

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-293-320>
УДК 532.322



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЬДА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ ЭКСПЕДИЦИИ «ТРАНСАРКТИКА-2019»

С.М. КОВАЛЕВ*, В.А. БОРОДКИН, Н.В. КОЛАБУТИН, А.А. НЮБОМ,
ЕВГ.В. ШИМАНЧУК, ЕГ.В. ШИМАНЧУК

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

*skovalev@aari.ru

Резюме

В экспедиции «Трансарктика-2019» были выполнены работы по определению физико-механических характеристик однолетнего льда поля сморози и поля двухлетнего льда. Поле сморози является ледяным образованием, сформированным в процессе динамического метаморфизма. В работе представлены данные по температуре, солёности, плотности, текстуре, прочности при центральном изгибе круглых пластин, локальной прочности и прочности при одноосном сжатии образцов льда, выбуренных параллельно и перпендикулярно поверхности льда. Средние значения локальной прочности были близки к значениям, получаемым по квадратичной аппроксимации для льдов в районе НИС «Ледовая база Мыс Баранова». В целом механические характеристики ровного льда аналогичны характеристикам прочности льда с преобладанием волокнистой структуры.

Ключевые слова: двухлетний лёд, круглые пластины, локальная прочность, однолетний лёд, одноосное сжатие, плотность, скважинный зонд-индентор, солёность, текстура льда, температура.

Для цитирования: Ковалев С.М., Бородин В.А., Колабутин Н.В., Нюбом А.А., Шиманчук Евг.В., Шиманчук Ег.В. Основные физические и механические характеристики льда по результатам работы экспедиции «Трансарктика-2019» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. №. 3. С. 293 — 320. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-293-320>.

Поступила 16.07.2020

После переработки 6.09.2020

Принята 8.09.2020

BASIC PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ICE BASED ON THE RESULTS OF THE EXPEDITION “TRANSARCTIC-2019”

SERGEY M. KOVALEV*, VLADIMIR A. BORODKIN, NIKOLAI V. KOLABUTIN,
ALEKSEI A. NUBOM, EVGENII V. SHIMANCHUK, EGOR V. SHIMANCHUK

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

*skovalev@aari.ru

Summary

On the “Transarktika-2019” expedition, works were carried out for determining the physical and mechanical characteristics of frost field of the first-year sea ice and the field of second-year ice.

The thickness of the ice cover was determined by contact and non-contact methods, the temperature, salinity and density of ice, the strength of the samples at central bending and uniaxial compression, as well as the local (borehole) strength of ice were measured.

Studies have shown that most of the field is an ice formation formed in the process of dynamic metamorphism. At the beginning of the expedition, an ice floe passed through a section of warm surface waters. This led to the disappearance of the openwork layer on the lower boundary of the ice and stopping the growth of ice from below. During the observation period, the average temperature and salinity of the deformed ice increased, while the average density decreased. The values of mechanical characteristics decreased with increasing temperature and brine volume. The average borehole strength were close to the values obtained by the quadratic approximation for ice in the area of the Ice Station “Cape of Baranov”. The physical and mechanical properties of the level ice are generally similar to the properties of ice, composed mainly of fibrous structures. The ratios between the borehole strength and the strength under uniaxial compression of ice samples drilled parallel to the ice surface were 4.5 and 4.7, which corresponds to the literature data.

The thickness of the second-year sea ice at the place of work was 166 — 169 cm, the snow height was 27 cm, the raft of the ice surface above the water surface was 15 cm. The average ice temperature was -4.0°C . Second-year ice can be divided into three parts that differ in their physical properties. The upper part (0 — 10 cm) was formed in the autumn. The second part (10 — 85 cm) is ice that has undergone seasonal thermometamorphic changes. The lower part was formed during the natural growth of ice from below at the current season.

Keywords: borehole jack, density, first-year ice, ice texture, local strength, round plates, salinity, second-year ice, temperature, uniaxial compression.

For Citation: Kovalev S.M., Borodkin V.A., Kolabutin N.V., Nubom A.A., Shimanchuk Ev.V., Shimanchuk Eg.V. Basic physical and mechanical characteristics of ice based on the results of the expedition “Transarktika-2019”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 293 — 320. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-293—320>.

Received 16.07.2020

Revised 6.09.2020

Accepted 8.09.2020

ВВЕДЕНИЕ

Активизация хозяйственной деятельности, расширение маршрутов движения судов в арктических морях, строительство морских сооружений в районах нефтегазовых месторождений актуализируют проблемы, связанные с воздействием на сооружения ледяных образований: дрейфующего и припайного льда, торосов, стамух и айсбергов. Решение таких проблем основывается на изучении состояния ледяного покрова и получении исходных данных о физико-механических свойствах льда.

Определение морфометрических, основных физических и механических характеристик льда является важной частью работ во всех арктических экспедициях. Исследование морфометрических характеристик льда и снега в пространстве и во времени позволяет отслеживать нарастание и таяние ледяного покрова в течение периода наблюдений. Полученные данные дают возможность косвенно оценить динамику нарастания/таяния и снегонакопления на дрейфующих льдах прилегаю-

шего района, могут служить иллюстрацией состояния климата всего Арктического бассейна.

Исследования физико-механических свойств ледяного покрова направлены на определение масштабной прочности льда на сжатие и изгиб как основного исходного параметра при оценке ледовых нагрузок на проектируемые сооружения, изучение крупномасштабной механики разрушения льда, контроль и сохранение несущей способности ледяного покрова при грузовых операциях на припае.

Изучение состояния ледяного покрова невозможно без учета региональных особенностей. В настоящее время проводятся большие работы в морях Карском и Лаптевых [1 — 3]. Дрейф основной льдины экспедиции «Трансарктика-2019» проходил в динамичном районе между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, в котором свойства ледяного покрова изучены недостаточно. Основные работы были проведены на поле сморози однолетнего льда. В конце экспедиции была выполнена однодневная ледовая станция на двухлетнем льду.

Основная задача статьи — представить морфометрические, основные физические и механические характеристики льда в районе дрейфа экспедиции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Температура льда и снега измерялась с помощью термометра Greisinger GTN 175/МО. При помощи электромеханического бура в ледяном покрове отбирался керн льда на всю его толщину. По длине керна на заданных горизонтах перпендикулярно оси высверливались отверстия до середины керна. В эти отверстия поочередно вставлялся зонд с расположенным в нем первичным измерительным преобразователем температуры. Во время измерения керн льда помещался в термозащитный чехол с металлизированным покрытием, что позволяет исключить радиационный прогрев льда.

Соленость льда определялась по электропроводности расплава образцов льда из кернов. Измерения выполнялись кондуктометром типа HI 8733 HANNA при температуре воздуха +20 °С или мультимонитором TDS/EC/Sal/°C ULTRAPEN™ PT1. Точность определения солености льда — 0,01 ‰. При помощи электромеханического бура отбирались керны льда, из которых с заданных уровней выпиливались диски. Диски помещались в двойные полиэтиленовые пакеты и доставлялись в теплую лабораторию, где лед расплавлялся при комнатной температуре. Кондуктометром измерялась проводимость полученного раствора, по которой определялась его соленость.

Плотность льда определялась путем взвешивания определенного объема льда из выбуренного керна. С заданных уровней этого керна выпиливались образцы льда. При помощи штангенциркуля с точностью до 0,1 мм проводились четыре измерения диаметра и четыре измерения высоты ледяного цилиндра. По этим данным рассчитывался объем цилиндра. Далее ледяной цилиндр взвешивался на электронных весах. Плотность льда определялась как результат деления веса ледяного цилиндра на его объем.

Объем жидкой фазы рассчитывался по методике Кокса–Викса [4]. При отсутствии данных о плотности льда объем жидкой фазы считался по формуле Франкенштейна–Гарнера [5]. Расчет по обеим методикам давал близкие результаты.

Испытания прочности образцов льда на одноосное сжатие проводились на гидравлическом прессе ЛГК-021. Цилиндрические образцы испытывались в перпендикулярном и параллельном поверхности намерзания льда направлениях. Образцы

льда, ось которых параллельна поверхности ледяного покрова, выбуривались из извлеченного на поверхность ледяного блока. Ледяной блок выпиливался с помощью цепной бензопилы с шиной 90 см.

Измерения пределов прочности круглых пластин льда при центральном изгибе проводились на полевой испытательной машине (прессе) ПИМ-200М. Из ледяного покрова электромеханическим буром отбирался керн льда диаметром 141 мм. Керн распиливался на диски без пропусков или в соответствии с характером его текстуры. Толщина дисков составляла около 2 см.

Для определения локальной прочности льда (т.е. прочности льда при всестороннем сжатии, определенной с помощью скважинного зонд-индентора) использовался комплекс «Гидравлический зонд-индентор ЛПК» с электроприводом. Бурение скважин во льду для проведения испытаний осуществлялось механическим шнековым буром диаметром 250 мм. Для проведения испытаний зонд-индентор опускался в скважину, и с шагом 30 см проводились испытания на каждом горизонте. Первое измерение проводилось на горизонте 30 см. Диаметр индентора равнялся 9 см, скорость внедрения индентора — 4,5 мм/с. Во время испытаний фиксировались время нагружения, давление в системе и глубина внедрения индентора в лед.

Морфометрические измерения проводились на полигоне, представляющем собой прямоугольник размером 80 × 100 м с внутренними профилями через каждые 10 м для основного (центрального) профиля и 20 м для остальных профилей. Разметка полигона проводилась при помощи электронного тахеометра.

При измерениях контактным методом в каждой точке полигона измерялись толщина льда, высота снега, превышение верхней поверхности ледяного покрова относительно уровня воды. Измерения проводились путем шнекового бурения льда посредством мотобура (с реверсом) или электродрели, а также ледемерных и снегомерных реек.

Точность измерения толщины льда и высоты снежного покрова определяется точностью измерительных приборов. Для стандартных ледемерных и снегомерных реек погрешность измерения составляет 1 см.

Измерения на полигоне были выполнены 3 раза: 4, 11 и 17 апреля.

Измерения бесконтактным методом проводились с помощью электромагнитного измерителя ЕМЗ1Исе. Перед началом обхода выполнялась калибровка ЕМЗ1Исе в соответствии с инструкцией фирмы-производителя, включая контроль питания, установку нуля измерений, чувствительности прибора и рабочего значения электропроводности морской воды, а также 2 — 3 тестовых измерения толщин льда контактным способом и с помощью ЕМЗ1Исе в точках наиболее и наименее толстого льда.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Весной 2019 года состоялась экспедиция нового типа «Трансарктика-2019» [6]. Основные работы (с 28 марта по 28 апреля) по определению основных физических и механических характеристик льда проводились на поле сморози с участками восторошенного и относительного ровного однолетнего льда, покрытого слоем снега различной толщины. 1 и 2 мая работы проводились на поле двухлетнего льда. Из-за разрушения льдины 2 мая не удалось выполнить работы по определению локальной прочности и прочности образцов льда при одноосном сжатии.

На поле сморози имелись многочисленные торосы. Толщина льда, визуально выглядевшего как ровный, сильно менялась даже на небольших расстояниях. Для харак-

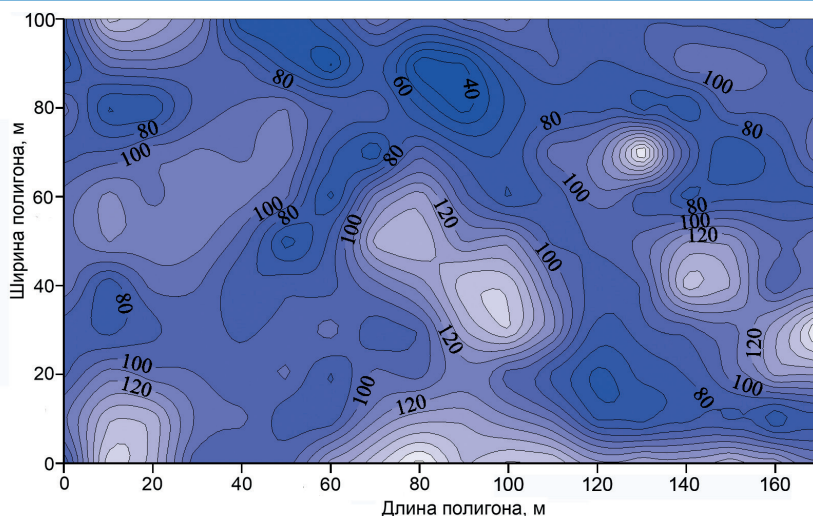


Рис. 1. Толщина льда (см) у борта судна по данным неконтактной съемки, 28.03.2019

Fig. 1. Ice thickness (cm) at the side of the vessel according to the contactless measurement, 28.03.2019

теристики льдины на рис. 1 приведена толщина выглядевшего ровным льда на участке 170×100 м у борта судна. Измерения проводились неконтактным методом с помощью прибора ЕМЗ11се. Толщина льда на этом участке изменялась от 32 до 187 см.

Для выполнения работ было выбрано несколько точек: 1 — участок ровного льда (по визуальным наблюдениям) примерно в 200 м от судна; 2 — участок льда вблизи торосистого образования; 3 — участок ровного льда (рис. 2). Для выполнения работ по определению характеристик ровного льда был организован специальный полигон, на котором проводились измерения высоты снежного покрова, толщины льда, превышения поверхности льда над поверхностью воды, пределов прочности при изгибе и локальной прочности.

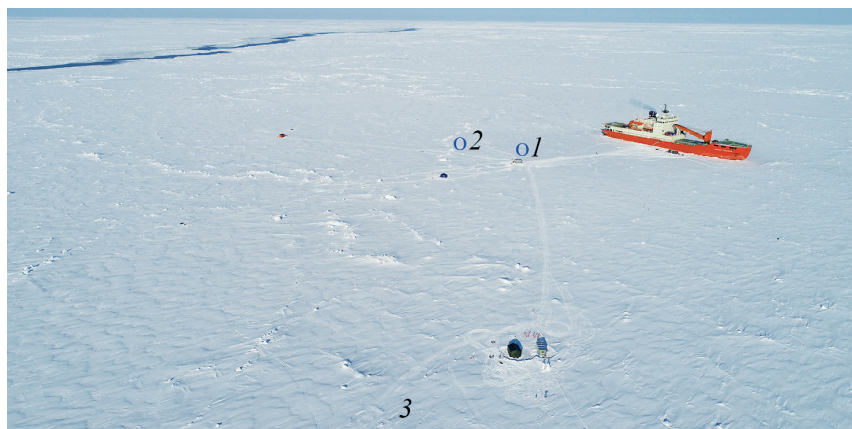


Рис. 2. Схема мест выполнения работ по изучению физических и механических свойств льда. 1 — визуально ровный участок льда; 2 — у тороса; 3 — дорога на полигон ровного льда

Fig. 2. Diagram of locations for the study of the physical and mechanical properties of ice. 1 — visually level ice; 2 — at a ridge; 3 — road to the polygon of level ice

Ровный лед

Участок ледяного покрова, где был организован ледовый полигон для измерения характеристик недеформированного льда, находился примерно в 1 км от судна. Он имел относительно ровную поверхность, покрытую слоем снега высотой 19 ± 7 см. Наблюдения, выполненные 4 апреля, показали, что средняя толщина льда составила 85 см и почти на всей площади полигона менялась в пределах от 82 до 94 см. Исключение составил один участок, толщина льда на котором резко уменьшилась до 53 см (рис. 3).

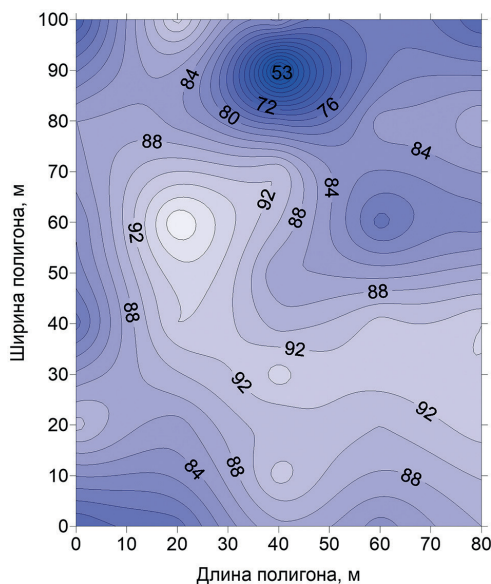


Рис. 3. Толщина льда на полигоне по данным контактной съемки, 4.04.2019

Fig. 3. Ice thickness on polygon according to the contact measurement, 4.04. 2019

Последующие съемки метрических параметров на полигоне, выполненные 11 и 17 апреля, показали, что толщина льда за время наблюдений практически не изменилась (табл. 1).

Отрицательные значения превышения поверхности льда над поверхностью воды были получены в нескольких точках рядом с грядой торосов. Лед был притоплен, высота снега достигала 40 см.

Постоянство средней толщины льда удивляет. Простейшие расчеты с использованием формул Зубова [7] показывают, что за период с 4 по 17 апреля толщина льда должна увеличиться на 5 — 8 см. По-видимому, отсутствие нарастания льда связано с нахождением льдины в теплых атлантических водах в самом начале экспедиции.

Из табл. 1 видно, что за время наблюдений средняя высота снега изменилась незначительно, постоянной оставалась средняя толщина льда и, как следствие, не изменялось и среднее превышение поверхности льда над поверхностью воды.

Текстурный анализ показал, что нарастание ровного льда происходило в основном за счет формирования льда волокнистой структуры, при динамически активных условиях ледообразования (рис. 4). Верхние 15 см сформировались в результате наложения льда толщиной 4 — 7 см. Ниже этого слоя преобладает лед волокнистой

**Результаты статистической обработки метрических параметров льда на полигоне
за период наблюдений**

Table 1

**Results of statistical processing of ice metric parameters on the polygon
during the observation period**

Характеристики	Дата		
	04.04	11.04	17.04
Количество измерений	35	35	35
<i>Высота снега</i>			
Среднее значение, см	19	22	21
Максимальное значение, см	38	40	35
Минимальное значение, см	9	11	10
Стандартное отклонение, см	7	7	7
<i>Толщина льда</i>			
Среднее значение, см	85	84	84
Максимальное значение, см	100	106	97
Минимальное значение, см	53	52	49
Стандартное отклонение, см	9	10	10
<i>Превышение поверхности льда над поверхностью воды</i>			
Среднее значение, см	3	3	3
Максимальное значение, см	8	8	8
Минимальное значение, см	-8	-17	-6
Стандартное отклонение, см	4	4	3

структуры с большим количеством включений кристаллов внутриводного льда или мелких обломков, образовавшихся во время торошения.

Фронтальное прерывание роста волокнистых кристаллов наблюдается на горизонтах 27, 47 и 59 см. Расчеты, сделанные на основании текстурного анализа, показывают, что данный лед начал формироваться в конце января, а последнее общее торошение, после которого началось смерзание кусков льда в сморозь, наблюдалось в начале марта. Это косвенно подтверждается минимальной толщиной льда (53 см), измеренной на полигоне.

Лед в точке наблюдений подвергся термометаморфическим изменениям, выразившимся в формировании на поверхности ледяного покрова слоя инфильтрационного льда толщиной до 3 см, развитии сети стоковых солевых каналов и формировании стоковых русел, оплавлении краев первичных воздушных и солевых включений. По внешним признакам внутренние изменения во льду, связанные с термометаморфическими процессами, могут быть отнесены ко второй стадии состояния льда [8].

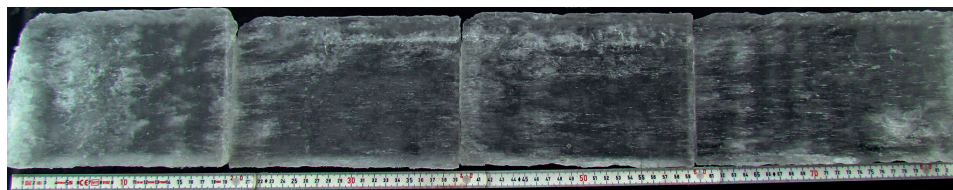


Рис. 4. Текстура ровного льда, 19.04.2019

Fig. 4. Texture of the level ice, 19.04.2019

На нижней границе льда отсутствовал ярко выраженный ажурный слой, который характерен для льдов волокнистой структуры. Это является косвенным подтверждением прекращения нарастания льда снизу в данный период.

Температура льда в основном зависит от изменений температуры воздуха, высоты и плотности снежного покрова и толщины льда. С понижением температуры воздуха понижается средняя температура льда, но наиболее быстро реагирует на внешние изменения температура верхних слоев льда (рис. 5). Вертикальные профили температуры ровного льда были близки к линейным.

Средняя соленость ровного льда составила 8,02 ‰. Распределение солености по толщине льда неоднородно (рис. 6). Наибольшие значения солености наблюдались

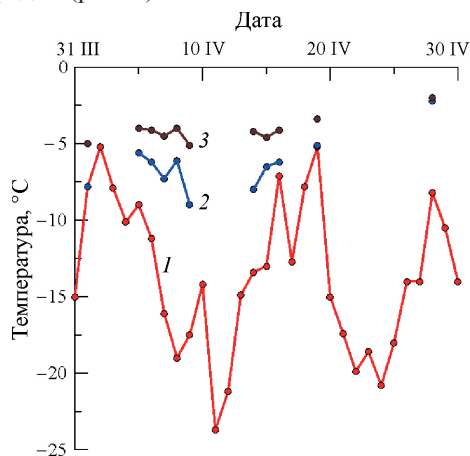


Рис. 5. Ход среднесуточной температуры воздуха (1), средней (3) и поверхностной (2) температуры ровного льда

Fig. 5. Dynamic of daily average air temperature (1), average (3) and surface (2) temperature of level ice

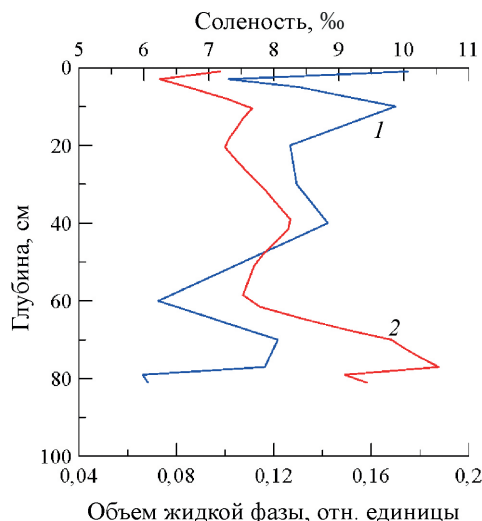


Рис. 6. Вертикальное распределение солености (1) и объема жидкой фазы (2) ровного льда

Fig. 6. Vertical distribution of the level ice salinity (1) and brine volume (2)

в верхнем слое, сформированном наслоением ниласового льда. Пики максимальных значений (примерно 10 ‰) приходятся на горизонты 0 и 10 см, что соответствует поверхности ниласового льда в период наслоения.

В слое 15 — 60 см, который сформировался в условиях частых подвижек льда и торошения, средняя соленость составила 8,24 ‰, а в нижнем слое 60 — 82 см, сформированном ориентировочно после образования сморози, — 6,95 ‰. Высокие значения солености связаны с процессами формирования льда, протекавшими при динамически активных условиях ледообразования, и большой скоростью нарастания льда в начальный период. Стеkanie рассола с верхних слоев к нижним еще не приняло лавинообразного характера, но сеть стоковых каналов и русел уже сформировалась по всей толщине льда (см. рис. 4). Отсутствует увеличение солености на самых нижних горизонтах, характерное для морских льдов. По-видимому, это также объясняется нахождением льдины в теплых атлантических водах в самом начале экспедиции.

Средняя плотность ровного льда составила 910 кг/м³. Распределение плотности льда по толщине не имеет больших отклонений и колеблется от 907 кг/м³ в месте наслоения ниласовых льдов до 912 кг/м³ в средней части льда.

Измерения предела прочности круглых пластин льда на изгиб показали, что в целом распределение этого параметра по толщине льда соответствует распределению прочности во льдах с преобладанием волокнистой структуры (рис. 7). Средняя прочность льда при изгибе составила 0,96 МПа при средней температуре льда –3,4 °С. Наибольшие значения предела прочности круглых пластин на изгиб (1,32 МПа) наблюдались на горизонте 25 см. В нижних слоях льда значения прочности уменьшаются.

Определение локальной прочности проводилось на полигоне размером 15 × 10 м. Толщина льда на полигоне изменялась от 77 до 85 см, высота снега — от 29 до 44 см. Погруженность льда изменялась от 2 до 9 см. Всего на выбранном

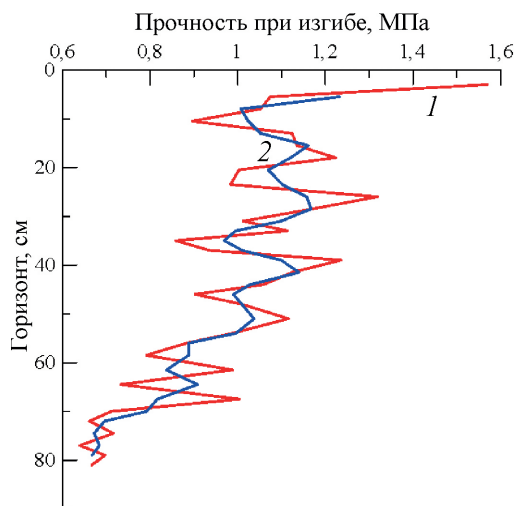


Рис. 7. Вертикальное распределение пределов прочности круглых пластин ровного льда на изгиб
1 — измеренные значения; 2 — скользящее среднее по трем измеренным значениям

Fig. 7. Vertical distribution of tensile strengths of level ice round plates for bending:

1 — measured values; 2 — moving average of three measured values

полигоне в 12 скважинах было проведено 24 определения локальной прочности. Результаты статистической обработки средних значений локальной прочности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты статистической обработки средних значений локальной прочности в скважинах ровного льда

Table 2

Results of statistical processing of average values of local strength in hole of level ice

Характеристика		Значение
Количество		12
Средняя температура льда, °С		-2,8
Средняя соленость льда, ‰		7,30
Среднее значение, МПа		17,86
Стандартное отклонение, МПа		1,71
Коэффициент вариации, %		9,6
Минимальное значение, МПа		13,39
Максимальное значение, МПа		19,57
Доверительный интервал 95 % обеспеченности для среднего значения	Нижняя граница, МПа	16,77
	Верхняя граница, МПа	18,94

Неоднородность полученных средних значений локальной прочности в скважинах показана на рис. 8.

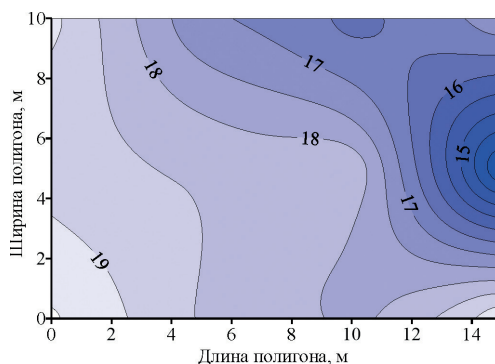


Рис. 8. Неоднородность средних значений локальной прочности в скважинах (МПа) ровного льда

Fig. 8. Heterogeneity of average values of local strength in hole (MPa) of level ice

Коэффициент вариации меньше 10 %, поэтому полученные значения можно считать однородными.

Деформированный лед

Исследования в других точках поля сморози показало, что лед в этих точках является не льдом, наростшим снизу в естественных условиях, а ледяным образованием, сформированным в процессе динамического метаморфизма (рис. 9). В точке № 1 внешний вид поверхности льда предполагал «ровный лед», но текстурный анализ показал, что это деформированный лед. Блоки, сложившие этот лед, имеют различное происхождение: куски льда волокнистой структуры, куски льда, сложенные зернистыми кристаллами, набивной и шуговой лед.

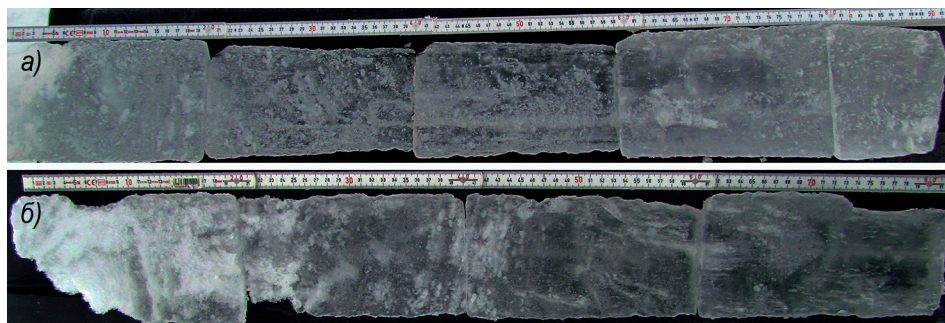


Рис. 9. Вертикальные срезы деформированного льда: а — 02.04.2019, б — 28.04.2019

Fig. 9. Vertical sections of deformed ice: а — 02.04/ 2019, б — 28.04.2019

Лед изобилует неравномерно расположенными крупными сферическими солевыми и воздушными включениями, часто образующими гнезда диаметром 1 — 2 см. Сложное строение льда отражается на его физических свойствах.

За время наблюдений существенно повысилась температура льда (рис. 10). В начале работ (1 апреля) средняя температура деформированного льда равнялась $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. 28 апреля средняя температура льда в этой же точке поднялась до $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Соленость деформированного льда имеет существенные различия в разных слоях. Средняя соленость льда 1 апреля составила 6,58 ‰, а 28 апреля — 7,56 ‰. Увеличение солености произошло в верхнем 20-сантиметровом слое. Это связано с активными процессами разрушения льда выступившей на поверхность водой. Косвенным подтверждением увеличения солености верхнего слоя льда является

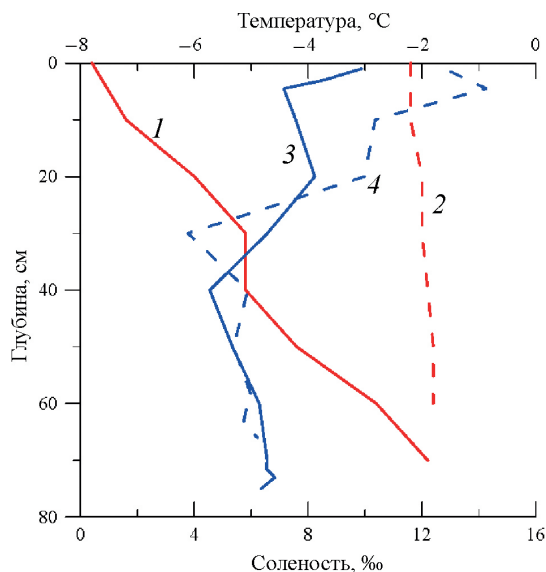


Рис. 10. Вертикальные профили температуры (1, 2) и солености (3, 4) деформированного льда 1.04.2019 (1, 3) и 28.04.2019 (2, 4)

Fig. 10. Vertical profiles of temperature (1, 2) and salinity (3, 4) of ice in deformed ice 1.04.2019 (1, 3) and 28.04.2019 (2, 4)

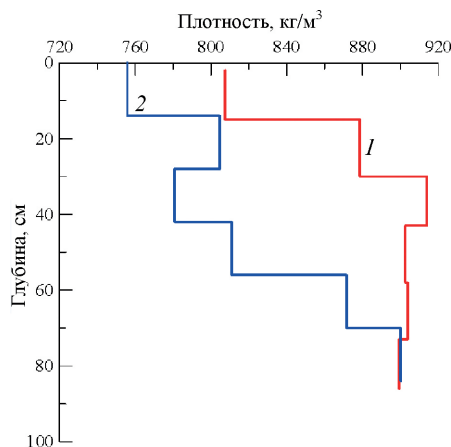


Рис. 11. Вертикальные профили распределения плотности деформированного льда 1.04.2019 (1) и 28.04.2019 (2)

Fig. 11. Vertical profiles of distribution of density of deformed ice 1.04.2019 (1) and 28.04.2019 (2)

произошедшее за тот же период увеличение солёности с 0,37 до 3,83 ‰ нижнего 10-сантиметрового слоя снега, лежащего на льду.

Наиболее существенно строение льда влияет на его плотность. Блоки льда, имеющие различное строение, могут обладать различной плотностью. Случайное распределение блоков при деформировании льда будет создавать условия для формирования ледяного покрова, имеющего различные значения плотности по толщине и в пространстве. Отличную от блоков плотность будут иметь соединительные прослойки, на образование которых может оказывать влияние снег, внутриводный лед и замерзание воды в замкнутых объемах. На рис. 11 показаны вертикальные профили плотности деформированного льда. Хаотическая компоновка блоков внутри поля сморози приводит к значительным изменениям плотности льда по толщине.

За время наблюдений существенно понизилась плотность льда. В начале работ (1 апреля) средняя плотность деформированного льда равнялась 884,3 кг/м³. 28 апреля она уменьшилась до 820,6 кг/м³.

Основные физические свойства определили механические характеристики деформированного льда. 1 апреля среднее значение пределов прочности при центральном изгибе круглых пластин льда равнялось 1,29 МПа. Большинство полученных значений находилось в пределах от 1,0 до 1,6 МПа. Наибольший разброс наблюдался в верхнем 30-сантиметровом слое (рис. 12). К концу работ на поле сморози из-за изменения основных физических свойств прочность круглых пластин льда уменьшилась. Среднее значение пределов прочности при изгибе 28 апреля составило 0,91 МПа. Наибольшее уменьшение прочности наблюдалось в верхнем слое льда.

Определение локальной прочности деформированного льда проводилось 5 апреля в 4 скважинах. Расстояние между скважинами 5 м. Толщина льда изменялась от 69 до 91 см, высота снега — от 19 до 21 см. Погруженность льда изменялась от –1 (лед был притоплен) до 2 см. Всего в 4 скважинах было проведено 7 определений локальной прочности. В скважине глубиной 69 см удалось провести только одно измерение локальной прочности.

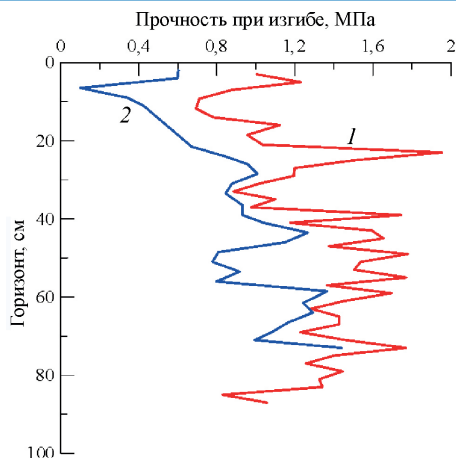


Рис. 12. Вертикальное распределение пределов прочности круглых пластин деформированного льда на изгиб 1.04.2019 (1) и 28.04 (2)

Fig. 12. The vertical distribution of tensile strength of round plates of deformed ice for bending 1.04.2019 (1) and 28.04.2019 (2)

Средние значения локальной прочности льда в скважинах были близки: от 19,32 до 22,74 МПа.

Измерения прочности образцов деформированного льда при одноосном сжатии проводились в начале экспедиции (6 апреля).

Прочность образцов деформированного льда, выбуренных перпендикулярно поверхности льда, при одноосном сжатии определялась в верхнем (0 — 40 см) и нижнем (40 — 82 см) слоях. Было испытано по 3 образца из каждого слоя. Средняя прочность верхнего слоя составила $5,69 \pm 0,61$ МПа, нижнего — $5,07 \pm 0,34$ МПа.

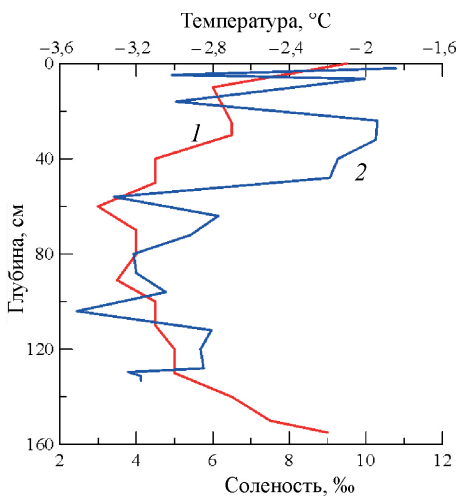


Рис. 13. Вертикальные профили температуры (1) и солености (2) деформированного льда у торосистого образования, 7.04.2019

Fig. 13. Vertical profiles of temperature (1) and salinity (2) of deformed ice at ridging formation, 7.04.2019

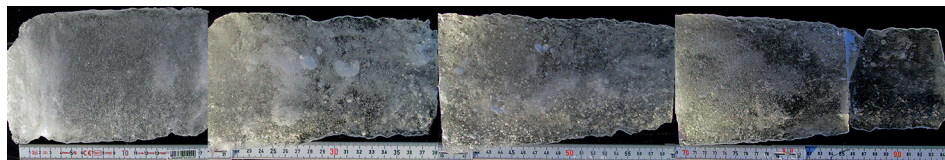


Рис. 14. Вертикальные срезы льда из торосистого образования, 8.04.2019

Fig. 14. Vertical sections of ice from a ridging formation, 8.04.2019

Прочность образцов деформированного льда, выбуренных параллельно поверхности льда, при одноосном сжатии определялась на горизонтах 30 и 60 см. Было испытано по 2 образца из каждого слоя. Средняя прочность на горизонте 30 см составила $5,13 \pm 0,25$ МПа, на горизонте 60 см — $3,41 \pm 0,12$ МПа.

Лед у торосистого образования находился под толстым слоем снега (50 см и более). Это являлось одной из главных причин высоких температур льда. В начале экспедиции его минимальные температуры (до $-3,4$ °C) наблюдались в слое 60 — 90 см (рис. 13). Средняя температура льда равнялась $-2,9$ °C. Перед разрушением ледяного поля средняя температура льда поднялась до $-2,4$ °C. Соленость льда значительно различалась даже на близких горизонтах. Особенно большие различия наблюдались в верхнем 60-сантиметровом слое. Средняя соленость этого слоя равнялась 8,76 ‰. Ниже этого слоя изменения солености были меньше, меньше стали и значения солености. Средняя соленость слоя равнялась 4,58 ‰.

Высокой была и степень внутренней разрушенности льда (рис. 14). Во льду, особенно в верхнем слое, наблюдалось большое количество крупных солевых и воздушных включений, каверн.

Большое количество крупных воздушных включений обусловило низкую плотность льда (рис. 15). 7 апреля средняя плотность верхнего 40-сантиметрового слоя составила 868 кг/м^3 . Ниже этого слоя плотность льда была выше, ее среднее значение равнялось 905 кг/м^3 . К концу месяца процессы внутреннего разрушения льда у то-

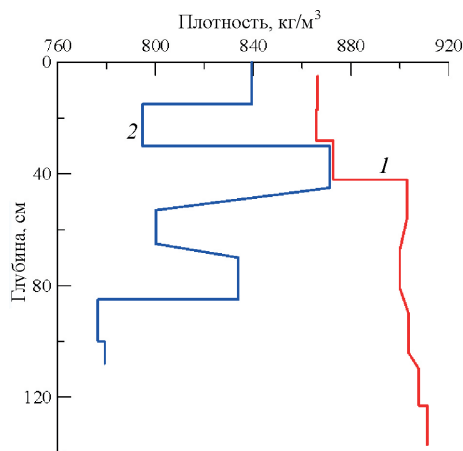


Рис. 15. Вертикальные профили распределения плотности деформированного льда у торосистого образования 7.04.2019 (1) и 25.04.2019 (2)

Fig. 15. Vertical profiles of distribution of density of deformed ice at ridging formation 7.04.2019 (1) and 25.04.2019 (2)

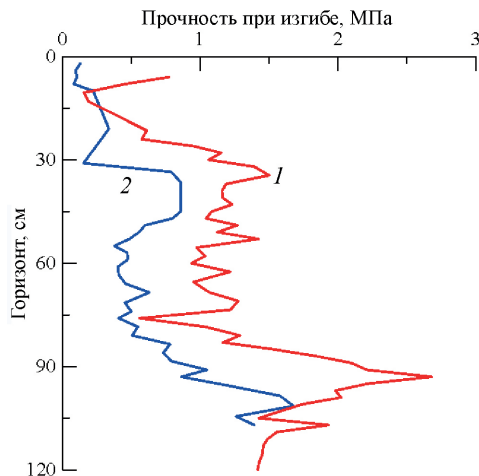


Рис. 16. Вертикальные распределения пределов прочности при изгибе круглых пластин деформированного льда у торосистого образования 07.04.2019 (1) и 25.04.2019 (2)

Fig. 16. Vertical distribution of tensile strength for bending of round plates of deformed ice at ridging formation 07.04.2019 (1) and 25.04.2019 (2)

росистых образований еще больше уменьшили плотность льда. Среднее значение плотности льда 25 апреля составило 814 кг/м^3 .

Состояние льда определило его механические характеристики. 7 апреля прочность при центральном изгибе круглых пластин верхнего слоя (0 — 25 см) деформированного льда у торосистого образования была низкой (рис. 16). Среднее значение составило $0,61 \pm 0,13 \text{ МПа}$. Ниже этого слоя (25 — 85 см) прочность круглых пластин повысилась в среднем до $1,15 \pm 0,20 \text{ МПа}$. Самую большую прочность (до 2,68 МПа) имели круглые пластины в слое 85 — 100 см. Среднее значение прочности пластин из этого слоя равнялось $2,15 \pm 0,27 \text{ МПа}$. К 25 апреля прочность пластин уменьшилась. Самым прочным остался слой 95 — 110 см. Среднее значение прочности пластин из этого слоя равнялось $1,42 \pm 0,20 \text{ МПа}$. Средняя прочность пластин из вышележащего льда составила $0,51 \pm 0,26 \text{ МПа}$.

Определение локальной прочности деформированного льда у тороса проводилось 12 апреля в 2 скважинах в подошве тороса на расстоянии 3 м друг от друга. Глубина скважин 130 и 132 см, высота снега 80 и 32 см. Лед был притоплен, первая скважина была на 32 см ниже уровня воды, вторая — на 23 см. Всего было проведено 6 определений локальной прочности. Их средние значения в скважинах были близки: 18,56 и 20,73 МПа.

Измерения прочности образцов деформированного льда у тороса при одноосном сжатии проводились 13 апреля.

Самой низкой прочностью образцов деформированного льда, выбуренных перпендикулярно поверхности льда, при одноосном сжатии была в верхнем слое 0 — 23 см. Она составила 1,25 МПа. Из-за большого количества каверн невозможно было изготовить образцы из слоя 23 — 45 см. Прочность при сжатии образцов из нижележащих слоев изменялась от 3,99 до 6,18 МПа при среднем значении $4,99 \pm 0,87 \text{ МПа}$.

Прочность образцов деформированного льда у тороса, выбуренных параллельно поверхности льда, при одноосном сжатии определялась на горизонтах 65,

75 и 85 см. Было испытано по 4 образца из каждого слоя. Средняя прочность на горизонте 65 см составила $4,57 \pm 0,62$ МПа, на горизонте 75 см — $4,66 \pm 1,32$ МПа и на горизонте 85 см — $4,13 \pm 0,44$ МПа.

Двухлетний лед

1 и 2 мая была выполнена ледовая станция на поле двухлетнего льда. Толщина льда в месте работ составляла 166 — 169 см, высота снега — 27 см, возвышение поверхности льда над поверхностью воды — 15 см. Средняя температура льда $-4,0$ °С.

Текстурный анализ льда в точке измерений показал, что двухлетний лед по своему строению имеет несколько слоев. Исследуемый лед, прошедший летние изменения и продолживший существование во второй зимний период, можно условно разделить на три отличающиеся по своим физическим свойствам части, которые разделяются на 6 слоев (рис. 17).

Верхняя часть, совпадающая со слоем 1 (0 — 10 см), сформировалась в осенний период путем замерзания мокрого снега и участков талой воды на поверхности пережившей лето льдины. Лед пористый, пресный, часто имеющий в своей толще линзы плотного льда от прослоек замерзшей вод. Средняя соленость слоя 0,04 ‰. В таком льду бывает трудно четко определить границу верхней поверхности.

Вторая часть (слои 2 — 4) представляет лед, прошедший сезонные термометаморфические изменения. Слой 2 (10 — 35 см) образован при сильном видоизменении кристаллов в результате режеляции или полной перекристаллизации первичных кристаллов. Лед почти пресный, средняя соленость 0,43 ‰. Слой 3 (35 — 50 см) сложен измененными в результате термометаморфических процессов реликтовыми кристаллами. Это проявляется в раздроблении волокнистых кристаллов по высоте, образовании внутри реликтовой структуры зернистых кристаллов или кристаллов,

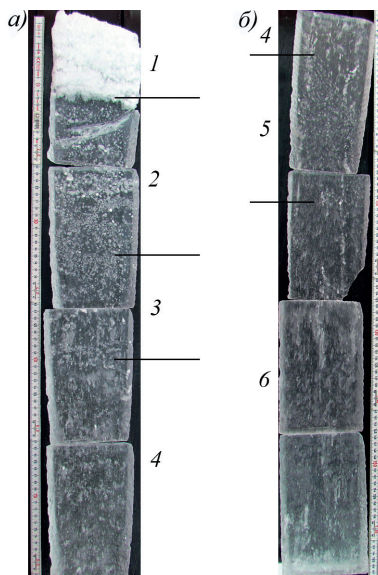


Рис. 17. Вертикальный текстурный срез первой, второй (а) и третьей (б) частей двухлетнего льда с делением на слои (1 — 6)

Fig. 17. Vertical texture section of the first, second (a) and third (b) part of second-year ice with separation on layers (1 — 6)

возникших при режеляционных процессах. Средняя соленость слоя 1,90 ‰. Слой 4 (50 — 85 см) имеет в своей основе несколько видоизмененную реликтовую волокнистую структуру, сохраняющую по большей мере размеры и форму первичных волокнистых кристаллов. Средняя соленость слоя 1,89 ‰.

Нижняя часть (слои 5 и 6) формируется в процессе естественного нарастания льда снизу в текущий сезон. Слой 5 (85 — 110 см) сформирован шуговым льдом. Верхняя граница этого слоя имеет наклон, который повторяет положение нижней границы льда на момент начала нового ледообразования. Этот слой может отсутствовать в других местах льдины. Средняя соленость слоя 3,06 ‰. Слой 6 (110 — 166 см) сформировался в результате естественного нарастания волокнистых кристаллов снизу и не отличается по своему строению от однолетнего льда. Средняя соленость слоя 5,34 ‰.

Вертикальное распределение солености льда и объема жидкой фазы хорошо отражает его строение (рис. 18б). Наиболее пресные слои располагаются сверху, где наблюдается полная или частичная перекристаллизация первичных кристаллов и где сток рассола летом приводит почти к полному опреснению льда. Льды, в том или ином виде сохранившие реликтовую структуру, имеют большую соленость, но все же меньше, чем однолетний лед текущего сезона. Наибольшая соленость приходится на нижние слои, сформированные в текущей зимний сезон.

Границы изменения плотности двухлетнего льда совпадают с границами его слоев (рис. 19а). Менее соленые слои, располагающиеся сверху, имеют меньшую плотность по отношению к более соленому льду, сформированному снизу.

Вертикальный профиль предела прочности круглых пластин на изгиб, как и другие физические свойства, отражает строение льда. На рис. 19б приведены скользящие средние по трем значениям прочности круглых пластин. Прочностные характеристики льда во многом зависят от его температуры, которая, как правило, увеличивается с толщиной льда (рис. 18а), но строение, соленость и плотность льда также могут оказывать существенное влияние на его прочностные свойства. Так, слой 1, с большой пористостью, имеет наименьшие прочностные характеристики

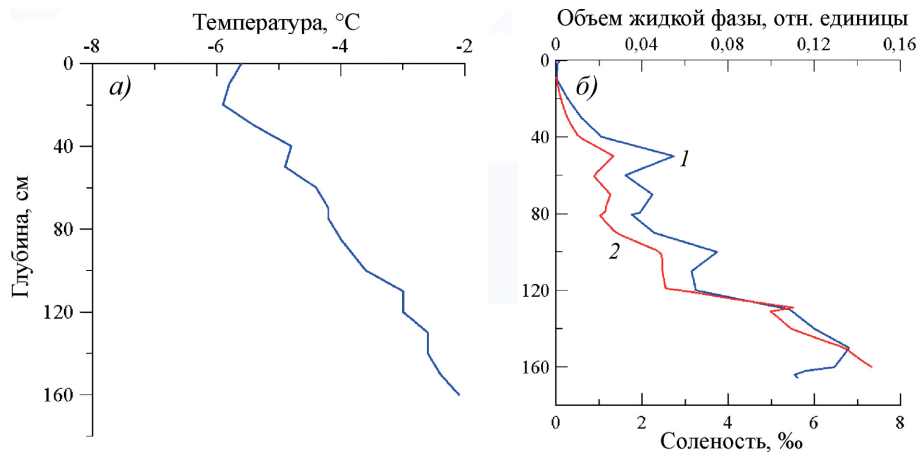


Рис. 18. Вертикальные профили температуры (а), солености и объема жидкой фазы (б) двух-летнего льда, 01.05.2019: 1 — соленость, 2 — объем жидкой фазы

Fig. 18. Vertical profiles of temperature (a) and salinity (б) of second-year ice, 01.05.2019: 1 — salinity, 2 — brine volume

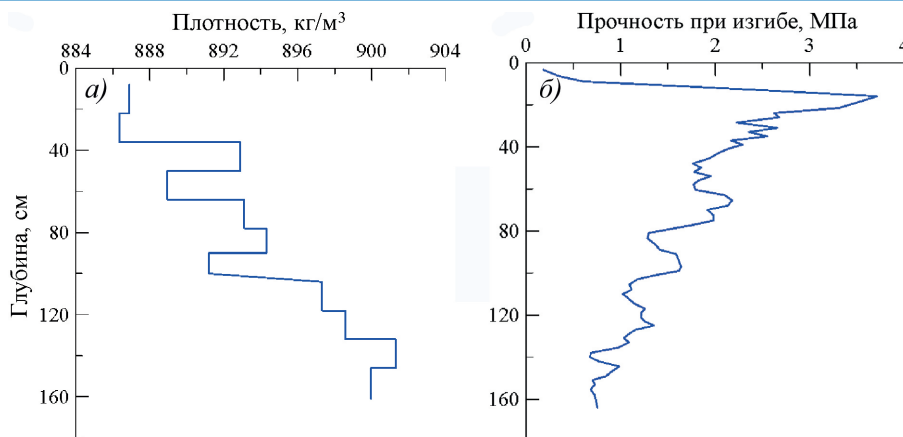


Рис. 19. Вертикальный профиль распределения плотности (а) и пределов прочности при изгибе круглых пластин (б) двухлетнего льда, 01.05.2019

Fig. 19. Vertical distribution of density (a) and strengths for bending of round plates (b) of second-year ice, 01.05.2019

(средняя прочность $0,18 \pm 0,14$ МПа), а слой 2, сформированный кристаллами практически пресного льда, имеет максимальные значения прочности по всей толщине (средняя прочность $2,59 \pm 1,13$ МПа). Четко просматривается разделение прочности льда по границе перехода от льда прошлого сезона, прошедшего термометаморфические изменения, ко льду, выросшему в текущем зимнем сезоне. Средняя прочность льда из слоев 3 и 4 — $1,92 \pm 0,32$ МПа, из слоев 5 и 6 — $1,06 \pm 0,33$ МПа.

На двухлетних льдах, в которых различия в строении льда более существенны, чем в однолетних, связь строения льда с его физическими свойствами просматривается более отчетливо.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Локальная прочность

На рис. 20 приведены определенные в экспедиции значения и зависимости локальной прочности от температуры льда и объема жидкой фазы.

Из рис. 20 видно, что значения локальной прочности увеличиваются с уменьшением температуры и объема жидкой фазы. Полученные линейные зависимости от температуры льда имеют вид:

$$\text{линия (1)} — \sigma_{loc} = 15,47 - 1,30 \cdot T_i, R^2 = 0,26,$$

$$\text{линия (2)} — \sigma_{loc} = 1,09 - 5,93 \cdot T_i, R^2 = 0,61,$$

$$\text{линия (3)} — \sigma_{loc} = -6,93 - 7,87 \cdot T_i, R^2 = 0,68,$$

где σ_{loc} — локальная прочность (МПа), T_i — температура льда (°C), R — коэффициент корреляции.

В 2017 — 2019 гг. на научно-исследовательском стационаре (НИС) «Ледовая база Мыс Баранова» было проведено достаточно большое количество определений локальной прочности льда. На основании 759 испытаний в диапазоне температур льда от $-1,8$ до $-18,0$ °C была получена зависимость локальной прочности от температуры льда [9]:

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

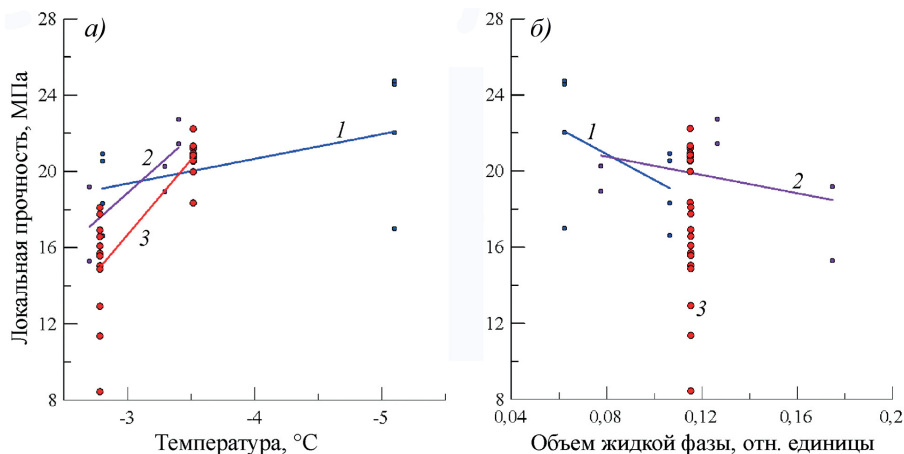


Рис. 20. Зависимости локальной прочности льда от температуры (а) и объема жидкой фазы (б): 1 — 05.04.2019, 2 — 12.04.2019, 3 — 22.04.2019

Fig. 20. Dependences of the local ice strength on temperature (a) and brine volume (б): 1 — 05.04.2019, 2 — 12.04.2019, 3 — 22.04.2019

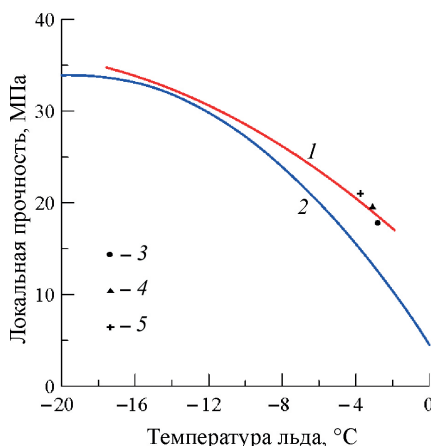


Рис. 21. Зависимость локальной прочности льда от температуры: 1 — аппроксимация полиномом 2-й степени по данным на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (2017 — 2019 гг.); 2 — аппроксимация Джонстона полиномом 2-й степени; 3 — среднее значение локальной прочности ровного льда; 4 — среднее значение локальной прочности льда из подошвы тороса; 5 — среднее значение локальной прочности деформированного льда, визуально выглядевшего как ровный

Fig. 21. Dependence of local ice strength on the temperature: 1 — approximation by a polynomial of the 2nd degree according to the data on the Ice Station “Cape of Baranov” (2017 — 2019); 2 — approximation of Johnston by polynomial of the 2nd degree; 3 — average value of the local strength of ice; 4 — average local strength of ice from the bottom of the ridge; 5 — the average value of the local strength of the deformed ice, visually looked as level

Из рис. 21 видно, что полученные средние значения локальной прочности ровного и деформированного льда (точки 3 — 5) близки к значениям, получаемым по формуле (1). На этом же графике приведена зависимость локальной прочности от температуры льда (кривая 2) из работы Джонстона [10]:

$$\sigma_{loc} = 4,53 - 3,07 \cdot T_i - 0,08 \cdot T_i^2. \quad (2)$$

Зависимость (2) 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. Наибольшее количество измерений проводилось в летнее время.

Из рис. 21 видно, что зависимости (1) и (2) в диапазоне температур льда от -20 до -8 °C дают близкие значения. При температурах льда выше -8 °C значения локальной прочности, рассчитываемые по формуле (2), ниже значений, получаемых по формуле (1). Наибольшие расхождения наблюдаются при температурах, близких к температуре плавления льда.

При высоких температурах льда зависимость (2) лучше согласуется с данными, полученными для льда, находящегося на поздних стадиях разрушения. Зависимость (1) при высоких температурах лучше описывает локальную прочность льда, находящегося на начальных стадиях разрушения.

В работе [10] отмечается, что значения локальных прочностей, полученные в отдельных испытаниях, могут значительно отличаться от расчетных. Близки к расчетным должны быть средние значения.

Зависимости локальной прочности в экспедиции «Трансактика-2019» получены в узком диапазоне температур. На деформированном льду 5 апреля максимальная разница температур составила $2,3$ °C, 12 апреля — $0,7$ °C, на ровном льду 22 апреля — $0,7$ °C.

Разброс значений, полученных 5 апреля, был большим, что привело к низкому коэффициенту корреляции. Однако средние значения локальной прочности льда в скважинах были близки: от $19,32$ до $22,74$ МПа. Их среднее значение ($21,03$ МПа), как видно из рис. 21 (точка 5), близко к расчетному по формуле (1) — $21,10$ МПа.

Близкими были средние значения локальной прочности в двух скважинах 12 апреля: $18,56$ и $20,73$ МПа. Их среднее значение (рис. 21, точка 4), близко к расчетному по формуле (1) — $19,64$ и $19,05$ МПа соответственно.

Для ровного льда измеренное среднее значение локальной прочности также близко к расчетному: $17,86$ и $18,56$ МПа.

На рис. 22 представлены зависимости локальной прочности от объема жидкой фазы, полученные по данным измерений на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» и в работе П. Спенсера и Т. Моррисона [11].

Зависимость, полученная на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» имеет вид:

$$\sigma_{loc} = 39,21 - 72,42 \cdot \sqrt{v_b}, \quad R^2 = 0,51, \quad (3)$$

где v_b — объем жидкой фазы в относительных единицах.

Эта зависимость получена на большом количестве экспериментальных данных (527 значений) и имеет неплохой коэффициент корреляции.

Для получения своей зависимости П. Спенсером и Т. Моррисоном [11] были объединены данные, полученные как на однолетнем льду, так и на многолетнем. По-видимому, такое объединение было сделано для получения большего количества экспериментальных данных (236 точек). Однако объединение таких различных типов льда стало одной из причин невысокого коэффициента корреляции ($R^2 = 0,34$).

Значения на рис. 20б имеют большой разброс, и коэффициент корреляции зависимостей от объема жидкой фазы получился низким ($R^2 = 0,17$ — $0,26$). Средние значения оказались на $2,2$ — $5,8$ МПа выше расчетных по формуле (3).

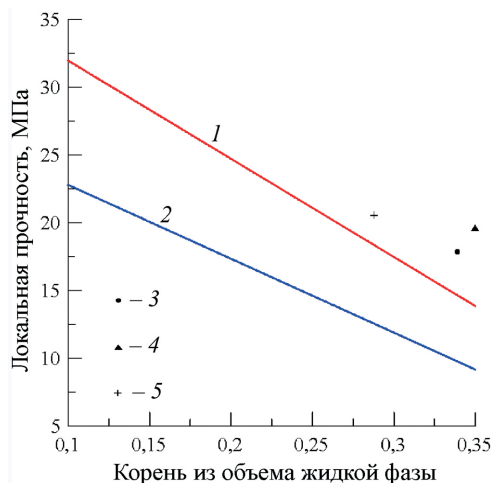


Рис. 22. Зависимость локальной прочности льда от объема жидкой фазы: 1 — аппроксимация по данным на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (2017 — 2019 гг.); 2 — аппроксимация П. Спенсера и Т. Моррисона [11]; 3 — среднее значение локальной прочности ровного льда; 4 — среднее значение локальной прочности льда из подошвы тороса; 5 — среднее значение локальной прочности деформированного льда, визуально выглядевшего как ровный

Fig. 22. Dependence of local ice strength on the liquid phase volume: 1 — approximation according to the data on the Ice Station «Cape of Baranov» (2017 — 2019); 2 — approximation of P. Spenser and T. Morrison [11]; 3 — average value of the local strength of ice; 4 — average local strength of ice from the bottom of the ridge; 5 — the average value of the local strength of the deformed ice, visually looked as level

Прочность при изгибе

На рис. 23 приведены зависимости прочности круглых пластин льда при центральном изгибе от температуры и объема жидкой фазы.

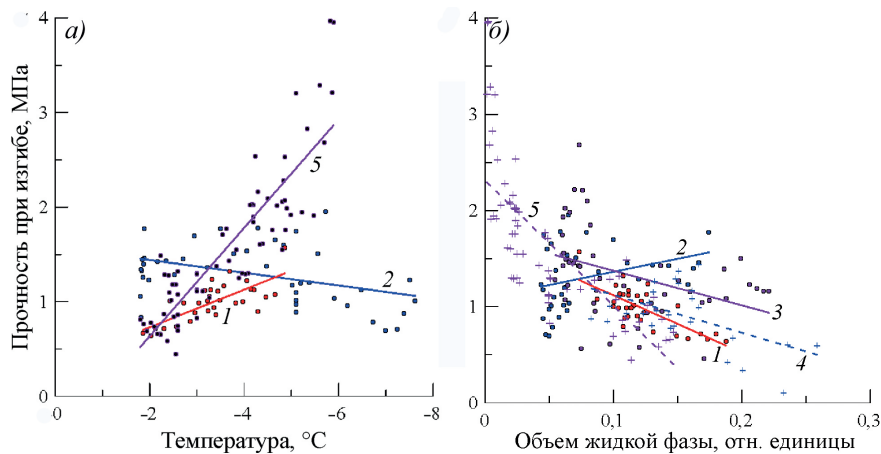


Рис. 23. Зависимости прочности образцов льда при изгибе от температуры (а) и объема жидкой фазы (б): 1 — 19.04.2019, 2 — 01.04.2019, 3 — 07.04.2019, 4 — 28.04.2019, 5 — 01.05.2019

Fig. 23. Dependences of the strength of ice samples in bending on temperature (a) and brine volume (b): 1 — 19.04.2019, 2 — 01.04.2019, 3 — 07.04.2019, 4 — 28.04.2019, 5 — 01.05.2019

Как и следовало ожидать, в большинстве случаев значения прочности увеличиваются с уменьшением температуры и объема жидкой фазы. Исключение составили данные, полученные 1 апреля. Эти данные имеют большой разброс и низкий коэффициент корреляции ($R^2 = 0,11 — 0,17$). Как уже отмечалось, в начале экспедиции льдина находилась в теплых атлантических водах, активно шли процессы разрушения льда. Видимо, это увеличило неоднородность льда и отразилось на механических характеристиках.

Полученные линейные зависимости имеют вид:

ровный однолетний лед (линия 1)

$$\sigma_f = 0,33 - 0,20 \cdot T_p, R^2 = 0,58,$$

$$\sigma_f = 1,71 - 5,94 \cdot v_b, R^2 = 0,56;$$

ровный двухлетний лед (линия 5)

$$\sigma_f = 0,51 - 0,57 \cdot T_p, R^2 = 0,76,$$

$$\sigma_f = 2,31 - 13,01 \cdot v_b, R^2 = 0,56,$$

где σ_f — прочности круглых пластин льда при центральном изгибе (МПа).

Зависимости прочности при изгибе получены в диапазоне температур от $-1,9$ до $-5,9$ °C.

Зависимость прочности при изгибе как от температуры, так и от объема жидкой фазы ярче выражена у ровного двухлетнего льда, чем у однолетнего.

Прочность при одноосном сжатии

На рис. 24 приведены зависимости прочности при одноосном сжатии образцов льда, выбуренных перпендикулярно поверхности ледяного покрова, от температуры и объема жидкой фазы.

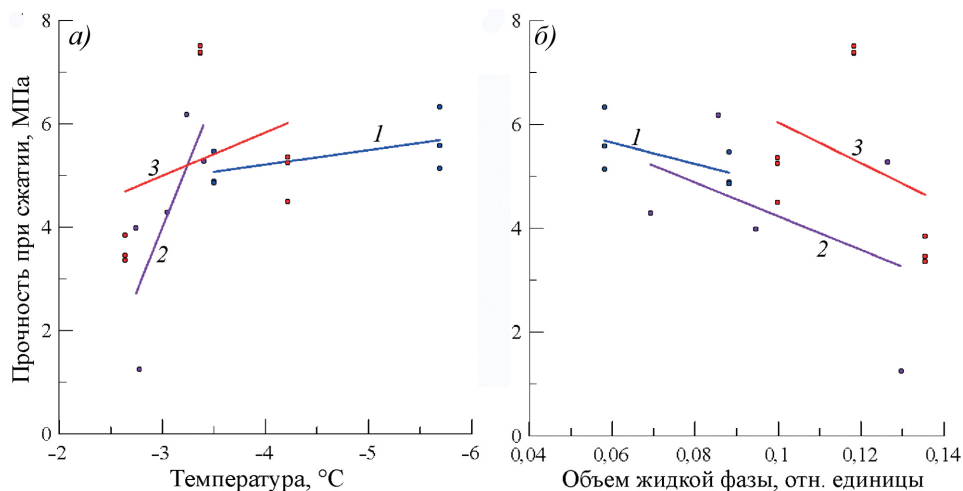


Рис. 24. Зависимости прочности при одноосном сжатии образцов льда, выбуренных перпендикулярно поверхности ледяного покрова, от температуры (а) и объема жидкой фазы (б): 1 — 6.04.2019, 2 — 13.04.2019, 3 — 21.04.2019

Fig. 24. Dependences of the strength under uniaxial compression of ice samples drilled perpendicular to the surface of the ice cover on the temperature (a) and the brine volume (b): 1 — 6.04.2019, 2 — 13.04.2019, 3 — 21.04.2019

Значения прочности при одноосном сжатии увеличиваются с уменьшением температуры и объема жидкой фазы. Значения прочности образцов деформированного льда 13 апреля получены в узком диапазоне температур: от $-2,7$ до $-3,4$ °C. У образцов ровного льда, испытанных 21 апреля, самым прочным оказался средний слой, имеющий среднюю температуру и объем жидкой фазы. Чтобы соответствовать международным требованиям к размерам образцов, они имели высоту 25 — 30 см [12]. При такой высоте прочность образцов из верхнего слоя определялась низкой прочностью наложенного льда. В результате коэффициент корреляции полученных зависимостей оказался низким ($R^2 = 0,11 — 0,13$).

Самый большой коэффициент корреляции у зависимостей был получен у образцов деформированного льда 6 апреля (линия 1):

$$\sigma_{\perp} = 4,09 - 0,28 \cdot T_p, R^2 = 0,37,$$

$$\sigma_{\perp} = 6,88 - 20,49 \cdot v_b, R^2 = 0,37,$$

где $\sigma_{\perp}$ — прочность при одноосном сжатии образцов льда, выбуренных перпендикулярно поверхности ледяного покрова (МПа).

Температура большинства образцов льда была высокой. Чтобы обеспечить хрупкое разрушение, скорость деформации составляла $(2 — 4) \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Прочность образцов при одноосном сжатии в подавляющем большинстве случаев изменялась от 3 до 6 МПа. Это соответствует интервалу прочностей льда при сжатии для данных скоростей деформации [13].

На рис. 25 приведены зависимости прочности при одноосном сжатии образцов льда, выбуренных параллельно поверхности ледяного покрова, от температуры и объема жидкой фазы.

Значения прочности при одноосном сжатии увеличиваются с уменьшением температуры и объема жидкой фазы. Значения прочности образцов деформированного льда 14 апреля получены в узком диапазоне температур: от $-3,2$ до $-3,3$ °C.

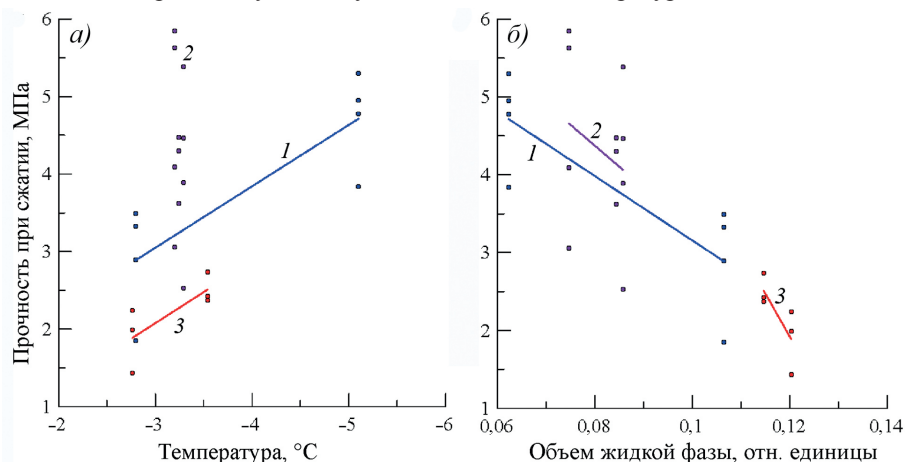


Рис. 25. Зависимости прочности при одноосном сжатии образцов льда, выбуренных параллельно поверхности ледяного покрова, от температуры (а) и объема жидкой фазы (б): 1 — 6.04.2019, 2 — 14.04.2019, 3 — 21.04.2019

Fig. 25. Dependences of the strength under uniaxial compression of ice samples drilled parallel to the surface of the ice cover on the temperature (a) and the brine volume (b): 1 — 6.04.2019, 2 — 14.04.2019, 3 — 21.04.2019

Полученные линейные зависимости имеют вид:

деформированный лед (линия 1)

$$\sigma_{II} = 0,67 - 0,79 \cdot T_p, R^2 = 0,70,$$

$$\sigma_{II} = 7,29 - 41,33 \cdot v_b, R^2 = 0,70,$$

ровный однолетний лед (линия 3)

$$\sigma_{II} = -0,32 - 0,80 \cdot T_p, R^2 = 0,58,$$

$$\sigma_{II} = 15,17 - 110,44 \cdot v_b, R^2 = 0,58,$$

где σ_{II} — прочность при одноосном сжатии образцов льда, выбуренных параллельно поверхности ледяного покрова (МПа).

По разным литературным данным локальная прочность превышает прочность образцов льда при одноосном сжатии в 2 ... 5 раз [2, 14 — 17]. До сих пор еще не разработан универсальный коэффициент или уравнение для надежной связи локальной прочности с прочностью образцов льда при одноосном сжатии или любым другим типом прочности льда [10]. Отчасти это связано с тремя усложняющими факторами. Во-первых, вокруг индентора при его внедрении в стенку скважины развивается сложное поле напряжений, которое не похоже на то, которое встречается в образце в прессе даже при трехосном нагружении. Во-вторых, факторы, которые влияют на прочность малых образцов льда при нагружении в прессе (т.е. скорость деформации/напряжения, направление силы), менее важны для определения локальной прочности. В-третьих, в нормативных документах [14, 18, 19] не регламентированы некоторые условия проведения испытаний образцов льда при одноосном сжатии.

В экспедиции «Трансарктика-2019» соотношение между локальной прочностью и прочностью при одноосном сжатии образцов льда, выбуренных параллельно поверхности льда, для деформированного льда равно 4,5, для деформированного льда у торосистого образования — 4,7. Эти соотношения соответствуют литературным данным.

На основании испытаний локальной прочности льда можно оценивать прочность ледяного покрова при сжатии, не выбуривая керны и не испытывая образцы льда под нагрузкой. Соотношение σ_{loc}/σ_{II} в соответствии с существующими нормативными документами может служить одним из параметров для определения расчетной прочности льда и, соответственно, для расчета ледовых нагрузок на морские сооружения арктического шельфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены данные по морфометрическим, основным физическим и механическим свойствам льда, определенным в экспедиции «Трансарктика-2019». Дрейф основной льдины экспедиции проходил между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Шпицберген. Свойства ледяного покрова в этом районе изучены еще недостаточно.

В период с 28 марта по 28 апреля работы выполнялись на поле сморози однолетнего льда. На льдине имелись многочисленные торосы. Исследования показали, что большая часть льдины является не льдом, выросшим снизу в естественных условиях, а ледяным образованием, сформированным в процессе динамического метаморфизма. Блоки, сложившие этот лед, имеют различное происхождение: куски льда волокнистой структуры, куски льда, сложенные зернистыми кристаллами, набивной и шуговой лед.

Внимания заслуживает факт, что, несмотря на низкие температуры воздуха и температурный градиент во льду, нарастание льда не происходило. Средняя толщина ровного льда за время наблюдений не изменилась, на нижней поверхности отсутствовал ажурный слой. Выдвинуто предположение, что это связано с нахождением льдины в теплых атлантических водах в самом начале экспедиции.

За время экспедиции увеличилась средняя температура и соленость льда. Значения механических характеристик уменьшились с ростом температуры и объема жидкой фазы. Средние значения локальной прочности были близки к значениям, получаемым по квадратичной аппроксимации для льдов в районе НИС «Ледовая база Мыс Баранова». Измерения механических характеристик ровного льда показали, что в целом они соответствуют характеристикам прочности льда с преобладанием волокнистой структуры.

Двухлетние льды все реже встречаются в Арктике. Все реже появляется возможность для их изучения. Сохраняется тенденция к уменьшению площади, покрытой льдом, в конце летнего периода. Двухлетние льды имеют большую, чем однолетние, толщину и прочность, они несут повышенную угрозу судоходству и морским инженерным сооружениям. Поэтому данные о двухлетних льдах имеют особую ценность.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Финансирование. Обработка данных выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ по проекту 5.1.5 ЦНТП Росгидромета «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения».

Благодарность. Авторы выражают благодарность сотруднику ААНИИ А.А. Шушлебину за ценные замечания и предложения при работе над статьей.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. Data processing was carried out as a part of the AARI planned scientific topic under the project 5.1.5 of the Targeted Scientific and Technical Program of Roshydromet (TSTP) “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”.

Acknowledgement. The authors are grateful to A.A. Shushlebin (AARI) for valuable comments and suggestions when working on this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнишин К.А., Тарасов П.А., Ефимов Я.О., Гудошников Ю.П., Ковалев С.М., Миронов Е.У., Макаров Е.И., Нестеров А.В. Исследования ледового режима на акватории Хатангского залива в море Лаптевых // Лед и снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 396–404. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-396-404.
2. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Kolabutin 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. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 193. 012030. doi:10.1088/1755-1315/193/1/012030.
3. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Shushlebin A.I., Kolabutin N.V., Kornishin K.A., Efimov Y.O., Tarasov P.A., Volodin D.A. Physical and Mechanical Characteristics of Sea Ice in the

- Kara and Laptev Seas // International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2019. V. 29. № 4. P. 369 — 374. doi:10.17736/ijope.2019.jc767.
4. Cox G.F.N., Weeks W.F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples // J. of Glaciology. 1983. V. 29. № 102. P. 306–316.
5. Frankenstein G.E., Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from -0.5 to -22.9 °C // J. of Glaciology. 1967. V. 6. № 48. P. 943–944.
6. Фролов И.Е., Иванов В.В., Фильчук К.В., Макитас А.П., Кустов В.Ю., Махотина И.А., Иванов Б.В., Уразильдеева А.В., Семин В.Л., Зимина О.Л., Крылов А.А., Богин В.А., Захаров В.Ю., Мальшев С.А., Гусев Е.А., Барышев П.Е., Пильгаев С.В., Ковалев С.М., Тюряков А.Б. Трансарктика-2019: зимняя экспедиция в Северный Ледовитый океан на НЭС «Академик Трёшников» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 255 — 274.
7. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: Изд-во Главсевморпути, 1945. 360 с.
8. Тышко К.П., Черепанов Н.В., Федотов В.И. Кристаллическое строение морского ледяного покрова. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 68 с.
9. 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.
10. Johnston M.E. Strength-Temperature Relationships for First-year, Second-year and Multi-year Sea Ice // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, USA, June 16 — 21, 2019. P. 707 — 714.
11. Spencer P., Morrison T. Analysis of borehole jack ice strength data using quantile regression // Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'15, June 14 — 18, 2015, Trondheim, Norway. URL: <http://www.poac.com/Papers/2015/pdf/poac15Final00011.pdf> (дата обращения 10.09.2020).
12. Schwarz J., Frederking R., Gavrilov V., Petrov I. et al. Standardized testing methods for measuring of mechanical properties of ice // Cold Regions Science and Technology. 1981. V. 4. P. 245 — 253.
13. Ваганов Р.Х., Гаврилов В.П., Козлов А.И., Лебедев Г.А., Логвин А.И. Дистанционные методы исследования морских льдов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 344 с.
14. ISO/FDIS 19906:2010(E). Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures, 2010. URL: https://www.rosneft.com/upload/site2/01/ISO_19906.pdf (дата обращения 10.09.2020).
15. 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.
16. Masterson D.M. Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests // Can. J. Civ. Eng. 1996. V. 23 (1). P. 165 — 179.
17. Sinha N.K. The Borehole Jack — Is It a Useful Tool? // Proc. of 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAE), 1986. Tokyo, Japan. P. 328 — 335.
18. Свод правил 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазовых сооружений. М.: Госстрой России, 2004. 88 с.
19. 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.

REFERENCES

1. Kornishin K.A., Tarasov P.A., Efimov I.A., Gudoshnikov Iu.P., Kovalev S.M., Mironov E.U., Makarov E.I., Nesterov A.V. Research of ice regime in the water area of the Khatanga Bay in the Laptev Sea. *Led i sneg*. Ice and snow. 2018, 58 (3): 396–404. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-396-404. [In Russian].

2. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Kolabutin N.V. Research of the physical-mechanical properties of sea ice at the scientific research station “Ice base the cape of Baranov”. Proc. Proceedings of the V All-Russian conference with international participation «POLAR MECHANICS», 9—11 oct. 2018, Novosibirsk. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018, 193: 012030. doi:10.1088/1755-1315/193/1/012030.
3. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Shushlebin A.I., Kolabutin N.V., Kornishin K.A., Efimov Y.O., Tarasov P.A., Volodin D.A. Physical and Mechanical Characteristics of Sea Ice in the Kara and Laptev Seas. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2019, 29 (4): 369 — 374. doi:10.17736/ijope.2019.jc767.
4. Cox G.F.N., Weeks W.F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples. J. of Glaciology. 1983, 29 (102): 306 — 316.
5. Frankenstein G.E., Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from -0.5 to -22.9°C . J. of Glaciology. 1967, 6 (48): 943 — 944.
6. Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Y., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Y., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov”. Problemy Arktiki i Antarkтики. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (3): 255 — 274.
7. Zubov N.N. L'dy Arktiki. Ice of the Arctic. Moscow: Publishing house of the Glavsevmorput', 1945: 360 p. [In Russian].
8. Tyshko K.P., Cherepanov N.V., Fedotov V.I. Kristallichesкое stroenie morskogo ledjanogo pokrova. Crystal structure of the sea ice cover. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2000: 68 p. [In Russian].
9. 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 Antarkтики. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 162 — 179. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>.
10. Johnston M.E. Strength-Temperature Relationships for First-year, Second-year and Multi-year Sea Ice. Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019: 707 — 714.
11. Spencer P., Morrison T. Analysis of borehole jack ice strength data using quantile regression. Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'15, June 14 — 18, 2015, Trondheim, Norway. Available at: <http://www.poac.com/Papers/2015/pdf/poac15Final00011.pdf> (accessed 10.09.2020).
12. Schwarz J., Frederking R., Gavrilov V., Petrov I. et al. Standardized testing methods for measuring of mechanical properties of ice. Cold Regions Science and Technology. 1981, 4: 245 — 253.
13. Vagapov R.Kh., Gavrilov V.P., Kozlov A.I., Lebedev G.A., Logvin A.I. Distantsonnye metody issledovaniia morskikh l'dov. Remote sensing methods of sea ice research. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993: 344 p. [In Russian].
14. ISO/FDIS 19906:2010(E). Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures, 2010: Available at: https://www.rosneft.com/upload/site2/01/ISO_19906.pdf (accessed 13.04.2020).
15. 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. S.-Petersburg, IAHR. 2004: 147 — 153.
16. Masterson D.M. Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests. Can. J. Civ. Eng. 1996, 23 (1): 165 — 179.
17. 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.

18. *Svod pravil 11-114-2004. Inzhenernye izyskanija na kontinental'nom shel'fe dlja stroitel'stva morskikh neftegazopromyslovyyh sooruzhenij.* (Set of Rules 11-114-2004. Engineering surveys on the continental shelf for the construction of offshore oil and gas facilities). Moscow: Gosstroy of Russia, 2004. 88 p. [In Russian].

19. *Svod pravil 38.13330.2018. Nagruzki i vozdeystvija na gidrotehnicheskie sooruzhenija (volnovye, ledovye i ot sudov). SNiP 2.06.04-82*.* (Set of Rules 38.13330.2018. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships)). Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2018: 122 p. [In Russian].