astron. Space Science. 2022. V. 9. P. 843174. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.843174>
- Style R., Worster M.G. Frost Flower Formation on Sea Ice and Lake Ice // Geophys. Research Letters. 2009. V. 36. № 11. P. L11501. <https://doi.org/10.1029/2009GL037304>
- Turcotte B., Dubnick A., McKillop R. Icing and Aufeis in Cold Regions II: Consequences and Mitigation // Canadian Journal of Civil Engineering. 2023. V. 51. № 2. P. 125–139. <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0119>
- Wohl E., Scamardo J.E. Aufeis as a Major Forcing Mechanism for Channel Avulsion and Implications of Warming Climate // Geophys. Research Letters. 2022. V. 49. P. e2022GL100246. <https://doi.org/10.1029/2022GL100246>
- Yang Q., Hailiang L., Xu Y., Fu J., Zheng W., Yang D., Mei X., Wang H. Initial Results of a W/D-Band Millimeter-Wave Radiometer on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // GRSL. 2025. V. 22. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2025.3532482>
- Yoshikawa K., Hinzman L.D., Kane D.L. Spring and Aufeis (Icing) Hydrology in Brooks Range, Alaska // Journal of Geophysical Research. Atmosphere. 2007. V. 112. P. G04S43. <https://doi.org/10.1029/2006JG000294>

**Citation: Gurulev A.A., Orlov A.O., Kazantsev V.A., Kozlov A.K. Radiometric Survey of Aufeis Bodies in the Microwave Range: A Case Study of the Smolenka River in the Transbaikal Territory. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (1): 172–182. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526010128**

## Radiometric Survey of Aufeis Bodies in the Microwave Range: A Case Study of the Smolenka River in the Transbaikal Territory

© 2026 A. A. Gurulev\*, A. O. Orlov, V. A. Kazantsev, A. K. Kozlov

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

\*e-mail: lgc255@mail.ru

Received August 12, 2025; revised October 8, 2025; accepted December 29, 2025

Aufeis bodies are one of the most common natural phenomena. They exert an adverse effect on technical facilities and infrastructure of the regions. Remote sensing is one of the methods of aufeis monitoring within a wide range of frequencies. The paper presents the results of remote sensing of the aufeis, which has a layered structure: ice–water–ice. The possibility of aufeis monitoring by the intensity of thermal radiation in the microwave range is shown. It was found that the optimal wavelength for operational radiometric monitoring of aufeis is the decimeter range due to the relatively high mineralization and moisture content of aufeis. Usually, when an ice cover is formed on a freshwater body, a small quantity of salts is captured with ice, and desalination occurs throughout the year. By the end of the year mineralization of the reservoir may decrease to 0.0009 g/dm<sup>3</sup>. As for the aufeis ice, the salt concentration, as a rule, has a higher value from hundreds of milligrams per kilogram to several thousand due to mineralized water freezing onto the ice or on a ground. Analyzing intensity of thermal radiation in the microwave range, it is possible to determine internal characteristics of aufeis, such as mineralization level, presence of water under or inside the ice, etc. The field measurements of the spatial distribution of radiance temperature, which characterizes intensity of own aufeis thermal radiation, shown that the centimeter and millimeter wavelength ranges are complementary for monitoring. To accelerate the construction of maps of the distribution of radio–brightness temperature of the aufeis it is relevant to use unmanned aerial vehicles equipped with radiometric systems and scanning devices. The study also demonstrated the possibility of identifying aufeis from the spatial distribution of snow pollution index, which is derived at wavelengths of 1.57–1.65, 0.85–0.88, and 0.53–0.59 μm from space.

**Keywords:** aufeis, microwave range, snow pollution index, radiometry

### REFERENCES

- Alekseev V.R. Naledi.* Aufeis. Novosibirsk: Nauka, 1987. 160 p. [In Russian].
- Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N., Nesterova N.V., Zemlyanskova A.A., Ostashov A.A.* Giant Taryn Aufeis in the Northeast of Russia. *Geografiya i Prirodnye Resursy.* Geography and Natural Resources. 2023, 44 (3): 136–143. <https://doi.org/10.1134/S1875372823030010> [In Russian].
- Baishev N.E., Gagarin L.A., Shepelev V.V.* NDWI as a Method for Studying Natural and Technogenic Aufeis Along the Lena Highway (Southern Yakutia). *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki.* Natural Resources of the Arctic and Subarctic. 2024, 29 (3): 408–419. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-408-419> [In Russian].
- Bordonskiy G.S. Teplovoye izlucheniye ledyanogo pokrova presnykh vodoyemov.* Thermal Radiation of the Ice Cover of Freshwater Reservoirs. Novosibirsk: Nauka, 1990: 104 p. [In Russian].
- Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Kazantsev V.A., Kozlov A.K.* Features of the Technique of Microwave Radiometric Measurements from UAVs at 0.8 cm Wavelength. *Tekhnika Radiosvyazi.* Radio Communication Technology. 2025, (1): 102–111 [In Russian].
- 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). *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa.* Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2014, 11 (2): 228–240 [In Russian].
- Gagarin L.A., Baishev N.E., Melnikov A.E.* Interpretation Signs of Groundwater Icings on Sentinel-1 Radar Images on Examples of the Verkhnyaya Nerungra and Samokit Aufeis of Southern Yakutia. *Kriosfera Zemli.* Cryosphere of the Earth. 2023, 27 (6): 59–71. <https://doi.org/10.15372/KZ20230606> [In Russian].
- Kotlyakov V.M. Glyatsiologicheskii slovar'.* Glaciological Dictionary. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
- Gossorg J. Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primeneniye.* Infrared Thermography. Fundamentals, Technique, Application. Moscow: Mir, 1988: 416 p. [In Russian].
- Gurulev A.A., Tsyrenzhapov S.V., Orlov A.O.* Identification of Internal Heterogeneities in the Freshwater Ice Cover Using Passive Radar. *Izvestiya Vuzov. Fizika.*

- News of Higher Educational Institutions. Physics. 2013, 56 (9): 38–41 [In Russian].
- Zvyagintseva V.V., Zvyagintsev O.Yu. Investigation of the Ice Formation Dynamics Under the Conditions of Eastern Transbaikalia Territory Using Earth Remote Sensing Data. *Vestnik Zabaykal'skogo Gosudarstvennogo Universiteta*. Transbaikal State University Journal. 2022, 28 (7): 17–25. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-7-17-25> [In Russian].
- Kovalenko S.N., Likhtarovich E.V. Geological Effects of Aufeis in the Vicinity of Munku-Sardyk Mountain. *Geologiya i Okruzhayushchaya Sreda*. Geology and Environment. 2021, 1 (1): 80–93. [In Russian].
- Kozlov A.K., Gurulev A.A. Features of Radiothermal Study of Ice in the Microwave Range. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2023, (3): 73–85. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.3.43976> [In Russian].
- Krutskikh N.V., Kravchenko I.Yu. The Use of Landsat Satellite Images for the Geoecological Monitoring of Urbanized Areas. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2018, 15 (2): 159–168. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168> [In Russian].
- Makar'eva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Icings of the Indigirka River Basin According to the Recent Landsat Satellite Images and Historical Data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (2): 201–212. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388> [In Russian].
- Olenchenko V.V., Makar'yeva O.M., Zemlyanskova A.A., Danilov K.P., Ostashov A.A., Kalganov A.S., Nesterova N.V., Khristoforov I.I. Geophysical Indicators of Aufeis in the Anmangynda River (Magadan Region). *Geodinamika i Tektonofizika*. Geodynamics & Tectonophysics. 2023, 14 (3): 0702 p. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0702> [In Russian].
- Stetyukha V.A. Forecasting the Formation of Aufeis Under the Impact of Physical Processes of Mining Production on the Environment. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten'*. Mining Information and Analytical Bulletin. 2006, (8): 43–46 [In Russian].
- Struchkova G.P., Shein N.S., Kapitonova T.A. Application of Fuzzy Modeling Methods to Assess the Impact of Aufeis on the Functioning of Main Pipelines. *Problemy Bezopasnosti i Chrezvychaynykh Situatsiy*. Safety and Emergency Problems. 2020, (4): 21–31. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2020-04-2> [In Russian].
- Shelekhov I.Yu., Matrasova E.N., Klementyev I.A. Research of means of protection of the adjacent territory from aufeis. *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*. Trends in the Development of Science and Education. 2023, 101(4): 194–199. <https://doi.org/10.18411/trnio-09-2023-206> [In Russian].
- Shesternev D.M., Verkhoturov A.G. The Effects of Icings on Engineering Facilities. *Vestnik Zabaykal'skogo Gosudarstvennogo Universiteta*. Transbaikal State University Journal. 2016, 22 (10): 30–40. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2016-22-10-30-40> [In Russian].
- Lainis A., Neupauer R.M., Koch J.C., Gooseff M. Seasonal and Decadal Subsurface Thaw Dynamics of an Aufeis Feature Investigated Through Numerical Simulations. *Hydrol. Process*. 2024, 38 (3): e15106. <https://doi.org/10.1002/hyp.151060>
- Skulte E. C., Mikucki J.A., Dyar M.D., Lee P.A., Livi K. J.T., Mitchell S. A Multi-Technique Analysis of Surface Materials from Blood Falls, Antarctica. *Front. Astron. Space Sci*. 2022, 9: 843174. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.843174>
- Style R., Worster M.G. Frost flower formation on sea ice and lake ice. *Geophys. Res. Lett*. 2009, 36 (11): L11501. <https://doi.org/10.1029/2009GL037304>
- Turcotte B., Dubnick A., McKillop R. Icing and Aufeis in Cold Regions II: Consequences and Mitigation // *Can. J. Civil Eng*. 2023, 51 (2): 125–139. <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0119>
- Wohl E., Scamardo J.E. Aufeis as a Major Forcing Mechanism for Channel Avulsion and Implications of Warming Climate. *Geophys. Res. Lett*. 2022, 49: e2022GL100246. <https://doi.org/10.1029/2022GL100246>
- Yang Q., Hailiang L., Xu Y., Fu J., Zheng W., Yang D., Mei X., Wang H. Initial Results of a W/D-Band Millimeter-Wave Radiometer on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *GRSL*. 2025, 22: 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2025.3532482>
- Yoshikawa K., Hinzman L.D., Kane D.L. Spring and Aufeis (Icing) Hydrology in Brooks Range, Alaska. *J. Geophys. Res. Atmos*. 2007, 112: G04S43. <https://doi.org/10.1029/2006JG000294>