

УДК 620.179:624.147

*В.В. Махсидов¹, О.И. Смирнов¹, Н.Д. Разомасов²,
Т.С. Разомасова², Г.А. Нужный¹*

МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЛЬДА (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-111-118

В Арктике для строительства конструкций и сооружений уже имеется хорошая основа для материала – лед. Однако лед, как конструкционный материал, не обладает требуемыми прочностными свойствами. Поэтому ведется поиск способов увеличения прочностных свойств льда и разрабатываются методы мониторинга его состояния. В статье приведен обзор неразрушающих методов мониторинга состояния конструкций и естественных объектов на основе льда: по напряженно-деформированному состоянию, ультразвуковым исследованиям, акустической и электромагнитной эмиссии по спутниковым снимкам и данным радиолокационных станций.

Ключевые слова: лед, арктические материалы, композиционные материалы, мониторинг, методы контроля, контроль конструкций.

*V.V. Makhsidov¹, O.I. Smirnov¹, N.D. Razomasov²,
T.S. Razomasova², G.A. Nuzhnyy¹*

STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF NATURAL AND ARTIFICIAL STRUCTURES BASED ON ICE (review)

Ice is a good base material for a number of structures in Arctic, especially for large structures (e.g. runway, road and etc.). However, sea or fresh ice as structural material have not enough strength. Therefore, reinforcing and modification and on the other hand development new methods and improve existents one monitoring ways for ice are still investigating. In this paper non-destructive testing for certain natural and artificial structures applying for Arctic condition are reviewed. Radar data, local methods such as based on stress-strain, ultrasonic and acoustic emission data for estimate work's capacity structures are consider.

Keywords: ice, arctic materials, composite materials, monitoring, control methods, structural health monitoring.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) [Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)]; e-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

Арктический регион предъявляет высокие требования к функциональности и надежности используемых материалов и различных технических устройств и сооружений из них [1, 2]. Актуальным для Арктики является применение композиционных

материалов, объем которых как в мире, так и во многих отраслях промышленности за последнее время постоянно увеличивается [3, 4]. В настоящее время разработано значительное количество современных композиционных материалов для авиакосмической техники, условия эксплуатации которых близки к арктическим [5, 6]. Вместе с тем для строительства ряда конструкций или объектов, особенно протяженных (например, взлетно-посадочных полос, дорог, разгрузочных площадок и т. п.), в Арктике уже имеется хорошая основа для материала – лед, что во многом позволяет эффективнее осваивать этот район [7]. Поэтому в качестве основного материала для строительства протяженных объектов в Арктике рассматривается лед или композиционный материал на его основе.

Однако морской или пресный лед, как конструкционный материал, не обладает требуемыми прочностными качествами [8, 9], поэтому ведется активный поиск способов увеличения его прочностных свойств, в частности путем армирования и модифицирования [10, 11]. С учетом этого надежное функционирование конструкций и сооружений на основе льда требует мониторинга их состояния. В работе [12] рассматриваются современное состояние и уровень исследований и проектирования сооружений из природного льда. Авторы формулируют первостепенные задачи, одна из которых – оценка состояния конструкций в процессе их эксплуатации, а также наглядно показывают пути решения рассматриваемых задач с учетом природных особенностей с целью успешного освоения Арктики. Кроме того, мониторинг состояния конструкций успешно применяется во многих отраслях промышленности, например авиационной, строительной и др. [13, 14].

В данной работе приведен обзор неразрушающих методов мониторинга состояния конструкций, сооружений и естественных объектов на основе льда применительно к условиям Арктики. Рассматриваются методы мониторинга состояния объектов как с использованием снимков со спутников, по данным радиолокационных станций, так и локальные методы, базирующиеся на данных напряженно-деформированного состояния, ультразвуковых исследований, акустической и электромагнитной эмиссии.

В силу протяженности Арктики в первую очередь получили развитие методы мониторинга ее больших площадей, такие как анализ фотоснимков со спутника и использование радиолокационных данных. В ходе освоения арктического региона возникла необходимость в более локальных и точных методах мониторинга льда. Этот вопрос решался как путем совершенствования используемой спутниковой и радиолокационной аппаратуры, так и внедрения новых и уже существующих локальных методов, что позволило перейти к количественной оценке прочностных характеристик конструкций и сооружений на основе льда. В частности, хорошо зарекомендовавшие себя методы, базирующиеся на данных акустической эмиссии и ультразвуковых исследований, а также применяемые для контроля конструкций из металлических сплавов и полимерных композиционных материалов (ПКМ), начали опробовать для конструкций и сооружений на основе льда. Отметим, что метод оценки состояния конструкции в определенной степени связан с методом мониторинга, точнее – с методом измерения контролируемого параметра. Поэтому далее будем называть метод оценки состояния конструкции по методу определения контролируемого параметра и при необходимости уточнять, как именно определяем параметр.

Существуют разные виды мониторинга состояния конструкций и сооружений на основе льда, базирующиеся на определенных данных:

- 1 – радиолокационных станций (РЛС) и в оптической области спектра;
- 2 – напряженно-деформированного состояния (НДС);
- 3 – ультразвуковых исследований;

- 4 – акустической эмиссии (АЭ);
- 5 – электромагнитной эмиссии (ЭМЭ).

Следует отметить, что изначально и по настоящее время метод мониторинга 2 основывается на использовании тензодатчиков, а методы 3 и 4 – пьезоэлектрических преобразователей. В последнее время для решения задач мониторинга состояния конструкций и сооружений начинают применять оптоволоконные сенсоры: как, собственно, само оптоволокно (для протяженных объектов), так и, например, волоконные брэгговские решетки (ВБР) [15] для контроля локальных зон. Оптоволоконные сенсоры в сравнении с тензодатчиками более компактны, не подвержены электромагнитным помехам и коротким замыканиям и могут интегрироваться в единое оптоволокно. Оптоволокно достаточно легко интегрируется в композиционные материалы на основе льда в процессе заморозки. В работе [16] показано преимущество применения ВБР перед тензодатчиками. Кроме того, в случае использования оптоволоконных сенсоров методы мониторинга по данным напряженно-деформированного состояния, ультразвуковых исследований и акустической эмиссии могут быть объединены и применены в конструкции или сооружении одновременно.

Вместе с тем метод определения деформации по тензодатчикам хорошо освоен и опробован для измерения деформации льда [17–19], однако оптоволоконные сенсоры являются более надежным инструментом при их монтаже на поверхность льда или внедрении в его структуру, так как отсутствует короткое замыкание и при значительной контролируемой площади объекта монтаж сенсоров достаточно прост.

Мониторинг по данным радиолокационных станций и в оптической области спектра

Радиолокационные спутниковые данные, в частности данные зондирования радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), нашли широкое применение в исследованиях Арктики во многом благодаря всепогодности (независимости от облачности), возможности оценки ряда физических характеристик среды (например, скорости ветра, движения ледника, объема снежного покрова и размера его кристаллитов, наличия полыней, торосов и т. п.) и охвату значительной площади, что является полезной информацией при освоении и наблюдении за регионом.

В обзорной статье [20] представлены способы оценки температуры поверхности, количества снега, зоны и глубины его покрытия, водяного эквивалента снега, параметров ледника (границы его структурных зон, равновесная линия, скорости движения) и топографии его поверхности и поверхности ледяных щитов по данным спутникового зондирования на основе оптических методов и РСА. Авторы работы на конкретных примерах показывают результаты того или иного метода оценки параметров среды.

В работе [21] рассмотрена организация комплексной системы мониторинга морского льда на основе открытых спутниковых радиолокационных данных, поставляемых аппаратами семейства Sentinel-1 (серия спутников Европейского космического агентства), с применением автоматизированных алгоритмов классификации морского льда, вычисления плотных полей его дрейфа и обнаружения айсбергов на открытой воде. В зависимости от модификации используемого спутника ширина контролируемой зоны составляет от 80 км с пространственным разрешением 5×5 м до 400 км с пространственным разрешением 20×40 м.

Полезным является метод мониторинга с помощью сканирования поверхности лазерным дальномером и составления карты взаимного расположения макрообъектов в исследуемом районе. Путем сравнения предшествующих данных с текущими возможно отслеживать изменение рельефа местности, в том числе появление подъёмов/провалов

дорог или взлетно-посадочных полос, изменение рельефа склонов, развитие оврагов, движение ледников и т. п. Метод подходит для наблюдения за движением макрообъектов.

В эту же группу можно отнести мониторинг объектов по данным изменения координат, полученных с использованием навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС или GPS) в пространстве. Такой метод применяют при наличии устойчивого спутникового сигнала (отсутствуют помехи и объект расположен на поверхности земли) для контроля статических макроперемещений объекта (или его границ).

Мониторинг по данным напряженно-деформированного состояния

В работе [22] для наблюдения за образцами льда испытывали оптоволоконную систему мониторинга с использованием сенсоров на основе BOTDA/R (Brillouin optical time domain analysis/reflectometry) и ВБР. Мониторинг осуществляли по оценке НДС образцов за счет измерения деформации по ВБР и методом BOTDA/R. Для осуществления правильного (раннего) информирования о состоянии образца выбирали соответствующие места укладки оптоволокна, характер НДС и пороговые значения для уведомления о текущем состоянии. Отличия в значениях деформации, определяемой ВБР и методом BOTDA/R, составили в пределах 30 мк (1000 мк=0,1% относительной деформации). Авторы отмечают, что успешность работы такой оптоволоконной системы мониторинга определяется в первую очередь совместной деформацией сенсора и материала образца, и приходят к выводу, что данная система оценки и наблюдений пригодна для длительного мониторинга конструкций из льда.

В статье [23] исследовали деформацию образцов льда и композиционных материалов на его основе (КМЛ) в процессе их циклических испытаний на трехточечный изгиб при постоянной температуре с использованием внедренных в их структуру оптоволоконных сенсоров на основе ВБР. Показано, что волоконная брэгговская решетка определяет деформацию материала, способствует выявлению возникающих трещин в образце в процессе его частичного разрушения в ходе испытаний и в определенной степени локализует область разрушения в образце (в случае использования массива ВБР).

Важно отметить, что для ряда материалов, в том числе льда и КМЛ, мониторинг состояния только по результатам деформации/НДС неточен и должен быть дополнен анализом о состоянии дефектов материала. Данные исследования можно получить при использовании методов ультразвуковых испытаний или акустической эмиссии.

Мониторинг по данным ультразвуковых исследований

В исследовании [24] в лабораторных условиях продемонстрирован способ одновременного определения модуля упругости (E) и коэффициента Пуассона (μ) льда с использованием волн Лэмба, что, по мнению авторов, моделирует аналогичный эффект в арктическом льде с применением сейсмических волн. В работе использовали водопроводную воду для получения льда толщиной 0,01–0,02 м, чтобы смоделировать толщину арктического льда 1–5 м и частоту сейсмических волн до 100 Гц. Сейсмические волны моделировали пьезоэлектрическим источником ультразвука в диапазоне 1–100 кГц, а в качестве приемника использовали массив из 32 ультразвуковых датчиков. Эксперимент проводили при постоянной температуре -10 °С. В результате определены модуль упругости и коэффициент Пуассона на льду толщиной 9,25 мм ($E=9,27$ ГПа, $\mu=0,330$) и толщиной 20,50 мм ($E=9,53$ ГПа, $\mu=0,333$). Для сравнения полученных свойств льда использовали данные из работ [25, 26], в которых приведены близкие значения модуля упругости ($E=9,25$ ГПа) и коэффициента Пуассона ($\mu=0,325$) для аналогичных льда

и температуры испытаний. Сделан вывод о хорошей сходимости результатов эксперимента с реальными значениями.

Авторы статьи [27] провели исследование образцов поликристаллического льда методом резонансной ультразвуковой спектроскопии для изучения температурно-зависимых механических свойств материала. Показано, что для интерпретирования результатов ультразвукового контроля образцов льда необходимо знать температуру исследуемого материала, так как параметры прохождения ультразвуковой волны зависят от температуры льда. Предложенный метод оценки свойств льда может быть использован для калибровки ультразвуковых или сейсмических данных реальных ледников и ледяных щитов и обладает преимуществом в тех случаях, когда доставка образца затруднена или свойства льда могут измениться в результате подготовки образца к исследованию.

Мониторинг по данным акустической эмиссии

В статье [28] исследован метод оценки состояния образцов льда по данным АЭ при их одноосном сжатии и трехточечном изгибе. Описаны алгоритм анализа сигналов АЭ, параметры и настройка системы сбора данных, приведено описание происходящих процессов в образцах при наблюдении за АЭ. Состояние оценивают по структуре образца, мониторинг которой ведут по накопленной энергии, частоте пика (peak frequency), значениям параметров импульсов (RA, AF) и амплитудного распределения АЭ (b). По указанным параметрам оценивают тип и механизм разрушения образца льда. Используемые пьезоэлектрические сенсоры имели резонансный частотный диапазон 50–200 кГц, их закрепляли на образце с помощью резинового жгута, а для создания контакта между материалом и датчиком использовали силиконовую смазку.

В работе [29] проведены исследования сигналов АЭ в процессе индентирования образцов льда, что позволило установить области зарождения трещин, а также продемонстрировать сам факт регистрации появления трещин в образце.

В статье [30] показано, как в лабораторных условиях с помощью данных АЭ изучали дислокацию источников АЭ, расположение и образование микротрещин во льду, замороженном на гнейсе, что, по мнению авторов, моделирует образование трещин в леднике.

Авторы работ [31, 32], используя данные АЭ, исследовали образование дефектов и их локализацию при разрушении образцов из спрессованного снега в процессе сжатия с различной скоростью (1–10 мм/мин). В исследовании [31] проанализированы различные параметры сигналов АЭ (максимальная амплитуда, длительность импульсов и их частота и энергия и др.) и установлены значимые и характерные для разрушения (длительность импульса), показана взаимосвязь энергии импульса АЭ с размером зерна льда в снеге – с его уменьшением энергия импульсов возрастает. Кроме того, отмечено, что сигналы АЭ для таких материалов, как снег, достаточно слабые в силу особенностей строения такого материала и природы передачи импульсов. Предлагаемые методы оценки состояния по данным АЭ могут быть использованы для мониторинга масс снега и информирования о снежных лавинах.

В статье [33] проведены исследования движения льда в леднике и представлен его анализ с помощью метода АЭ в диапазоне частот 15–20 кГц. Оценены акустические характеристики поверхностного слоя ледника и влияние его трещиноватой структуры на распространение упругих волн. Отделены помехи, вызванные камнепадом и сейсмическими явлениями. Проанализированы спектрограммы сигналов АЭ в абляционном слое ледника. Установлена корреляция сигналов АЭ с различными масштабами движения в леднике. Каждому источнику этих сигналов в леднике соответствуют определенная

форма сигнала и характерные акустические параметры, что позволяет по параметрам сигналов АЭ судить об источнике, а следовательно, о движении льда в леднике.

Создана портативная измерительная акустическая линия и решен ряд методических вопросов. Акустические исследования ледникового льда проводили на ледниках Альдегонда (архипелаг Шпицберген, Норвегия), Центральный Туяксу и Молодежный (Северный Тянь-Шань, Казахстан), имитировали камнепад, трещинообразование в ледниках и их движение по ложу [33].

Полученные данные можно использовать для создания мобильной ледниковой лаборатории и системы дистанционного акустического мониторинга, в основе которой лежит метод деформационной АЭ, позволяющий изучать динамику движения льда в ледниках.

Мониторинг по данным электромагнитной эмиссии

В работе [34] показано возникновение ЭМЭ в процессе кристаллизации дистиллированной воды. Выявлены два типа импульсов ЭМЭ, отличающиеся длительностью переднего фронта, амплитудой и временем спада. Сделан вывод, что импульсы первого типа непосредственно связаны с кинетикой фазового превращения и отражают его нестационарность на мезоскопическом структурном уровне, а импульсы второго типа обусловлены развитием ростовых трещин. Отмечено также, что непрерывная составляющая ЭМЭ в виде шума, по-видимому, обусловлена суперпозицией большого числа стохастических событий кристаллизации на микроуровне, связанных с динамикой микроскопических ступенек роста, флуктуациями фронта кристаллизации и т. д. Предложенный авторами метод мониторинга кристаллизации льда основан на эффекте Воркмана–Рейнольдса, а используемая методика основывается на измерении (бесконтактным способом) электрической емкости объекта.

Авторы статьи [35] обнаружили и исследовали дискретную ЭМЭ, вызванную скачкообразной пластической деформацией и разрушением моно- и поликристаллического льда. Составлен альбом электромагнитных сигналов, позволяющий по их форме идентифицировать и исследовать кинетику мезоскопических событий структурной релаксации, связанных с динамикой дислокационных скоплений и трещин. Образцы изготавливали из пресноводного речного льда. Обнаружено, что развитие одиночной полосы скольжения в монокристаллическом образце на начальной стадии деформирования (относительная деформация образца 0,5–1%) сопровождается скачком деформации (0,1–1 мкм) и одновременным генерированием импульсов ЭМЭ первого типа. Развитие внутренних трещин длиной более 100 мкм на стадии развитой деформации (относительная деформация образца >3%) вызывает генерирование сигналов ЭМЭ второго типа и не вызывает заметного скачка деформации (в пределах чувствительности метода). Сделан вывод, что импульсы этих типов отражают два основных нестационарных процесса: скачкообразную пластическую деформацию и разрушение. Кроме того, форма переднего фронта импульсов первого типа отражает кинетику соответствующих процессов структурной релаксации.

Заключения

Мониторинг ледового покрова Арктики в целом и отдельных ее участков имеет важное значение для освоения этого региона. Для оценки состояния протяженных объектов, таких как взлетно-посадочные полосы, дороги (зимники), разгрузочные площадки, в первую очередь целесообразно использовать анализ по спутниковым снимкам, данным РЛС и локальные методы мониторинга объектов. Среди локальных методов необходимо отметить мониторинги по данным АЭ и НДС, которые хорошо себя зарекомендовали для

конструкций на основе металлических сплавов и ПКМ. Вместе с тем перспективным является использование в качестве чувствительного элемента оптоволоконных сенсоров (ВБР, само оптоволокно и др.), что позволяет объединить в едином оптоволокне множество точек контроля, а также в ряде случаев применить одну и ту же ВБР для оценки НДС и АЭ.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №18-13-00392).

Библиографический список

1. Дынкин А.А., Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Бузник В.М., Каблов Е.Н. и др. Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. 490 с.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
3. Петров А.В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2015. №8. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9.
4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
5. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. №3 (63). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
6. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // *75 лет. Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
7. Кравчук А.Н., Лысенко В.А. Удивительный композит – пайкерит // *Композитный мир*. 2015. №4 (61). С. 68–70.
8. Морской лед. Сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий: справочное пособие / под ред. И.Е. Фролова, В.Н. Гаврило. СПб.: Гидрометеоздат, 1997. 402 с.
9. Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Исследование прочности льда на изгиб в северо-восточной части Каспийского моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2014. №3. С. 62–68.
10. Бузник В.М., Ландик Д.Н., Ерасов В.С., Нужный Г.А., Черепанин Р.Н., Новиков М.М., Гончарова Г.Ю., Разомасов Н.Д., Разомасова Т.С., Устюгова Т.Г. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе ледяной матрицы // *Материаловедение*. 2017. №2. С. 33–40.
11. Черепанин Р.Н., Нужный Г.А., Разомасов Н.А., Гончарова Г.Ю., Бузник В.М. Физико-механические свойства ледяных композиционных материалов, армированных волокнами Русар-С // *Материаловедение*. 2017. №7. С. 38–44.
12. Masterson D.M. State of the art of ice bearing capacity and ice construction // *Cold Regions Science and Technology*. 2009. No. 58. P. 99–112. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.04.002.
13. Раскутин А.Е., Махсидов В.В., Смирнов О.И., Кашарина Л.А. Мониторинг нагруженности композитной конструкции арочного моста на основе волоконно-оптических датчиков // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. №3 (63). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-49-59.
14. Inaudi D. Combined static and dynamic monitoring of civil structures with long-gauge fiber optic sensor // *Proceedings of IMAC XXIII Conference and Exposition on Structural Dynamics*. Orlando, FL, 2005. P. 3.
15. Васильев С.А., Медведков И.О., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35. №12. С. 1085–1103.
16. Childers B.A., Froggatt M.E., Allison S.G. et al. Use of 3000 Bragg Grating Strain Sensors Distributed on Four Eight-Meter Optical Fibers During Static Load Tests of a Composite Structure // *Proceedings Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. 2001. P. 133–142.

17. Masterson D.M., Anderson K.G., Strandberg A.G. Strain measurements in floating ice platforms and their application to platform design // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1979. No. 6. P. 394–405.
18. Masterson D.M., Anderson K.G., Strandberg A.G. Strain measurements in floating ice platforms and their application to platform design: reply // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1980. No. 7. P. 565–568.
19. Gold L.W. Strain measurements in floating ice platforms and their application to platform design: discussion // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1980. No. 7. P. 564–565.
20. König M., Winther J.-G., Isaksson E. Measuring snow and glacier ice properties from satellite // *Reviews of Geophysics*. 2001. Vol. 39. No. 1. P. 1–27.
21. Казаков Э.Э., Волков В.А., Демчев Д.М. Система оперативного мониторинга морского льда в Арктике, основанная на открытых спутниковых радиолокационных данных // Сб. тез. докл. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (Санкт-Петербург, 8–10 нояб. 2017 г.). СПб.: Политехника, 2017. С. 33–39. URL: https://www.researchgate.net/publication/330366873_Sistema_operativnogo_monitoringa_morskogo_lda_v_Arktike_osnovanna_na_otkrytyh_sputnikovyh_radiolokacionnyh_dannyh (дата обращения: 01.10.2019).
22. Zhou Z., Huang M., He J., Chen G., Ou J. Ice structure monitoring with an optical fiber sensing system // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. No. 61 (1). P. 1–5. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.12.004.
23. Махсидов В.В., Смирнов О.И., Нужный Г.А., Разомасов Н.А., Гончарова Г.Ю., Бузник В.М. Исследование деформации ледовых композиционных материалов с использованием интегрированных оптоволоконных сенсоров // *Материаловедение*. 2020. №2. С. 26–31.
24. Moreau L., Lachaud C., Théry R. et al. Monitoring ice thickness and elastic properties from the measurement of leaky guided waves: A laboratory experiment // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017. Vol. 142. No. 5. DOI: 10.1121/1.5009933.
25. Gammon P.H., Kieffe H., Clouter M.J., Denner W.W. Elastic constants of artificial and natural ice samples by Brillouin spectroscopy // *Journal of Glaciology*. 1983. Vol. 103. No. 29. P. 433–460.
26. Schulson E.M., Duval P. Creep and fracture of ice. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. Vol. 1. P. 59.
27. Vaughan M.J., Van Wijk K., Prior D.J., Bowman M.H. Monitoring the temperature-dependent elastic and anelastic properties in isotropic polycrystalline ice using resonant ultrasound spectroscopy // *The Cryosphere*. 2016. No. 10. P. 2821–2829.
28. Li D., Du F. Monitoring and evaluating the failure behavior of ice structure using the acoustic emission technique // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. No. 129. P. 51–59. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.06.003.
29. Sinha N.K., Shkhinek K., Smirnov V. On borehole indenter (BHI) measurements and analysis // *Cold Regions Science and Technology*. 2012. No. 76–77. P. 109–120. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.01.009.
30. Duca S., Occhiena C., Mattone M. et al. Feasibility of Ice Segregation Location by Acoustic Emission Detection: A Laboratory Test in gneiss // *Permafrost and Periglacial Process*. 2014. No. 25. P. 208–219.
31. Datt P., Kapil J.C., Kumar A. Acoustic emission characteristics and b-value estimate in relation to waveform analysis for damage response of snow // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. No. 119. P. 170–182. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.08.005.
32. Reiweger I., Mayer K., Steiner K. et al. Measuring and localizing acoustic emission events in snow prior to fracture // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. No. 110. P. 160–169.
33. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Исследования ледников на основе акустических измерений // *Лед и снег*. 2013. №3 (123). С. 12–19.
34. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А., Татарко М.А. Взаимосвязь электромагнитной эмиссии с кинетикой роста поликристаллического льда // *Кристаллография*. 1999. Т. 44. №4. С. 717–721.
35. Шибков А.А., Желтов М.А., Скворцов В.В. и др. Электромагнитная эмиссия при одноосном сжатии льда. I. Идентификация нестационарных процессов структурной релаксации по электромагнитному сигналу // *Кристаллография*. 2005. Т. 50. №6. С. 1073–1083.