

ЛЕДОТЕХНИКА
ICE TECHNOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>
УДК 532.332 + 550.8.07



ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

REVIEW PAPER

МОНИТОРИНГ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
МОРСКОГО ЛЬДА И КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

В.Н. СМОРНОВ, С.М. КОВАЛЕВ, А.И. ШУШЛЕБИН, Н.В. КОЛАБУТИН,
М.С. ЗНАМЕНСКИЙ*

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

**skovalev@aari.ru*

Резюме

В статье дается обзор двух дополняющих друг друга направлений исследований морского льда, которые осуществляются Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ). Рассмотрены новые методы инструментального исследования физико-механических характеристик ледяного покрова. Приведены результаты определения локальной прочности льда на научно-исследовательском стационаре ААНИИ «Ледовая база Мыс Баранова». Рассмотрено применение контактного дистанционного метода мониторинга динамического состояния ледяного покрова с целью получения новых данных для создания метода прогнозирования явлений сжатия и разрушения морских льдов в режиме реального времени.

Ключевые слова: волновые процессы, зонд-индентор, ледники, ледяной покров, мониторинг, подвижки, прогноз, прочность, сейсмометр, торошение.

Для цитирования: *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Шушлебин А.И., Колабутин Н.В., Знаменский М.С.* Мониторинг физико-механического состояния морского льда и краткосрочное прогнозирование экстремальных ледовых явлений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 162–179. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>.

Поступила 07.05.2020

После переработки 10.06.2020

Принята 17.06.2020

MONITORING OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL STATE
OF SEA ICE AND SHORT-TERM PREDICTION OF EXTREME ICE
PHENOMENA

VICTOR N. SMIRNOV, SERGEY M. KOVALEV, ALEKSANDR I. SHUSHLEBIN,
NIKOLAY V. KOLABUTIN, MAKSIM S. ZNAMENSKIY*

*State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic research Institute,
St. Petersburg, Russia*

**skovalev@aari.ru*

Summary

The article presents the results of studies that complement each other. New methods of instrumental studies of the physical and mechanical characteristics of ice and ice cover are considered.

There is briefly described the complex system to developed in the AARI (Arctic and Antarctic research Institute) to determine the strength characteristics of ice formations in natural conditions. The results of determining the ice strength in wells (local strength) at the research station of AARI “Ice Base Cape of Baranov” are presented. The coefficient of comparison of local strength and strength of samples under uniaxial compression is obtained. This allows to determine the ice strength without sampling and testing of samples. On a large experimental material, linear and quadratic approximations for local ice strength were obtained. The influence of the indenter penetration rate on the local ice strength is studied.

There is considered the application of the contact remote method for monitoring the dynamic state of the ice cover in order to obtain new data for creating a method of predicting the phenomena of compression and destruction of sea ice in real time.

To study the large-scale mechanics of ice during dynamic processes in the air — ice — water system, a modular-block system for ice cover monitoring was developed. The layout of the system was tested in Arctic expeditions.

The developed complex system for determining the strength characteristics of ice formations in natural conditions and the modular-block system for monitoring the state of the ice cover complement each other, suggest their further development and improvement, provide wide opportunities for ice research

Keywords: borehole jack, forecast, glaciers, ice cover, monitoring, ridge, seismometer, shifts, strength, wave processes.

For Citation: Smirnov V.N., Kovalev S.M., Shushlebin A.I., Kolabutin N.V., Znamenskiy M.S. Monitoring of the physical and mechanical state of sea ice and short-term prediction of extreme ice phenomena. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 162–179. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>.

Received 07.05.2020

Revised 10.06.2020

Accepted 17.06.2020

ВВЕДЕНИЕ

Стремительные темпы освоения шельфовых зон и расширение маршрутов движения судов в арктических морях вызвали необходимость усиленного изучения состояния ледяного покрова полярных областей.

Решение задачи краткосрочного прогнозирования опасных динамических процессов в ледяном покрове, приводящих к разрушениям арктического льда различного масштаба, стало возможным в результате развития научно-технических средств и приемов мониторинга для надежного и оперативного контроля действующих внешних и внутренних сил в системе «атмосфера–лед–вода» и мониторинга крупномасштабных прочностных характеристик ледяного покрова. Для этого проводятся исследования льда как материала, как конструкции и как геофизической среды. Такой подход обеспечивает решение научных задач, задач безопасного пребывания людей и технических средств на ледяном покрове, проектирование и эксплуатацию гидротехнических сооружений, расширяет возможности ледового плавания.

Развитие методологии исследования морского льда проводится по следующим основным направлениям:

– разработка методов получения данных по характеристикам полномасштабной прочности морского льда как одного из основных параметров, учитываемых при создании математических моделей и решении научных и прикладных задач;

– совершенствование возможностей мониторинга физико-механического состояния ледяного покрова и выявление прогностических признаков явлений сжатия и торошения.

Основы такого подхода закладывались еще в прошлом веке, например, в работе Ф. Мальмгрена, посвященной исследованиям свойств морского льда [1]. Также можно отметить статью Г. Робина, который проследил особенности распространения волн океанической зыби под дрейфующими льдами Антарктиды [2]. Последующие исследования подтвердили, что зыбь оказывает постоянное динамическое воздействие на ледяной покров. В прикромочных и припайных областях это воздействие приводит к разрушению льда. В Центральном Арктическом бассейне происходит энергетическая накачка, особенно контактных зон ледяных полей, находящихся в условиях сжатия, тем самым повышается энергонасыщенность среды, что может приводить к лавинообразному распаду поля напряжений всей системы. Поэтому гравитационные волны в океане, покрытом льдом, можно рассматривать как структурообразующий фактор по отношению к ледяному покрову [3]. Кроме того, ледяной покров является сложной механической системой, сформированной из большого числа элементов (льдин), горизонтальные размеры которых намного больше вертикальных, т.е. представляет собой «мозаику пластин». Отличительной особенностью такой структуры является относительная подвижность отдельных блоков и способность среды испытывать значительные деформации без разрушения ее элементов за счет деформирования межблочных зон. При этом плотность упаковки льдин наименьшая в прикромочных зонах и максимальная в Центральном Арктическом бассейне. Исходя из сказанного, ледяной покров можно считать дискретной механической средой, подобной земной коре, плавающей на мантии, его отличительной особенностью является скорость протекания в нем деформационных процессов, и поэтому ледяной покров можно рассматривать как своеобразную механическую модель земной коры. Таким образом, методы, применяемые в сейсмологии и в сейсмометрии, можно адаптировать для изучения ледяного покрова, особенно в области формирования трещин и разломов [4], а также с точки зрения механики дискретных сред [5].

В рамках первого направления в ААНИИ применяется оригинальный инструментальный комплекс для определения физико-механического состояния припайных и дрейфующих льдов [6]. Разработан метод определения характеристик прочности льда на сжатие в натуральных условиях в скважинах и на образцах. С помощью скважинного зонд-индентора осуществляется съемка локальной прочности как по площади, так и по толщине ровного льда, консолидированного слоя в торосах и стамухах. Получены данные по локальной прочности в зависимости от температуры и солености, скорости внедрения индентора и анизотропии льда.

В рамках второго направления, основы которого заложены в работе В.Н. Смирнова [7], предложен дистанционный метод мониторинга динамического состояния льдов, позволяющий получать масштабные характеристики как волновых процессов в ледяном покрове, так и процессов сжатия, торошения и образования разрывов.

Задача обзора — познакомить читателя с двумя направлениями деятельности ААНИИ, показать достигнутые результаты и перспективы их применения и развития.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ В СКВАЖИНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОНД-ИНДЕНТОРА

Определение прочности льда с помощью скважинного зонд-индентора рекомендовано в российских строительных нормах СП 11-114-2004 [8] и международном стандарте ISO [9]. Возможности скважинного зонд-индентора позволяют существенно повысить качество измерений и улучшить точность вычислений ледовых нагрузок на сооружения, а также более корректно проводить сравнительный анализ характеристик прочности льда в различных регионах.

Известен гидравлический зонд-индентор (borehole jack) [10, 11, 12], который используется за рубежом для определения характеристик прочности льда в скважинах, представляющий собой гидроцилиндр с выдвижным штоком, на котором закреплен индентор в виде круга, вырезанного из стенки цилиндра. При этом радиус кривизны индентора совпадает с радиусом скважины, что обеспечивает плотное прилегание индентора к стенке скважины. Противоположная опорная часть гидроцилиндра также выполнена с радиусом кривизны, совпадающим с радиусом скважины. Площадь опорной части и площадь индентора равны. При проведении испытаний происходит внедрение как индентора в стенку скважины, так и противоположной опорной его части.

Недостатком являются частые перекосы устройства при испытаниях, что ведет к искажению информации. Внедрение устройства в обе стороны скважины уменьшает глубину проникновения индентора и не дает возможности получить полную характеристику прочности при разрушении льда. Кроме того, существенным недостатком является уменьшающаяся скорость выдвижения штока с индентором при увеличении давления в гидросистеме устройства.

В связи с этим в ААНИИ была разработана технология определения прочности льда в натуральных условиях при внедрении индентора в стенку скважины, выбуренной в ледяном покрове. Для этого был сконструирован и изготовлен специализированный комплекс оборудования и разработана методика его применения [6].

Оригинальность определения характеристик прочности ледяных образований в натуральных условиях связана с устройством гидравлического типа, которое обеспечивает измерение силы при внедрении индентора (штампа) определенной площади в стенку скважины с разрушением льда. При этом внедрение индентора происходит с одной стороны скважины при отсутствии внедрения с другой за счет наличия опорной плиты, превосходящей площадь индентора в десять раз. Кроме того, скорость внедрения остается постоянной, но ее можно регулировать от очень низкой до 4,5 мм/с для различных задач.

Во время испытаний фиксируются заглубление зонда в скважине, давление в гидросистеме, время нагружения, глубина внедрения индентора в стенку скважины, а также регистрируются процессы трещинообразования во льду.

При взаимодействии зонда со льдом наблюдаются три этапа внедрения индентора в стенку скважины.

Первый этап завершается возникновением первой трещины и характеризует начальный момент внедрения индентора.

Второй этап нагружения завершается разрушением некоторого объема льда (локальная прочность), приводящим к образованию зоны смятия и радиальных трещин. Этот процесс носит лавинообразный характер, и его длительность не превышает нескольких секунд.

На третьем этапе нагружения наблюдаются в основном три типа взаимодействия индентора со льдом. Первый тип характеризуется проникновением индентора сквозь зону смятия при практически постоянном напряжении, которое ниже разрушающего на 20–40 % (постразрушающее напряжение). Второй тип взаимодействия характеризуется тем, что постразрушающее напряжение не меньше локальной прочности. При третьем типе взаимодействия одна из радиальных трещин превращается в магистральную сразу же после достижения разрушающих напряжений. Прочность льда определяется в трехмерном напряженном состоянии локального объема, поэтому используется термин «локальная прочность льда».

Сравнение прочности образцов льда при одноосном сжатии и локальной прочности льда в скважинах

По разным литературным данным, локальная прочность превышает прочность образцов льда при одноосном сжатии в 2–5 раз [10–15]. До сих пор еще не разработан универсальный коэффициент для надежной связи локальной прочности с прочностью образцов льда при одноосном сжатии. Это связано с тем, что вокруг индентора при его внедрении в стенку скважины развивается сложное поле напряжений, отличающееся от того, которое встречается в образце в прессе даже при трехосном нагружении. Факторы, которые влияют на прочность малых образцов льда при нагружении в прессе (скорость деформации, направление нагрузки), менее важны для определения локальной прочности. Дело осложняется и тем, что в нормативных документах [8, 9, 16] не регламентированы некоторые условия при проведении испытаний образцов льда при одноосном сжатии. Тем не менее результаты испытаний ледяного покрова с помощью скважинного зонда могут быть использованы для оценки прочности льда при одноосном сжатии. В работе [10] приведено следующее соотношение:

$$2 \leq \frac{\sigma_u}{\sigma_{||}} \leq 4,$$

где: σ_u — напряжения во льду при внедрении индентора; $\sigma_{||}$ — прочность образцов льда при одноосном сжатии в направлении, параллельном поверхности льда, и с поперечными размерами, соизмеримыми с диаметром индентора.

Нижний предел соответствует напряжениям в начальный момент внедрения индентора в ледяной покров. Верхний предел обусловлен прочностью льда в условиях всестороннего сжатия.

В работе [12] выполнен сравнительный анализ результатов определения локальной прочности льда с помощью скважинного зонда при диаметре индентора 9 см и данных испытаний на одноосное сжатие цилиндрических образцов диаметром 7,5 см. Среднее значение соотношения $\sigma_u / \sigma_{||}$ оказалось равным 4,1. Имеются данные, где соотношение между напряжением внедрения и прочностью образцов льда при одноосном сжатии достигает большей величины [13–15].

При проведении сравнительных экспериментов мы придерживались однотипных условий для определения прочности льда при одноосном сжатии.

В нормативных документах используется прочность льда, измеренная на основании испытания образцов. Поэтому был предложен способ сравнения прочности льда, полученной на образцах, и локальной прочности, определенной в натуральных

условиях. Для этого комплексная система была дополнена специально разработанным прессом, который подключается к той же гидростанции, что и зонд-индентор.

Скорость выдвижения пуансона прессы регулируется в том же диапазоне скоростей, что и скорость выдвижения штока зонд-индентора, это обеспечивает хрупкое разрушение и согласование времени нагружения до разрушения льда в скважине и образца льда в прессе. Такой подход повышает корректность сравнения прочности льда в натуральных условиях и прочности образцов льда.

Для определения коэффициента сравнения прочности образцов льда при одноосном сжатии и локальной прочности льда в скважинах образцы изготавливаются из цилиндрических кернов, выбуренных параллельно поверхности ледяного покрова.

В таблице приведены результаты определения соотношения между локальной прочностью ледяного покрова (σ_{lc}) и прочностью образцов льда при одноосном сжатии, изготовленных параллельно поверхности льда ($\sigma_{||}$), для различных замерзающих морей России.

Таблица

Соотношения между локальной прочностью ледяного покрова (σ_{lc}) и прочностью образцов льда ($\sigma_{||}$), отобранных параллельно поверхности намерзания, при одноосном сжатии

Table

Relations between the local strength of ice cover (σ_{lc}) and the strength of ice samples ($\sigma_{||}$), taken parallel to the freezing surface under uniaxial compression

Параметры наблюдения	Обская губа	Охотское море, шельф о. Сахалин	Байдарцкая губа	Байдарцкая губа	Пролив Невельского	Карское море	Карское море	Море Лаптевых	Карское море	Море Лаптевых
Период исследования	05.2004	04.2006	05.2007	05.2010	03.2010	05.2013	04.2014	05.2014	04.2015	05.2015
Диапазон изменения температуры льда, °С	-2,9... -6,2	-2,0... -4,8	-0,6... -3,1	-0,4... -3,2	-1,6... -7,3	-1,8... -5,2	-1,8... -6,2	-2,2... -3,9	-1,9... -5,1	-1,8... -4,5
Диапазон изменения солености льда, ‰	0	0,4-7,9	1,2-5,8	0,2-5,8	0,9-2,3	2,0-9,5	1,0-7,0	4,5-6,4	3,3-5,7	3,5-7,0
$\sigma_{lc}/\sigma_{ }$	4,7	4,8	4,6	4,7	4,1	4,9	4,7	4,5	5,0	4,9

Среднее значение соотношений составляет 4,6, стандартное отклонение 0,3. Полученные значения соотношений достаточно однородны (коэффициент изменчивости всего 6,5 %).

Таким образом можно допустить, что на основании испытаний локальной прочности льда возможно оценивать прочность ледяного покрова при сжатии, не выбуривая керны и не испытывая образцы льда под нагрузкой. Такой подход позволяет устранить несовершенство традиционной методики испытания прочности образцов льда. Коэффициент сравнения $\sigma_{lc}/\sigma_{||}$ в соответствии с существующими, в том числе и международными, нормативными документами [9] может служить одним из пара-

метров для определения расчетной прочности льда и, соответственно, для расчета ледовых нагрузок на морские сооружения арктического шельфа.

Зависимость локальной прочности от температуры льда

В настоящее время научно-исследовательский стационар (НИС) «Ледовая база Мыс Баранова» является единственной станцией в западной части моря Лаптевых, на которой можно проводить регулярные комплексные наблюдения за состоянием морского снежно-ледяного покрова и материкового льда [17]. Стационар на о. Большевик арх. Северная Земля возобновил постоянную работу в 2013 г. Практически сразу были организованы ледоисследовательские работы. С 2016 г. был начат мониторинг локальной прочности льда. За прошедшее время было проведено достаточно большое количество измерений. На ровном однолетнем льду испытания проводились на ледовых полигонах размером 100×100 м.

Полученные данные позволили установить зависимость локальной прочности льда от его температуры:

$$\sigma_{ic} = 15,6 - 1,23T_i, R^2 = 0,60; \quad (1)$$

$$\sigma_{ic} = 13,61 - 1,88T_i - 0,04T_i^2, R^2 = 0,61, \quad (2)$$

где: σ_{ic} — локальная прочность в МПа, T_i — температура льда в °С, R — коэффициент корреляции.

Зависимости (1) и (2) получены на большом количестве экспериментальных данных (759 значений), в диапазоне температур от -18 до $-1,8$ °С дают близкие значения и имеют неплохой коэффициент корреляции. В указанном диапазоне температур льда значения локальной прочности, рассчитанные по формуле (1), изменяются от 17,1 до 37,7 МПа, рассчитанные по формуле (2) — от 16,9 до 34,5 МПа. При температуре льда -18 °С 99-процентный доверительный интервал для формулы (2) имеет наибольшее значение от 31,3 до 37,7 МПа. С увеличением температуры льда размах такого интервала уменьшается. При $-1,8$ °С его значения от 16,0 до 17,8 МПа. Для формулы (1) 99-процентный доверительный интервал имеет меньший размах: от 36,6 до 38,8 МПа при температуре льда -18 °С и от 17,1 до 18,5 МПа при $-1,8$ °С. Это позволяет сделать вывод, что температура льда является одним из самых значимых факторов для локальной прочности. Наибольшие расхождения с экспериментальными данными формулы (1) и (2) имеют при высоких температурах льда. В холодное время высокие температуры льда наблюдаются вблизи нижней поверхности. В таких экспериментах невозможно визуально наблюдать сколы льда и, соответственно, отбраковывать полученные данные. Высокие температуры льда наблюдаются также и в летний период, когда идут процессы разрушения ледяного покрова. В таких случаях даже при одинаковой температуре ледяной покров может находиться в разных стадиях своего разрушения и иметь отличающиеся значения локальной прочности.

В работе М. Джонстона (Johnston) [18] приведена квадратичная зависимость локальной прочности однолетнего льда от его температуры:

$$\sigma = 4,53T_i - 3,07 - 0,08T_i^2 \quad (3)$$

Зависимость (3) также получена на достаточно большом количестве экспериментальных данных (431 измерение в 102 скважинах), на недеформированном припае в Канадском секторе Арктики в зимнее, весеннее и летнее время.

Зависимости (1) — (3) приведены на рис. 1.

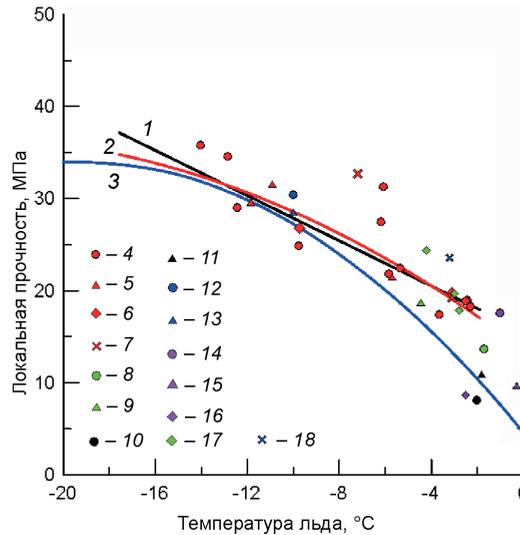


Рис. 1. Зависимость локальной прочности льда от температуры:

1 — линейная аппроксимация по данным на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (2017–2019 гг.); 2 — аппроксимация полиномом 2-й степени по данным на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (2017–2019 гг.); 3 — аппроксимация полиномом 2-й степени Джонстона [18]; 4–7 — среднее значение локальной прочности на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» в 2019, 2018, 2017 и 2016 гг. соответственно; 8 — среднее значение локальной прочности в Анадырском лимане в 2008 г.; 9 — среднее значение локальной прочности льда пролива Невельского (экспедиция «Сахалин-2010»); 10, 11 — среднее значение локальной прочности в Байдаратской губе в 2007 и 2010 гг. соответственно; 12 — из работы [14]; 13 — из работы [19]; 14–16 — среднее значение локальной прочности в Каспийском море в 2001–2003, 2004–2008 и 2013 гг. соответственно; 17 — среднее значение локальной прочности в экспедиции «Трансарктика-2019»; 18 — среднее значение локальной прочности в экспедиции MOSAiC

Fig. 1. Dependence of the local ice strength on the ice temperature:

1 — linear approximation based on data at the station «Ice Base Cape Baranov» (2017–2019); 2 — approximation by the polynomial to the power of 2 based on data at station «Ice Base Cape Baranov» (2017–2019); 3 — approximation by the Johnston’s polynomial to the power of 2 [18]; 4–7 — average local ice strength value at the station «Ice Base Cape Baranov» in 2019, 2018, 2017 and 2016, respectively; 8 — average local ice strength value in Anadyr’ estuary in 2008; 9 — average local ice strength value of Nevelskoy Strait («Sakhalin-2010» Expedition); 10, 11 — average local ice strength value in Baidaratskaya Bay in 2007 and 2010, respectively; 12 — from [14]; 13 — from [19]; 14–16 — average local ice strength value in the Caspian Sea in 2001–2003, 2004–2008 and 2013, respectively; 17 — average local ice strength value in the “Transarctic-2019” Expedition; 18 — average local ice strength value in the MOSAiC Expedition

Из рис. 1 видно, что зависимости (2) и (3) в диапазоне температур льда от -20 до -8 °C дают близкие значения. При температуре льда выше -8 °C значения локальной прочности, рассчитываемые по формуле (3), ниже значений, получаемых по формуле (2). Наибольшие расхождения наблюдаются при температурах, близких к температуре плавления льда.

На рис. 1 приведены также средние значения локальной прочности, полученные в различных экспедициях. Видно, что полученные данные согласуются с предложенными зависимостями. При высоких температурах льда зависимость (3) лучше согласуется с данными, полученными для льда, находящегося на высокой стадии разрушения (Каспийское море в 2004, 2008 и 2013 гг.; Байдаратская губа в 2007

и 2010 гг.). Зависимость (2) при высоких температурах лучше описывает локальную прочность льда, находящегося на начальных стадиях разрушения (Каспийское море в 2001–2003 гг.).

Локальная прочность льда при разных скоростях внедрения индентора

Исследования влияния скорости внедрения индентора на локальную прочность проводились на НИС «Ледовая база Мыс Баранова». При работе от гидростанции внедрение индентора происходило при скоростях 4,0, 2,0 и 0,5 мм/с.

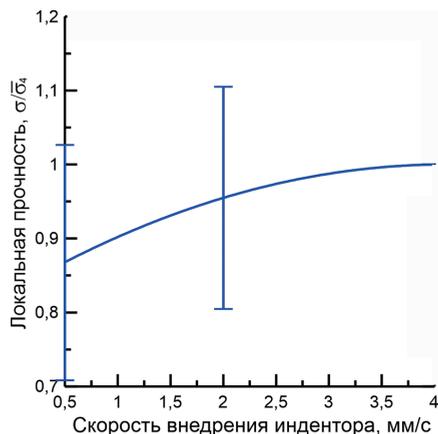


Рис. 2. Изменение локальной прочности льда в зависимости от скорости внедрения индентора

Fig. 2. Change in ice local strength depending on the borehole jack penetration rate

Изменение значений локальной прочности льда в зависимости от скорости внедрения индентора представлено на рис. 2.

Экспериментальных данных пока немного, поэтому стандартное отклонение велико. Квадратичная аппроксимация полученных значений имеет вид:

$$\sigma_V / \bar{\sigma}_4 = 0,829 + 0,083 \cdot V - 0,010 \cdot V^2, \quad (4)$$

где σ_V — локальная прочность льда при внедрении индентора со скоростью V ; $\bar{\sigma}_4$ — средняя локальная прочность льда при внедрении индентора со скоростью 4,0 мм/с; V — скорость внедрения индентора, $0,5 \leq V \leq 4,0$ мм/с.

В исследованном диапазоне скоростей внедрения индентора локальная прочность изменялась мало. Наибольшая локальная прочность наблюдалась при внедрении индентора со скоростью 4,0 мм/с; наименьшая — со скоростью 0,5 мм/с. В среднем такая локальная прочность была меньше максимальной на 13 %. При внедрении индентора со скоростью 2,0 мм/с локальная прочность уменьшается на 4,5 % по сравнению с максимальной.

Небольшое влияние скорости нагружения на локальную прочность отмечается Джонстоном [18]. Следует отметить, что в этой работе изменяется не скорость внедрения индентора, а скорость напряжений. При уменьшении скорости напряжения в 5 раз локальная прочность уменьшилась на 6 %. При уменьшении в 5 раз скорости внедрения индентора по формуле (4) локальная прочность должна уменьшиться на 11 %.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОРСКИХ ЛЬДОВ И АРКТИЧЕСКИХ ЛЕДНИКОВ

Исследование крупномасштабной механики льдов при динамических процессах в системе «воздух–лед–вода» позволяет выявлять пространственно-временные связи различного масштаба. Для этого применяются сейсмометры, наклонометры, деформометры, датчики давления и напряжения, которые расставляются по ледяному покрову по разным схемам и в различном сочетании в зависимости от решаемых задач. Как пример можно привести явление крупномасштабных сдвиговых подвижек в сплошном ледяном покрове, возникающих на разрывах в дрейфующем льду. В этом случае на протяженном контакте лед–лед наблюдаются периодические горизонтальные подвижки и упругие волны с периодичностью до 30 мин [20].

На основе большого объема натуральных данных в ААНИИ разработаны методические пособия [6, 21], в которых представлено состояние вопроса по данной теме, дается описание устройств, приборов и методик их применения.

Измерительная техника

Инструментальный мониторинг состояния арктического льда основывается на применении комплекса первичных датчиков, передающих устройств, регистрирующей и обрабатывающей техники. При этом датчики как первичные приборы должны регистрировать целый комплекс физических параметров: смещение, деформации, наклоны, напряжения, ускорения. Деформометры применяются для измерения относительного смещения двух точек сплошного льда; наклонометры — для наблюдений за колебательными процессами с периодами от 1 с до квазистатических наклонов; измерители давления во льду используются совместно с сейсмометрами и наклонометрами с целью определения напряжений при деформировании вплоть до разрушения ледяных полей. Молекулярно-электронные сейсмометры типа СМЕ-4111LT применяются для регистрации колебаний и волн в ледяном покрове в широком частотном диапазоне от 0,0167 до 50 Гц. Регистрация сигналов осуществляется через плату АЦП на ноутбук или на специализированный накопитель информации «Байкал». Мобильный регистратор сейсмических сигналов высокого разрешения «Байкал-7HR» предназначен для автономной записи сигналов от СМЕ в широком диапазоне частот с привязкой к абсолютному времени. Такой регистратор можно применять как для оперативных, так и для длительных измерений с встроенным высокостабильным генератором и модулем GPS в совокупности с аналого-цифровым трактом.

Накопленный материал натуральных исследований позволил создать макет измерительного комплекса для мониторинга механического состояния морских ледяных полей и метод оповещения о возможных опасных ледовых явлениях [22]. Метод основан на разработанной измерительной системе, состоящей из трех модульно-блочных полевых станций, которые расставляются по треугольной схеме в вершинах прямоугольного треугольника, модуля базовой станции сбора и обработки данных, поступающих с полевых станций. При этом базовая станция может устанавливаться на судне, на берегу или на ледяном покрове. Передача данных с полевых станций осуществляется по радиоканалу в автоматическом режиме. Временная синхронизация между полевыми станциями осуществляется посредством приема сигнала глобальной спутниковой системы позиционирования GPS. Одновременно с записью на сервер осуществляется обработка данных по определенному алгоритму в режиме реального времени с выводом на дисплей, что позволяет оперативно выделять разломы льда.

Необходимо отметить, что модульно-блочное строение измерительной системы мониторинга обеспечивает возможность гибкого формирования схем наблюдений и измерений для решения как научных, так и практических задач. Как пример можно рассмотреть крупномасштабные эксперименты с использованием ледокола [23].

В экспедициях в морях Карском и Лаптевых для определения характеристик прочности полей ровного льда на изгиб проведены крупномасштабные эксперименты разрушения льда ледоколом «Ямал» (рис. 3).



Рис. 3. Схема размещения приборов на ровном льду при проведении экспериментов при движении ледокола (а), фотография эксперимента (б):

1 — сейсмомер, 2 — наклономер, 3 — деформометр, 4 — регистратор, 5 — набор аккумуляторов

Fig. 3. The scheme of the arrangement of devices on level ice during experiments with the icebreaker movement (а), experiment photo (б):

1 — seismometer, 2 — tiltmeter, 3 — deformometer, 4 — recorder, 5 — battery pack

В ровном ледяном поле регистрировались параметры вертикальных и горизонтальных смещений льда, а также относительные деформации в верхнем слое ледяного поля, создаваемые при ломке льда и возбуждении колебательных и волновых процессов в системе «лед–вода». Расстояние по профилю «ледокол–приборы» составляло сотни метров. Получаемые параметры волновых процессов, сопровождаемые деформациями изгиба ледяного поля, дают возможность оценить возникающие напряжения при изгибе.

Начальный момент движения ледокола сопровождался прорезанием льда. Механика прорезания создавала вибрацию в системе «ледокол–лед», передающуюся через контакт в ледяное поле и регистрируемую приборами на льду на расстоянии до 500 м. Это позволяет оценить скорость упругих волн в ледяном поле на частотах десятки Гц. Одновременно с прорезанием льда форштевнем ледокола наступал период ломки ледяного поля изгибом. Возникающие при этом вертикальные колебания в системе «лед–ледокол» создавали изгибно-гравитационные волны, распространяющиеся на сотни метров от ледокола.

Расчет проводился при толщине льда 1 м. Максимальное напряжение сжатия-растяжения в верхнем слое льда при изгибе ледяного поля оценивалось как 20 кПа при относительной деформации $4 \cdot 10^{-6}$ и модуле упругости $5 \cdot 10^3$ МПа. Данные совпадают со значениями относительной деформации, измеренными непосредственно деформометром в одной точке в верхнем слое ледяного поля. Разрушающие напряжения можно измерить только в случае непосредственного разлома рядом с приборами.

Разработанные методы открывают возможности для получения новых результатов при определении крупномасштабной прочности льдов и учета динамических нагрузок на сооружения шельфа.

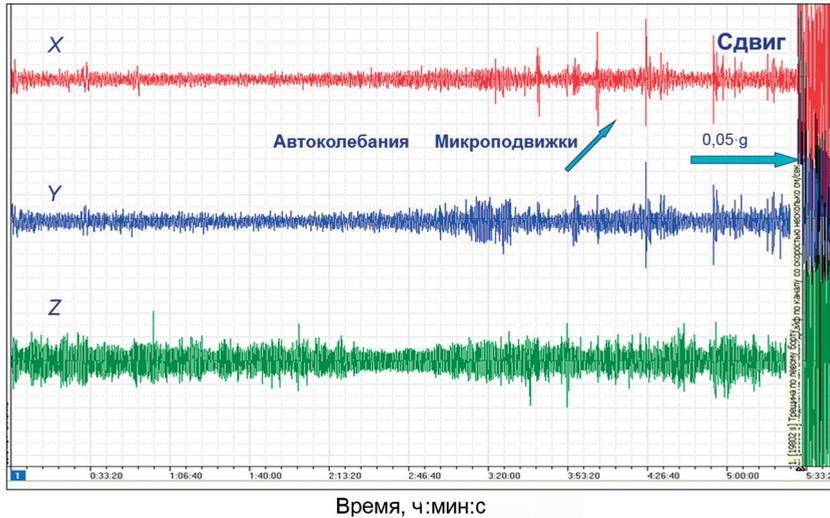


Рис. 4. Запись сейсмометров в дрейфующем ледяном покрове, Карское море, 18.04.14. Длительность процесса 5 ч 45 мин.

Fig. 4. Recording of seismometers in a drifting ice cover, the Kara Sea, 18.04.14. The duration of the process is 5 hours 45 min

Пример уникальной информации и возможности прогнозирования разломов ледяных полей и начала сжатия и торошения представлен на рис. 4.

При мониторинге состояния льда в Карском море за 3 часа до разлома возникли ледовые импульсы, рассматриваемые нами как прогностические признаки развития магистральной трещины, а также дальнейшей сдвиговой подвижки.

Динамику морских льдов необходимо рассматривать как сумму факторов, приводящую к значительным ускорениям при дрейфе. К динамическим процессам следует отнести кроме сжатия и торошения льдов волновые и колебательные явления в диапазоне периодов ветровых волн и зыби. На многих ледовых станциях регистрировались автоколебательные процессы, отражающие сжатия и подвижки при дрейфе. Длительность автоколебательных процессов составляла десятки минут, в спектре колебаний при этом устойчиво сохранялись низкочастотные горизонтально-поляризованные составляющие. Параметры этих колебаний в основном определялись свойствами системы взаимодействия «лед–лед». Автоколебательные процессы развиваются на пространстве десятков километров и могут служить прогностическими признаками возникновения сдвиговых подвижек в морских льдах.

Схема расстановки приборов на льду

В натурных экспериментах по изучению физики распространения волн во льду используются различные схемы расстановки датчиков. Линейные расстановки с интервалом между датчиками от 2 до 500 м позволяют определять скорость распространения упругих (продольных, поперечных, изгибных) и гравитационных волн в широком частотном диапазоне. В экспериментах с заранее известным расположением источника волн (например, от взрыва, удара, движения трактора, ледокола...) фазовая скорость C определяется по коррелируемым фазам групп волн.

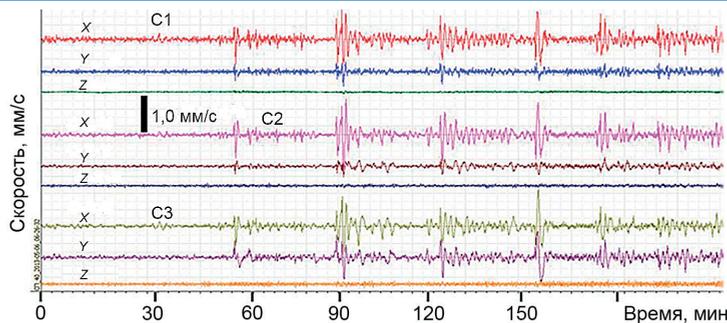


Рис. 5. Фрагмент исходной записи динамического процесса в дрейфующем ледяном покрове при пространственной расстановке трехкомпонентных (X, Y, Z) сейсмометров по треугольнику со сторонами 300 м, «Северный полюс-40», 06.05.13

Fig. 5. Fragment of the initial recording of the dynamic process in drifting ice cover during the spatial arrangement of three-component (X, Y, Z) seismometers on a triangle with sides of 300 m, «North Pole-40», 06.05.13

Разработанные схемы расстановки приборов позволяют получать данные, способные раскрыть новые явления, их физику, а также применить их в теоретических моделях. На рис. 5 представлен один из примеров периодических горизонтальных смещений в сплоченном ледяном покрове Северного Ледовитого океана (СЛО), которые можно представить как крупномасштабные релаксационные автоколебания [20].

Процесс может длиться несколько часов и состоять из периодических сбросов напряжений с интервалами от единиц до десятков минут. Формирование автоколебаний обусловлено процессами сжатия сплоченных льдов, образованием протяженного разрыва в ледяном покрове и периодическим смещением по разрыву. Периодичность смещения может быть объяснена на основе упруго-вязких свойств льда на контакте протяженной трещины/разрыва. Механика разрыва ледяного покрова горизонтальным сдвигом и последующее периодическое смещение в зоне разлома сопровождаются излучением упругих горизонтально поляризованных волн с частотой от 0,02 Гц до 0,10 Гц.

Подобные схемы расстановки приборов на дрейфующем льду для определения параметров волновых процессов при сжатии и торошении, а также океанической зыби применялись в экспедициях «Северный полюс-22, 24», «Трансарктика» и MOSAiC. Эти наблюдения позволяют исследовать динамику морского льда и ее связь с глобальной, мезомасштабной и локальной циркуляциями, а также с энергообменом в системе «атмосфера–океан» через пограничный слой. Также система имеет практическое применение при мониторинге, что обеспечивает возможность характеризовать состояние конкретного ледяного поля и давать прогностические оценки степени стабильности данного региона в ближайший промежуток времени [22, 24].

Первичными звеньями системы являются полевые станции сбора данных от присоединенных датчиков: трехкомпонентные датчики скорости движения поверхности; трехкомпонентные датчики скорости вращения поверхности; трехкомпонентные датчики ускорения движения поверхности; датчики внутренних напряжений во льду; датчики давления во льду; двухкомпонентные датчики наклона/ускорения движения поверхности. Полевые станции производят оцифровку данных от датчиков с дискретной частотой. При этом сбор данных со всех каналов на станциях

синхронизирован с помощью глобальной системы позиционирования. Информация сохраняется в локальном хранилище и, кроме того, по радиоканалу отправляется на сервер сбора данных базовой станции в режиме реального времени. Каждая полевая станция оснащается геолокационным модулем, который передает ее координаты через спутниковый радиоканал на базовую станцию, что позволяет знать точное расположение полевых станций вне зависимости от работоспособности основного радиоканала. Кроме того, учитывая значительную удаленность полевых станций (до 20 км), это обеспечивает сохранность оборудования, значительно облегчает поиск станции для проведения профилактических работ, настройки датчиков, замены энергоносителей, экономит авиатопливо и время. Расстановка полевых станций по прямоугольному треугольнику позволяет определять физические параметры проходящих волн, такие как фазовая скорость и азимут распространения волн.

Базовая станция может располагаться на судне или в полевом лагере. Она состоит из приемника/передатчика основного радиоканала, вторичного радиоканала для локальной передачи данных между выносным передатчиком основного радиоканала и сервером сбора данных. Сервер сбора данных принимает информацию от полевых станций в режиме реального времени по радиоканалу. Также сервер сбора данных осуществляет вывод получаемой информации на графический дисплей в виде волновых профилей с принимаемых каналов от всех полевых станций с возможностью частотной обработки для выделения интересующей дежурного оператора информации. В дальнейшем предполагается создание программного комплекса, позволяющего рассчитывать и отображать необходимые элементы для более полного и точного мониторинга текущей динамической обстановки, а также выделять прогностические предикторы, позволяющие осуществлять краткосрочный прогноз динамической обстановки в наблюдаемой области.

В настоящее время возникает необходимость проведения натуральных исследований для изучения динамических процессов и их связи с другими геофизическими

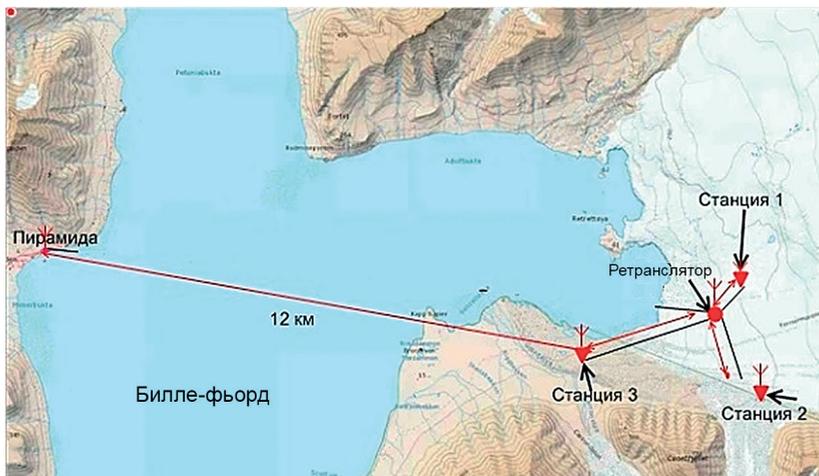


Рис. 6. Схема мониторинга состояния ледника Норденшельда с сейсмическими станциями 1, 2 и 3, расположенными на леднике и на берегу

Рис. 6. Monitoring scheme of the Nordenskiöldbreen Glacier with seismic stations 1, 2 and 3 located on the glacier and on the shore

явлениями: приливами в земной коре, воздействием сейсмических волн как спусковых механизмов динамики ледников и образования айсбергов. В связи с этим был проведен мониторинг физико-механических параметров ледника Норденшельда с применением измерительного комплекса с дистанционной передачей сигналов на базу экспедиции в пос. Пирамида на расстояние до 12 км (рис. 6).

На леднике были установлены приборы для постоянных наблюдений, разнесенные друг от друга на некоторое расстояние. На берегу устройства располагались на скальном грунте в бухте Адольфа по обе стороны от фронта ледника. Установка волнографа была выполнена в южной части бухты недалеко от границы ледника. По радиоканалу в режиме реального времени на базу передавались данные, представляющие собой волновой профиль каналов Z , N , E , X , Y на частоте дискретизации 100 Гц. На базовой станции на мониторе можно было наблюдать в режиме реального времени волновые процессы, происходящие в районе фронта ледника.

На данный момент в ААНИИ разрабатывается дополнительный модуль, который обеспечивает звуковую и визуальную сигнализацию дежурному оператору о высокой вероятности появления опасного события.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные комплексная система для определения характеристик прочности ледяных образований в натуральных условиях и модульно-блочная система мониторинга состояния ледяного покрова дополняют друг друга, предполагают их дальнейшее развитие и усовершенствование, обеспечивают широкие возможности исследования льдов в следующих направлениях:

- получение и анализ результатов инструментального мониторинга физико-механических ледовых процессов в системе «атмосфера–лед–океан» и выявление пространственно-временных связей различного масштаба с использованием контактной и спутниковой информации;

- проведение теоретических и экспериментальных исследований крупномасштабных физико-механических процессов в морских льдах с целью совершенствования методов прогнозирования явлений сжатия и торошения в режиме реального времени;

- создание аппаратно-программного обеспечения автоматической обработки динамических процессов в припайных и дрейфующих льдах, обусловленных явлениями приливного и ветрового сжатия и торошения, воздействия поверхностных и внутренних волн океана;

- получение натуральных данных по локальной и масштабной прочности льда для расчета ледовых нагрузок на берега, морское дно и инженерные сооружения на арктическом шельфе;

- разработка параметризации и математического описания исследуемых динамических явлений воздействия на лед волн зыби, автоколебаний и создание соответствующих численных моделей;

- разработка программных средств для численного моделирования и выявления прогностических признаков сжатия и разрушения ледяных полей.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Финансирование. Обработка данных выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ по разделу проекта 5.1.5 НИТР Росгидромета «Исследование

крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения».

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. Data processing was carried out a part of the AARI planned scientific topic under the project section 5.1.5 SRTW of Roshydromet “Research of large-scale dynamics, physical processes, mechanics of deformation and destruction of sea ice in order to improve methods for short-term forecasting of compression and ridging”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malmgren F.* On the properties of sea-ice. Bergen: a/s J. Griegs boktrykkeri, 1927. 67 p.
2. *Robin G.Q.* Wave propagation through fields of pack ice // *Phil. Trans. Rou. Soc. London. A.* 1963. V. 225 (1057). P. 313–223.
3. *Smirnov V.N., Nikitin V.A., Shushlebin A.I., Sheikin I.B.* Results of studies of the effect of wind-induced waves and swell on the ice cover of the Barents Sea // *Natural Conditions of the Kara and Barents Seas. Proceedings of the Russian-Norwegian Workshop-95, Norsk Polarinstitut. Oslo, 1997.* P. 325–327.
4. *Мячкин В.И.* Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
5. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 95 с.
6. *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Бородкин В.А., Нюбом А.А., Шушлебин А.И.* Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явлений сжатия и торошения. СПб.: ААНИИ, 2017. 174 с.
7. *Смирнов В.Н.* Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 162 с.
8. Свод правил 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. М.: Госстрой России, 2004. 88 с.
9. *Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures. ISO/FDIS 19906:2010(E).* 2010. 435 p.
10. *Masterson D.M.* Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests // *Proc. of IAHR Ice Symposium, Banff, Alberta.* 1992. V. 3. P. 802–815.
11. *Masterson D.M.* Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests // *Can. J. Civ. Eng.* 1996. V. 23 (1). P. 165–179.
12. *Masterson D.M., Graham W.P., Jones S.J., Childs G.R.* A comparison of uniaxial and borehole jack tests at Fort Providence ice crossing // *Can. Geotech. J.* 1997. V. 34. P. 471–475.
13. *Kovalev S.M., Korostelev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N., Shushlebin A.I.* Application of a borehole jack for determination the local strength of fresh and sea ice // *Proc. of the 17th Int. Symp. on Ice. St. Petersburg: IAHR, 2004.* P. 147–153.
14. *Sinha N.K.* The Borehole Jack — Is it a useful tool? // *Proc. 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAЕ), Tokyo, Japan.* 1986. P. 328–335.
15. *Sinha N.K., Shkhinek K.N., Smirnov V.N.* On borehole indenter (BHI) measurements and analysis // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2012. V. 76–77. P. 109–120.
16. Свод правил 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82*. М.: Минстрой России, 2018. 122 с.
17. *Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Kolabutina N.V.* Research of the physical-mechanical properties of sea ice at the scientific research station “Ice Base the Cape of Baranov” // *Тр. V Всероссийской конференции с международным участием «Полярная механика», 9–11 окт. 2018, г. Новосибирск.* URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/193/1/012030/pdf> (дата обращения 01.06.2020)

18. *Johnston M.E.* Strength-Temperature Relationships for First-year, Second-year and Multi-year Sea Ice // Proc. of the 29th (2019) Int. Ocean and Polar Eng. Conf. Honolulu, Hawaii, USA, June 16–21, 2019. P. 707–714.
19. *Sinha N.* Borehole-indentor // J. OMAE. 1987. V. 109. P. 391–397.
20. *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А.* Автоколебания в дрейфующем ледяном покрове Северного Ледовитого океана // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 3. С. 122–138.
21. *Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М., Шейкин И.Б.* Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения. СПб: ААНИИ, 2011. 178 с.
22. *Смирнов В.Н., Знаменский М.С., Ковалев С.М., Шушлебин А.И.* Универсальная модульно-блочная система мониторинга состояния ледяного покрова. Патент на изобретение № 2683806 от 02.04.2019.
23. *Ковалев С.М., Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О.* Крупномасштабные испытания прочности дрейфующих и припайных льдов арктического шельфа // Тр. 12-й междунар. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CISOffshore 2015). 15–18 сентября 2015 г. Санкт-Петербург. СПб.: Химиздат, 2015. С. 246–250.
24. *Смирнов В.Н., Знаменский М.С., Шушлебин А.И., Ковалев С.М.* Способ мониторинга состояния дрейфующего ледяного поля или припая и прогноза его разлома при сжатии льдов и воздействия волн зыби. Патент на изобретение № 2621276. 02.06.2017.

REFERENCES

1. *Malmgren F.* On the properties of sea-ice. Bergen: a/s J. Griegs boktrykkeri, 1927: 67 p.
2. *Robin G.Q.* Wave propagation through fields of pack ice. Phil. Trans. Rou. Soc. London, A. 1963, 225 (1057): 313–223.
3. *Smirnov V.N., Nikitin V.A., Shushlebin A.I., Sheikin I.B.* Results of studies of the effect of wind-induced waves and swell on the ice cover of the Barents Sea. Natural Conditions of the Kara and Barents Seas. Proceedings of the Russian-Norwegian Workshop-95. Norsk Polarinstitut. Oslo, 1997: 325–327.
4. *Mjachkin V.I.* Processy podgotovki zemletrjasenij. Earthquake preparation processes. Moscow: Nauka, 1978: 232 с. [In Russian].
5. *Sadovskij M.A., Pisarenko V.F.* Sejsmicheskij process v blokovej srede. Seismic process in a block environment. Moscow: Nauka, 1991: 95 p. [In Russian].
6. *Smirnov V.N., Kovaljov S.M., Borodkin V.A., Njubom A.A., Shushlebin A.I.* Instrumental'nyj monitoring i kratkosrochnyj prognoz javlenij szhatija i toroshenija. Instrumental monitoring and short-term forecast of compression and ridging phenomena. St. Petersburg: AARI, 2017: 174 p. [In Russian].
7. *Smirnov V.N.* Dinamicheskie processy v morskikh l'dah. Dynamic processes in sea ice. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996: 162 p. [In Russian].
8. Set of Rules 11-114-2004. *Inzhenernye izyskanija na kontinental'nom shel'fe dlja stroitel'stva morskikh neftegazopromyslovych sooruzhenij.* Engineering surveys on the continental shelf for the construction of offshore oil and gas facilities. Moscow: Gosstroy of Russia, 2004: 88 p. [In Russian].
9. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures, ISO/FDIS 19906:2010(E), 2010: 435 p.
10. *Masterson D.M.* Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests. Proc. of IAHR Ice Symposium, Banff, Alberta. 1992, 3: 802–815.
11. *Masterson D.M.* Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests. Can. J. Civ. Eng. 1996, 23 (1): 165–179.

12. Masterson D.M., Graham W.P., Jones S.J., Childs G.R. A comparison of uniaxial and borehole jack tests at Fort Providence ice crossing. *Can. Geotech. J.* 1997, 34: 471–475.
13. Kovalev S.M., Korostelev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N., Shushlebin A.I. Application of a borehole jack for determination of the local strength of fresh and sea ice. *Proc. of the 17th Int. Symp. on Ice*. St. Petersburg: IAHR, 2004: 147–153.
14. Sinha N.K. The Borehole Jack — Is it a useful tool? *Proc. 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAE)*, Tokyo, Japan. 1986: 328–335.
15. Sinha N.K., Shkhinek K.N., Smirnov V.N. On borehole indenter (BHI) measurements and analysis. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2012, 76–77: 109–120.
16. Set of Rules 38.13330.2018. *Nagruzki i vozdejstviya na gidrotehicheskie sooruzhenija (volnovye, ledovye i ot sudov)*. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships). SNiP 2.06.04-82*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2018: 122 p. [In Russian].
17. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Kolabutina N.V. Research of the physical-mechanical properties of sea ice at the scientific research station “Ice Base the Cape of Baranov”. *Proc. V All-Russia Conference with international participation “POLAR MECHANICS”*, 9–11 Oct. of 2018, Novosibirsk. Available at <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/193/1/012030/pdf> (accessed 01.06.2020).
18. Johnston M.E. Strength-Temperature Relationships for First-year, Second-year and Multi-year Sea Ice. *Proc. of the 29th (2019) Int. Ocean and Polar Eng. Conf.*, Honolulu, Hawaii, USA, June 16–21, 2019: 707–714.
19. Sinha N. Borehole-indenter. *J. OMAE*. 1987, 109: 391–397.
20. Smirnov V.N., Kovalev S.M., Njubom A.A. Self-oscillations in the drifting ice cover of the Arctic Ocean. *Okeanologicheskie issledovanija. Oceanological studies*. 2019, 47, 3: 122–138. [In Russian].
21. Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Kovalev S.M., Sheikin I.B. *Metodicheskoe posobie po izucheniju fiziko-mehaničeskikh harakteristik ledjanyh obrazovanij kak ishodnyh dannyh dlja rasčeta ledovyh nagruzok na berega, dno i morskije sooruzhenija*. Methodological aid for study of physical-mechanical characteristics of ice features as initial data for calculation of ice loads on shores, seabed and offshore structures. St. Petersburg: AARI, 2011: 178 p. [In Russian].
22. Smirnov V.N., Znamensky M.S., Kovalev S.M., Shushlebin A.I. Universal'naja modul'no-bločnaja sistema monitoringa sostojanija ledjanogo pokrova. Universal module-block system of monitoring of the ice cover state. Patent RF, no. 2683806, 02.04.2019.
23. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O. Large-scale trials of the strength of drifting and landfast ice of the Arctic shelf. *Trudy 12-i mezhd. konf. i vystavki po osvoeniju resursov nefii i gaza Rossijskoi Arktiki i kontinental'nogo shel'fa stran SNG (RAO/CISOffshore 2015)*. 15–18 sentjabria. *Proc. 12th International Conference and exhibition on the development of oil and gas resources of the Russian Arctic and the continental shelf of the CIS countries (RAO/CIS Offshore 2015)*. 15–18 September of 2015, St. Petersburg. St. Petersburg: Khimizdat, 2015: 246–250. [In Russian].
24. Smirnov V.N., Znamensky M.S., Shushlebin A.I., Kovalev S.M. Sposob monitoringa sostojanija drejfujuščhego ledjanogo polja ili pripaja i prognoza ego razloma pri szhatii l'dov i vozdejstviya voln zybi. Method of monitoring of the state of the drifting ice floe or landfast ice and prediction of its breakup at ice compression and impact of swell waves. Patent RF, no. 2621276, 02.06.2017.