

Комплексное исследование старых торосов в Северном Ледовитом океане© 2020 г. Р.Б. Гузенко^{1*}, Е.У. Миронов¹, В.В. Харитонов¹, С.В. Хотченков¹, Р.И. Май¹, В.С. Порубаев¹, С.М. Ковалев¹, К.А. Корнишин², Я.О. Ефимов³¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;²«НК «Роснефть», Москва, Россия; ³Арктический научный центр, Москва, Россия

*guzenko@aari.ru

Comprehensive study of old hummocks in the Arctic OceanR.B. Guzenko^{1*}, Ye.U. Mironov¹, V.V. Kharitonov¹, S.V. Khotchenkov¹, R.I. May¹, V.S. Porubaev¹, S.M. Kovalev¹, K.A. Kornishin², Ya.O. Efimov³¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia;²Rosneft Oil Company, Moscow, Russia; ³Arctic Research Centre, Moscow, Russia

*guzenko@aari.ru

Received May 7, 2019 / Revised August 14, 2019 / Accepted December 13, 2019

Keywords: *composite ridge, comprehensive study, consolidated layer, internal structure, old ice ridge, ridge age, water thermal drilling, 3D-model of ridge.***Summary**

In May 2015, the old hummock located to the North of the Bennett island (the East Siberian Sea) was investigated using several methods, among which were water thermal drilling, tachometric and sonar surveys, underwater video recording, as well as techniques to determine the strength and physical properties of ice. It was found out that only a combination of different methods provides a way to correctly estimate the main morphometric characteristics of a large ice formation and to determine its volume and mass. Analysis of the internal structure of the hummock, obtained by the water thermal drilling with a record of the drilling rate on the logger, made it possible to reveal a composite character of the ice formation (the hummock consisted of two fragments – the large old one and the smaller first-year piece) and to estimate approximately its age (3–4 years). Comparison of the main morphometric characteristics of the old hummock with the average values of first-year hummocks, investigated in the same area and the time, showed that the old hummock had significantly greater geometric parameters: its volume and mass exceeded similar parameters of the average younger formation by factors 5.6 and 5.8, respectively. This significant difference allows suggestion that the reason is not the age but a composite structure of the old formation. The average thickness of the consolidated layer of the old hummock equal to 4.6 m is almost twice larger than similar parameter of a first-year hummock (2.33 m) while the average value of the thickness in the old part of the old hummock (5.22 m) is larger than that of a young one by the factor 2.2. Note also, that the old hummock is characterized by almost complete smoothness (impossible to separate individual blocks) and minimal porosity (1%) of its ice. The salinity and density of the ice composing the frontal part of the old hummock is much smaller than in first-year hummocks. The average density of ice in the old hummock, determined analytically from the buoyancy condition, was equal to 896 kg/m³, while the average density of ice in the first-year hummocks, determined from measurements, – 917 kg/m³.

Citation: Guzenko R.B., Mironov Ye.U., Kharitonov V.V., Khotchenkov S.V., May R.I., Porubaev V.S., Kovalev S.M., Kornishin K.A., Efimov Ya.O. Comprehensive study of old hummocks in the Arctic Ocean. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (3): 431–444. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420030050.

Поступила 7 мая 2019 г. / После доработки 14 августа 2019 г. / Принята к печати 13 декабря 2019 г.

Ключевые слова: *внутренняя структура, водяное термобурение, возраст тороса, комплексное исследование, консолидированный слой, составной торос, старый торос, 3D-модель.*

На основе исследования морфометрии, внутренней структуры и физико-механических свойств старого тороса на северо-западе Восточно-Сибирского моря сделан вывод, что он состоит из более крупного старого и меньшего однолетнего фрагментов. Средняя толщина консолидированного слоя в старой части тороса больше, чем в среднем у однолетних торосов, в 2,2 раза.

Введение

Торосы, представляя собой характерные для замерзающих акваторий ледяные образования, вызывают как научный, так и практический ин-

терес. Научный интерес вызван необходимостью лучшего понимания сложного механизма природных процессов, определяющих распределение параметров торосов в пространстве и их эволюцию во времени, что способствует раскрытию фунда-



Рис. 1. Исследование старого тороса на северо-западе Восточно-Сибирского моря (красными маркерами отмечены видимые точки бурения на профиле)

Fig. 1. Study of old ice ridge in the north-west of the East Siberian Sea (visible points of drilling on the profile are marked by red)

ментальных закономерностей изменчивости ледяного покрова в целом. Практический интерес связан, в частности, с возрастающей хозяйственной активностью нефтяных и газовых компаний, ведущих или планирующих свою деятельность на шельфе арктических и замерзающих морей. Крупные гряды торосов отличаются внушительной массой, и их движение включает в себе угрозу повреждения шельфовой морской инфраструктуры. Для определения возможной ледовой нагрузки на морские объекты необходимо знать характерные для конкретного района средние и экстремальные значения морфометрических параметров ледяных образований: как внешних — длину гребня, высоту и ширину паруса, глубину и ширину киля, общую толщину, так и параметров внутренней структуры — пористость, толщину консолидированного слоя (КС) и другие.

С 2001 г. с помощью технологии водяного термобурения с записью скорости бурения на электронный носитель, разработанной под руководством В.А. Морева [1], специалисты Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) получили значительный объём информации по морфометрии и внутренней структуре торосов в замерзающих морях [2–5]. Только в период

2013–2017 гг. в рамках исследований ледяного покрова на лицензионных участках «НК «Роснефть» в российских арктических морях было детально исследовано 138 однолетних торосов. Морфометрия старых (двух- и многолетних) торосов по сравнению с однолетними торосами изучена значительно хуже [6], особенно это касается внутренней структуры [7]. Вопросы морфометрии старых торосов затрагивались в ряде работ [8–19 и др.], однако в большинстве из них рассматривались лишь отдельные характеристики. Кроме того, предлагаемые авторами методы исследования параметров не всегда позволяли определять их с достаточной точностью.

9 мая 2015 г. в результате высадки с атомного ледокола «Ямал» на дрейфующий лёд к северу от о. Беннетта в Восточно-Сибирском море участниками совместной экспедиции ААНИИ и «НК «Роснефть» было проведено комплексное исследование старого тороса с помощью различных методов (рис. 1). Задачи настоящей статьи — обсуждение результатов данного исследования, а также сравнительный анализ основных морфометрических и физико-механических характеристик старого тороса с соответствующими параметрами однолетних торосов, исследованных в тот же период в том же районе.

Общая характеристика ледяного образования и гидрометеорологических условий

Ледовая станция, на которой исследовался старый торос, находилась на поле сморози двух- и однолетнего льда в точке с координатами 77°05,1' с.ш. и 149°12,6' в.д. Во время работ были следующие гидрометеорологические условия: температура воздуха –12,1 °С; ветер северо-восточный 7 м/с, ясно; температура морской воды подо льдом –1,48 °С; солёность морской воды 26,83 ‰; глубина моря 43 м. Старый торос представлял собой сложное ледяное образование, у которого можно было выделить два гребня (см. рис. 1). На рис. 2 показан рельеф верхней поверхности старого тороса по данным тахеометрической съёмки. Там же отмечены профиль термобурения, точки проведения гидролокационной съёмки и видеосъёмки с помощью телеуправляемого подводного аппарата. Первый гребень — наиболее высокий и прямой, вытянут на рис. 2 от правого нижнего угла к лево-

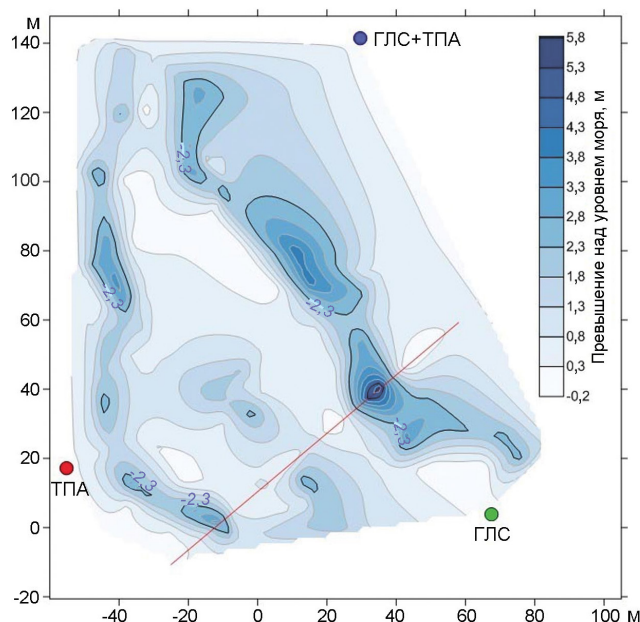


Рис. 2. Рельеф верхней поверхности старого тороса по данным тахеометрической съёмки.

Цветными кружками показаны майны, с которых проводились гидролокационная съёмка (ГЛС) и видеосъёмка телеуправляемым подводным аппаратом (ТПА) «Гном». Красная линия — профиль бурения

Fig. 2. Top surface relief of the old ice ridge by the tachometric survey.

The colored circles show the points for sonar survey and video filming by «Gnom» underwater remotely operated vehicle. The red line is the drilling profile

му верхнему; второй гребень имеет дугообразную форму и расположен на рис. 2 левее. По данным тахеометрической съёмки длина надводной части старого тороса составила 153 м, ширина — 95 м. Надводная часть тороса была сглаженной без видимых отдельных блоков.

Методика исследования

Комплексное исследование ледяных образований подразумевает использование нескольких методов, дополняющих друг друга и позволяющих в совокупности получить наиболее объективную картину. Основные методы определения морфометрических характеристик старого тороса следующие: 1) водяное термобурение с записью скорости бурения на логгер; 2) тахеометрическая съёмка верхней поверхности ледяного образования; 3) гидролокационная съёмка нижней поверхности ледяного образования; 4) ви-

деосъёмка кия тороса с помощью телеуправляемого подводного аппарата. В дополнение к морфометрическим исследованиям определялись физико-механические свойства льда, слагающего торос.

Для *водяного термобурения тороса* использовалась разработанная и изготовленная в ААНИИ установка водяного бурения льда с записью скорости бурения УВБЛ-2М. Установка УВБЛ-2М В.А. Морева [20] предполагает одновременную работу двумя постами, каждый из которых оснащён буровым, измерительным и записывающим комплектами. Общий принцип технологии заключается в том, что скорость бурения обусловлена состоянием проходимой буром среды, которую подразделяют на три типа: твёрдый лёд, рыхлый лёд и полость. В процессе бурения буровой шланг вращает измерительное колесо преобразователя и мгновенная скорость погружения бура в скважине записывается на логгер. Попутно в скважине специальным электронным щупом измеряется превышение льда над уровнем моря и определяется толщина снега.

При обработке данных термобурения определяют величины надводной и подводной частей ледяного образования, а также границы пустот и льда разной плотности в скважине. Технология водяного термобурения с записью скорости бурения на электронный носитель позволяет определять внешние параметры ледяного образования (высоту паруса, глубину кия, общую толщину) и исследовать внутреннюю структуру в скважине (выделять слои твёрдого, рыхлого льда и полости), что в результате даёт возможность оценить границы консолидированного слоя, а также определить пористость (относительное содержание пустот в толще тороса; устанавливается отношением суммарной протяжённости полостей в скважинах к суммарной протяжённости скважин), размеры пустот, содержание твёрдого льда и др.

Выделение границ консолидированного слоя — особая задача при обработке данных термобурения. Этот процесс происходит в два этапа. Сначала с помощью формального алгоритма автоматически определяют пространство, занимаемое твёрдым льдом, находящимся наиболее близко к уровню воды. Затем проводится экспертная коррекция результатов формального выделения. При этом подразумевается, что в консолидированном слое отсутствуют пустоты (исключая неболь-

шие каверны внутри слоя твёрдого льда) и толстые слои рыхлого льда. Как правило, не должно быть и резких перепадов положения границ консолидированного слоя между соседними точками. Кроме того, при определении консолидированного слоя учитывается характер графика скорости бурения в зоне предполагаемого слоя и смежных с ним областей. В спорных моментах для более надёжного определения границ консолидированного слоя в конкретных точках использовали данные локальной прочности льда, если она была измерена в этих же точках с помощью зонд-индентора.

Тахеометрическая съёмка велась с помощью электронного тахеометра M3 DR Trimble Access. Съёмка включала в себя точки профиля бурения, а также все наиболее значимые фрагменты рельефа верхней поверхности ледяного образования.

Гидролокационная съёмка нижней поверхности ледяного образования выполнялась гидролокатором кругового обзора Imagenex 881A, оборудованным приводом вращения Azimuth Drive и модулем ориентации. Результаты гидролокационной съёмки позволяют получать трёхмерное изображение поверхностей с точностью до нескольких сантиметров. Обычно гидролокационная съёмка подводной поверхности проводится с двух-трёх точек в зависимости от размера и конфигурации ледяного образования, а также имеющегося в распоряжении рабочего времени. Гидролокатор кругового обзора опускается в заранее подготовленную майну с треноги при помощи ручной лебёдки на необходимую для оптимального охвата глубину и оттуда ведёт съёмку. Гидролокационная съёмка выполняется в режиме профилирования по секторам с определённым шагом, который можно увеличивать для ускорения сканирования и уменьшать для большей детализации съёмки. Средняя продолжительность одного сканирования поверхности ледяного образования — 1,5 часа без учёта времени на мобилизацию/демобилизацию в каждой точке. Гидролокационная съёмка нашего тороса выполнялась с двух точек, глубина погружения гидролокатора — 36,7 и 37,8 м.

Видеосъёмка кия тороса проводилась при помощи телеуправляемого подводного аппарата «Гном». Обычно его погружение происходит поочередно с гидролокатором кругового обзора в одни и те же майны. Всего для съёмок кия тороса использовали три подготовленные майны, одна майна — только под гидролокационную

съёмку, одна — под видеосъёмку и одна — под обе съёмки (см. рис. 2).

Определение физико-механических свойств льда вели следующим образом. С помощью керноотборника «Kovacs Enterprise» с внутренним диаметром 141 мм выбуривался керн льда, для которого описывалась текстура льда. Для измерения температуры льда с дискретностью 10 см в отобранном керне просверливали отверстия диаметром 3 мм и глубиной 70 мм, куда помещали шуп термометра GTN 175/МО. Для измерения плотности керн на распиловочной машинке распиливался на отдельные цилиндры таким образом, чтобы лёд в цилиндре был однородным по текстурным признакам. Высота цилиндра колебалась от 10 до 15 см. Отпиленный цилиндр измерялся с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм и взвешивался на электронных весах. По полученным значениям массы цилиндра и его объёма вычислялась плотность льда. Для взятия проб на солёность из керна при помощи распиловочной машинки с дискретностью 10 см отпиливали диски толщиной 2–3 см, которые помещали в герметичные полиэтиленовые пакеты. В лабораторных условиях лёд в закрытых пакетах находился до полного растапливания. При достижении талой водой комнатной температуры (20 °С) с помощью кондуктометра типа HI 8733 «HANNA» измерялась её электропроводность, на основании которой вычислялась солёность.

Локальную прочность льда исследовали с помощью изготовленного в ААНИИ зонд-индентора [21, 22]. Скважину в ледяном покрове для испытаний на локальную прочность льда подготавливали с помощью мотобура диаметром 250 мм. Глубина скважины в парусе тороса составила 2,2 м; ещё в двух скважинах прочность измерялась до глубины 90 см. Для определения локальной прочности льда в скважине на рабочий шток зонда устанавливали индентор диаметром 9 см. Локальную прочность льда тестировали с шагом 30 см по всей глубине скважины. Внедрение индентора сопровождалось хрупкопластическим разрушением льда. Во время испытаний фиксировали перемещение индентора и давление в системе. Одновременно давление в системе зонда контролировали образцовым манометром. На основании полученных данных о времени нагружения, давлении в системе и глубине внедрения индентора для каждого испытания определялась локальная прочность льда.

С помощью полевой испытательной машины (пресса) ПИМ–200М измеряли прочность круглых пластин льда на изгиб. Для этого использовали выпиленные циркулярной пилой из керна диски толщиной примерно 19 мм. В начале и в конце серий измерений проводили тарировку пресса с помощью образцового динамометра. Продолжительность деформирования диска льда от момента приложения силы до разрушения диска льда составляла от 0,7 до 1,2 с. Максимальное значение силы в момент разрушения образца измеряли по показаниям динамометра с индикатором, оснащённым стрелкой, фиксирующей максимальное значение.

Основные результаты

Морфометрические характеристики. Поперечный профиль бурения (см. рис. 1–3) пересекал оба гребня тороса, проходя через точку максимальной высоты паруса (точка № 18 на профиле) – 5,7 м. Преобладающая дискретность измерений на профиле – 5 м, только в районе первого гребня с целью захвата его максималь-

ного превышения была размечена промежуточная точка (№ 5), расстояние которой от точек № 4 и 6 составило 3 и 2 м соответственно. При этом если точку максимального превышения паруса можно качественно оценить визуально и, проложив через эту точку профиль бурения, измерить превышение электронным уровнем в скважине или с помощью тахеометра, то максимальное значение осадки кия на профиле бурения уловить практически невозможно. Для этого необходимо использовать данные гидролокационного зондирования кия. По результатам гидролокационной съёмки максимальная осадка кия старого тороса – 17,5 м, что существенно больше максимальной глубины кия на профиле термобурения (13,21 м). Таким образом, отношение максимальных значений кия и паруса старого тороса составило 3,07. Это – несколько меньше средних значений соотношения киль/парус, приведённых для старых торосов в работах [10, 13, 17] и оценённых от 3,22 до 3,55. В контексте соотношения киль/парус отметим значительную максимальную высоту паруса нашего тороса (5,7 м). Среди 139 торосов, исследованных в морях Российской Аркти-

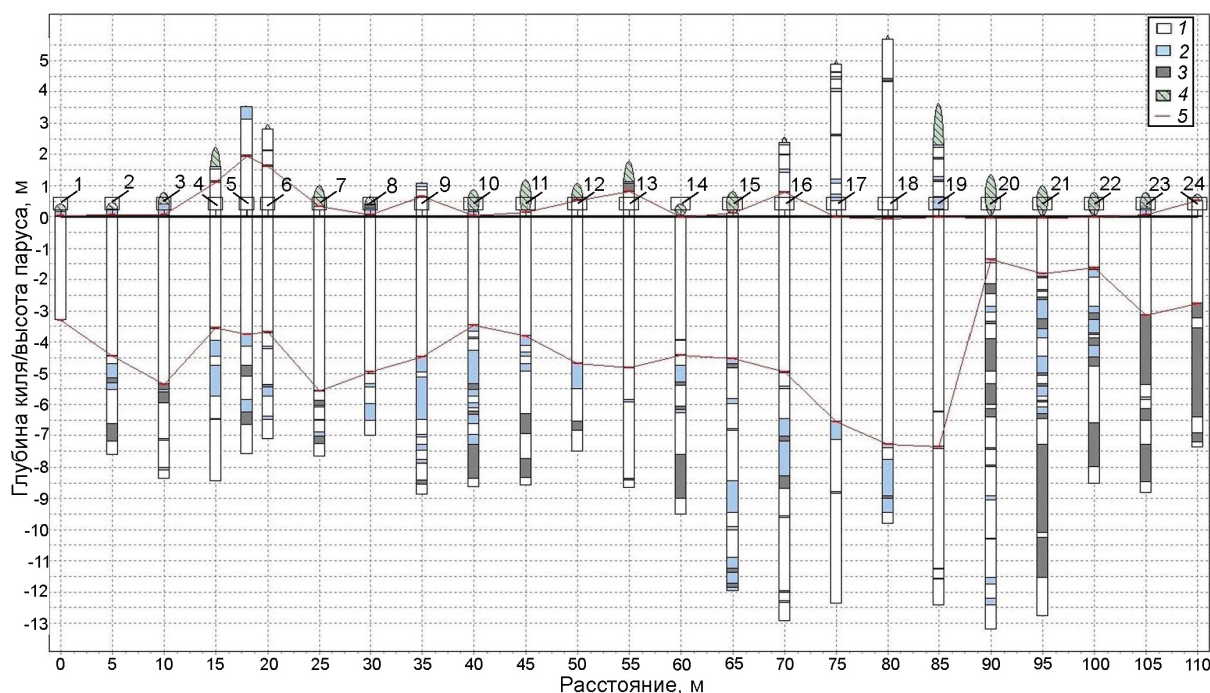


Рис. 3. Профиль термобурения старого тороса:

1 – твёрдый лёд; 2 – рыхлый лёд; 3 – полость; 4 – снег; 5 – границы консолидированного слоя

Fig. 3. Cross-sectional profile of thermodrilling of old ice ridge:

1 – hard ice; 2 – soft ice; 3 – void; 4 – snow; 5 – boundaries of consolidated layer

Таблица 1. Основные морфометрические характеристики старого и однолетних торосов

Параметры	Старый торос	Однолетние торосы (среднее по восьми торосам)
Высота паруса (макс.), м	5,7	3,82
Осадка киля (макс.) по ТБ, м	13,21	11,44
Осадка киля (макс.) по ГЛС, м	17,5	12,57
Отношение макс. киль/макс. парус	3,07	3,46
Общая толщина льда (сред.), м	6,33	6,30
Длина гряды (по килю), м	170	97
Ширина гряды (по килю), м	130	49
Объём паруса, тыс. м ³	13,7	2,7
Объём киля, тыс. м ³	169,8	29,8
Объём всего тороса, тыс. м ³	183,5	32,5
Толщина КС (сред.), м	4,60	2,33
Отношение КС/общая толщина	0,73	0,37
Пористость паруса, %	1	15
Пористость киля, %	12	15
Пористость всего тороса, %	11	15
Масса тороса, тыс. т	146,1	25,3

ки в 2013–2017 гг., именно высота старого тороса (остальные 138 торосов были однолетними) оказалась наибольшей.

Сравним морфометрические характеристики старого тороса и восьми однолетних торосов, исследованных в том же районе и в тот же период (с 6 по 15 мая 2015 г.). В табл. 1 приведены значения основных морфометрических характеристик старого тороса и средние значения аналогичных параметров по восьми однолетним торосам. Видно, что почти все значения параметров старого тороса превосходят соответствующие значения однолетних торосов. Несмотря на то, что для исследования однолетних торосов выбирали самые крупные ледяные образования из доступных в интересующем нас районе, средние значения их вертикальных (парус, киль, общая толщина) и горизонтальных (длина и ширина) размеров всё равно уступали соответствующим характеристикам старого тороса. Только соотношение киля и паруса традиционно [13, 17] оказалось выше в однолетних торосах.

В табл. 1 даны максимальные значения осадки киля по данным термобурения и гидролокационной съёмки. Очевидно, что наиболее глубокие участки киля с большой вероятностью не совпадают с размеченными по поверхности точками бурения, поэтому данные гидролокацион-

ной съёмки для определения данного параметра более объективны. Разница в горизонтальных и вертикальных размерах между старым и однолетними торосами наиболее показательна в оценках объёмов ледяных образований – объём старого тороса превышает средний объём однолетнего примерно в 5,6 раза. Для нахождения объёма использовали данные тахеометрической и гидролокационной съёмки. Как показал сравнительный анализ, объём по данным термобурения обычно несколько завышен относительно тахеометрической съёмки объёма надводной части тороса, так как профили бурения традиционно прокладываются через наиболее высокие участки паруса. В то же время относительно гидролокационной съёмки объёма наиболее крупной, подводной, части тороса (в связи с тем, что профили бурения не всегда захватывают всю ширину киля и редко проходят через наиболее глубокие его участки) он занижен, что приводит к уменьшению общего объёма ледяного образования.

По данным съёмок определена горизонтальная площадь ледяного образования, а по отношению общего объёма и площади подсчитана средняя общая толщина льда в торосе, которая составила 6,33 м, что довольно близко к средней толщине льда в однолетних торосах (6,30 м). На рис. 4 показаны объёмные изображения (3D-модель) старого тороса, полученные по данным тахеометрической и гидролокационной съёмки. На рис. 5 приведён кадр видеосъёмки. Большая часть киля тороса представляла собой крупные монолитные сглаженные фрагменты, характерные для старых ледяных образований.

Внутренняя структура. Существенные отличия между торосами разного возраста проявляются и в ключевых характеристиках внутренней структуры – толщине консолидированного слоя и пористости. Средняя толщина консолидированного слоя старого тороса превышает среднюю толщину консолидированного слоя однолетних торосов, исследованных в то же время в том же районе, почти в 2 раза. Учитывая приблизительно равные значения общей толщины льда в старом и осреднённом однолетнем торосе, относительная толщина консолидированного слоя старого тороса (отношение толщины консолидированного слоя к общей толщине) также выше почти вдвое. Общая пористость в старом торосе – ожидаемо ниже. Если средняя пори-

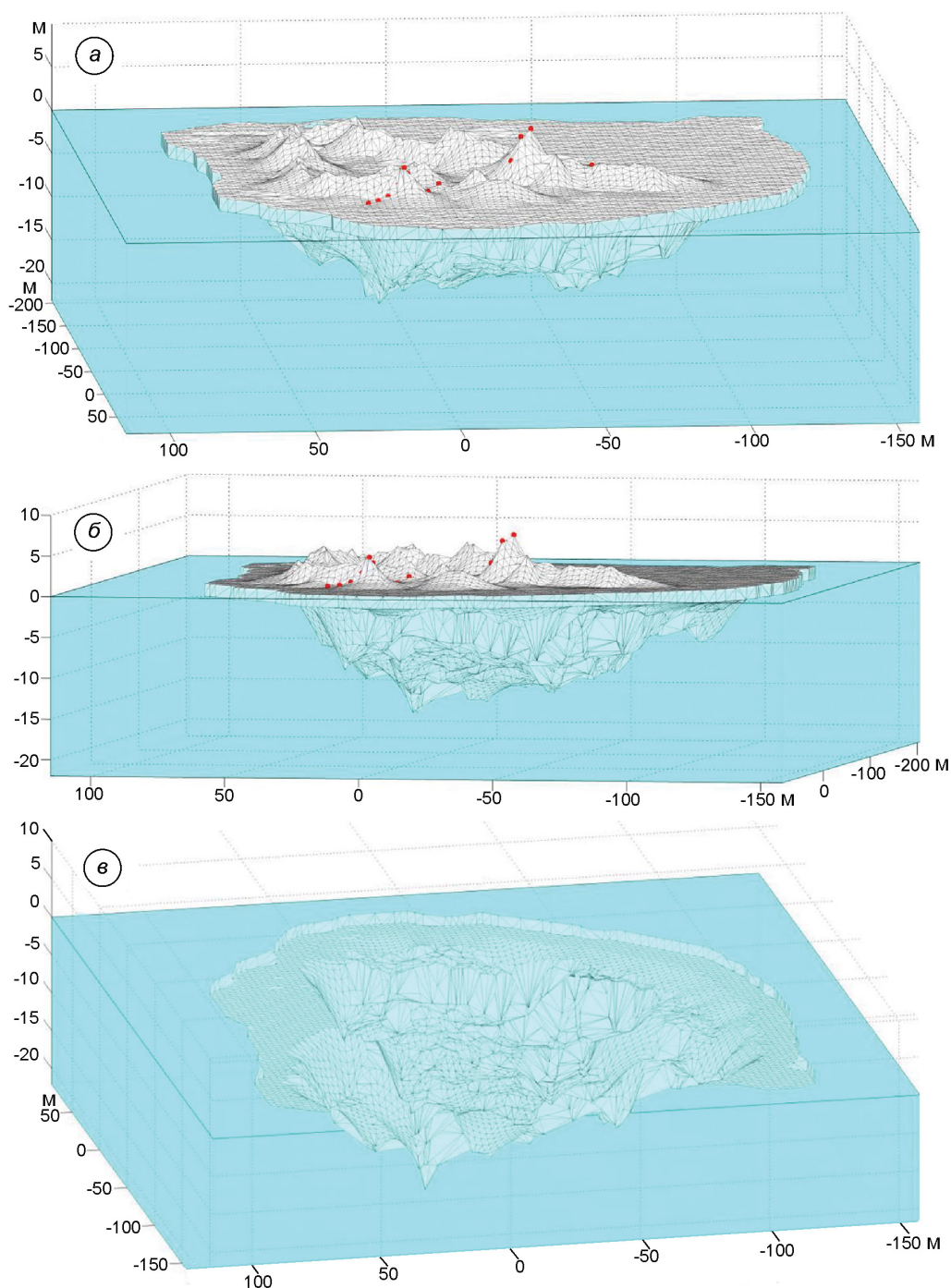


Рис. 4. 3D-модель старого тороса.

Виды сверху (а), сбоку (б) и снизу (в). Красными маркерами отмечены видимые точки бурения на профиле

Fig. 4. 3D-model of old ice ridge.

Views from above (a), side (b) and bottom (c). Visible points of drilling on the profile are marked by red

стость киля сопоставима с пористостью однолетних торосов, то близкая к нулевой пористость паруса представляет собой характерный признак старого тороса [10, 15, 16, 18]. Имея значения объёма и пористости, остаётся только уточнить плотность льда в торосе, чтобы определить его массу. Измерения плотности льда, проводившиеся на разных горизонтах в однолетних торосах, дают среднее значение 917 кг/м^3 . На старом то-

росе плотность измеряли в верхней 135-сантиметровой части паруса. Она варьировалась от 524 до 783 кг/м^3 . Однако плотность льда в верхней части паруса старых торосов, как правило, ниже среднего значения по всему ледяному образованию. Зная плотность воды (1021 кг/м^3), объёмы надводной и подводной частей тороса, пористость паруса и киля, среднюю толщину снежного покрова в торосе (50 см), мы попыта-



Рис. 5. Видеосъёмка кия старого тороса с помощью телеуправляемого подводного аппарата «Гном».

На кадре указаны дата и время исследования, глубина погружения и направление движения аппарата

Fig. 5. Video filming of the ice ridge keel using the «Gnom» underwater remotely operated vehicle.

The frame shows the date and time of the study, the depth of submersion and the direction of movement of the vehicle

лись аналитически определить среднюю плотность льда в торосе по следующей формуле:

$$\rho_{\text{л}} = \rho_{\text{в}} V_{\text{к}} / (V_{\text{т}} + V_{\text{с(л.э.)}}), \quad (1)$$

где $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда; $\rho_{\text{в}}$ — плотность морской воды; $V_{\text{к}}$ — объём кия с учётом пористости; $V_{\text{т}}$ — объём всего тороса с учётом пористости; $V_{\text{с(л.э.)}}$ — объём снега на поверхности тороса в ледовом эквиваленте (при плотности снега 350 кг/м³).

По нашим оценкам, средняя плотность льда в торосе составила 896 кг/м³. Приведённые в работах [8, 10, 16, 23, 24] средние значения плотности льда в старых торосах варьируют от 843 до 940 кг/м³. А. Ковакс с соавторами рассчитали плотность льда в многолетнем торосе в море Бофорта также исходя из закона изостатического равновесия и получили значение 910 кг/м³ (при плотности снега 450 кг/м³), что неплохо согласуется со средним измеренным авторами значением — 900 кг/м³ [8]. Используя наше расчётное значение плотности (896 кг/м³) при определении массы старого тороса, мы получили соотношение масс старого тороса и среднего однолетнего тороса (при плотности 917 кг/м³) в данном районе чуть большим соотношения объёмов — 5,8.

Физические и прочностные свойства льда. Попутно с морфометрическими исследованиями ле-

дяного образования определяли физико-механические свойства льда, слагающего торос. В парусе малого гребня тороса в 1,5 м от точки № 5 профиля бурения был отобран 135-сантиметровый керн льда. Дальнейшее взятие керна в точке было затруднительно из-за хрупкости нижележащего слоя льда. Текстура взятого керна описана следующим образом. *Верхние 0,17 м* состояли из белого непрозрачного льда, сформировавшегося в результате полной перекристаллизации первичных кристаллов. Воздушные включения имели неправильную форму и диаметр 0,5–3,0 мм. *Лёд с 0,17 м до 1,0 м* имел горизонтальную и вертикальную слоистость, образованную извилистыми включениями вертикального расположения, появившимися в результате замерзания талой воды в стоковых каналах. Диаметр включений — 1,0–5,0 мм, их высота — от 1,0 до 10,0 мм. *Лёд от 1,0 до 1,35 м* сохранял воздушные включения, подобные в вышележащих слоях, но на некоторых участках появлялись включения, образовавшиеся от соединения и трансформации мелких пузырьков капиллярных первичных включений, характерных для льда, сложенного волокнистыми кристаллами, т.е. на этом участке наблюдалось частичное сохранение признаков первоначальной кристаллической структуры.

На рис. 6 показано распределение *температуры и плотности льда* по вертикали в керне. Средняя температура льда керна составила $-10,0^{\circ}\text{C}$. Минимальная температура $-11,9^{\circ}\text{C}$ наблюдалась на поверхности льда, а максимальная — $-9,4^{\circ}\text{C}$ в слое 0,2–0,3 м. Средняя солёность льда — 0,04 ‰. Максимальная солёность 0,07 ‰ обнаружена на горизонте 0,1 м, а минимальная солёность 0,01 ‰ — на горизонте 0,2 м. Практически лёд керна полностью опреснён. Средняя плотность льда в керне составила 704 кг/м³. Минимальная плотность 524 кг/м³ наблюдалась в верхнем 9-сантиметровом слое, а максимальная плотность 783 кг/м³ в слое 0,25–0,38 м. Солёность льда в соседних однолетних торосах составила 3,53–4,94 ‰, а плотность льда — 897–925 кг/м³.

Прочность дисков из льда керна на изгиб с 95%-й вероятностью находилась в интервале 0,69–1,05 МПа. Средняя прочность — 0,87 МПа. Это значение превышает прочность ровного однолетнего льда, но меньше прочности ровного двухлетнего льда в данном регионе.

Тринадцать измерений *локальной прочности льда* выполнены в трёх скважинах на старом торо-

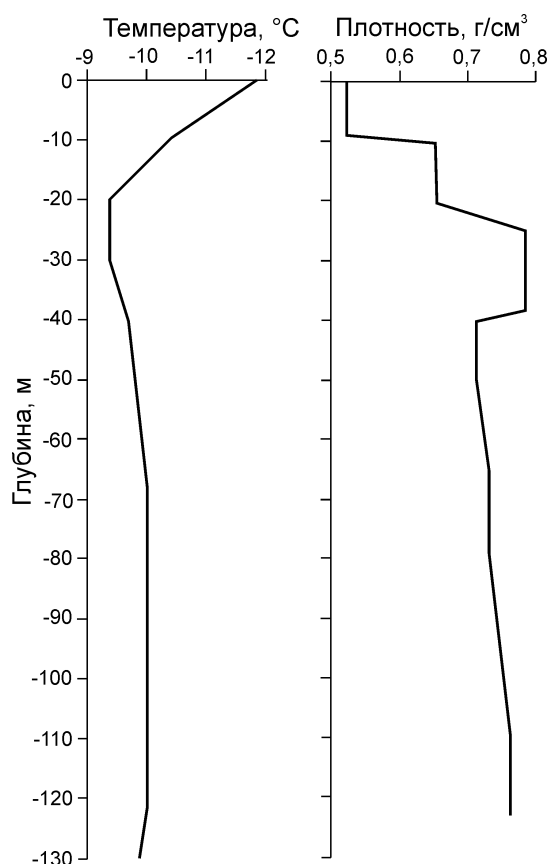


Рис. 6. Вертикальные профили температуры и плотности льда в керне

Fig. 6. Vertical profiles of temperature and density of ice in the core

се: семь измерений — в парусе тороса до глубины 2,2 м вблизи точки № 5 профиля термобурения, а также по три измерения (до глубины 90 см) в районе точек термобурения № 1 и 2. Значения локальной прочности, осреднённой по глубине скважины, находятся в диапазоне 5,09–18,85 МПа, среднее значение — 8,88 МПа. Это существенно меньше средних значений прочности в однолетних торосах (15,72 МПа), прочности ровного однолетнего льда (16,73 МПа) и прочности двухлетнего ровного льда (19,38 МПа). При анализе данных локальной прочности в старом торосе необходимо учитывать, что большинство значений (семь из тринадцати) получены в парусе тороса — зоне, наиболее подверженной в течение нескольких лет термометаморфизму в результате воздействия солнечной радиации. Среднее значение локальной прочности в парусе — 6,23 МПа. Также невысокое среднее значение прочности установлено в районе точки № 1 — 5,09 МПа. Наиболее

высокое среднее по скважине значение определено в районе точки № 2 — 18,85 МПа, при этом значения, полученные на горизонтах 60 и 90 см (соответственно 23,78 и 25,47 МПа), скорее всего, соответствуют консолидированному слою тороса.

Табл. 2 показывает значения солёности, плотности и локальной прочности льда, полученные в нашем старом торосе, а также в старых торосах по публикациям различных исследователей. Сравнивая наши данные с приведёнными литературными сведениями, отметим следующее. Солёность верхней части паруса нашего тороса близка к нулю и соответствует нижней границе солёности многолетнего льда. Средняя измеренная плотность тороса даже ниже диапазона плотностей других исследователей. Локальная прочность льда в несколько раз меньше приведённых в работе [19] значений. Однако М. Джонстон оперировал данными локальной прочности, определённой с помощью приборов, отличных от разработанного в ААНИИ зонд-индентора, и по иной методике. Следует также учитывать, что наши значения солёности, плотности и локальной прочности льда получены на основании измерений, сделанных в основном в верхней части крупного паруса тороса, где данные характеристики в старых торосах обычно принимают минимальные значения. Это обусловлено тем, что за время жизни такого тороса рассол успевает стечь с поверхности вниз почти полностью. С опреснением уменьшается плотность льда, а низкая прочность в верхних слоях связана с процессом термометаморфизма.

Оценка возраста тороса

Определение «старый торос», используемое по отношению к исследуемому ледяному образованию, объединяет понятия «двухлетний» и «многолетний» торосы. Можно ли достоверно установить возраст нашего тороса? К сожалению, одного отобранного керна недостаточно для точной идентификации его возраста. Мы имеем информацию, содержащую косвенные признаки возраста. Каждый из этих признаков нельзя считать определяющим, но вместе они, возможно, позволят прояснить вопрос.

Во-первых, прилегающий к старому торосу лёд соответствовал как однолетнему, так и двухлетнему возрасту. Измеренная толщина прилегающего

Таблица 2. Сравнение некоторых физико-механических характеристик льда в парусе старых торосов по литературным источникам

Источник	Солёность, ‰	Плотность, кг/м ³	Локальная прочность, МПа
Авторы настоящей статьи	0,01–0,07, среднее 0,04	524–783, среднее 704	5,09–18,85, среднее 8,88
A. Kovacs et al. [8]	0,0–3,0, в верхних 1,5 м – 0,0–0,2	825–900	–
A. Kovacs [10]	0,0–1,0	825–831	
G. Cox and J. Richter-Menge [24]	0,76±0,66	854±37	
K.V. Høyland et al. [14]	0–1,27, среднее 0,52	710–890, среднее 830	
L. Strub-Klein et al. [16]	0,10–0,84	720–790	
M. Johnston [19]	0,5–2,6	–	25–34*

*Осреднённые по глубине данные приведены для температуры льда –10 °С. Прочерки – нет данных.

ровного льда довольно сильно варьировалась (от 0,9 до 1,9 м), но в среднем составляла 1,5 м. Керн льда, взятый на ровном льду в непосредственной близости от тороса, по текстуре относился к двухлетнему льду. Однако возраст тороса может не совпадать с возрастом прилегающего к нему льда.

Во-вторых, различные исследователи отмечают в своих работах почти полную консолидацию многолетних торосов [8, 10, 14, 15, 25]. Однако неполная консолидация внутри старого тороса давала основание авторам ограничить его возраст двумя годами [10, 14, 16]. В работе [15] три из четырёх рассматриваемых старых торосов имели нулевую пористость и один торос имел общую пористость 18% (парус – 4% и киль – 22%). Средняя пористость паруса, киля и общая пористость в двухлетнем торосе, по данным В.В. Харитонова [18], составляла соответственно 1, 6 и 5%. Л. Страб-Кляйн с соавторами [16] приводят по пяти двухлетним торосам средние значения пористости паруса, киля и общей соответственно 4, 12 и 11%. Наш торос имеет близкую к нулевой пористость паруса (1%), но довольно значительные показатели пористости киля (12%) и общей пористости (11%), что, руководствуясь приведёнными здесь оценками, следует считать за признак двухлетнего тороса. Относительное содержание твёрдого льда в нашем торосе составило 79% (в парусе 90%, в киле 78%), а относительная толщина консолидированного слоя – 73%. В то же время в отдельных работах [18, 25] приводятся сведения о том, что на молодых многолетних и двухлетних торосах могут быть различимы отдельные блоки в парусе. Парус нашего старого тороса был почти полностью сглаженным.

Ещё один косвенный признак возраста – средняя толщина консолидированного слоя тороса. В работе [15] средняя толщина консоли-

дированного слоя в торосе с ненулевой общей пористостью оценена в 2,4 м, а в трёх торосах с нулевой пористостью – около 6 м. В.В. Харитонов [18] показывает, что средняя толщина консолидированного слоя в двухлетнем торосе равна 2,4 м. Среднее значение толщины такого слоя нашего тороса было 4,6 м. Однако, если обратить внимание на распределение консолидированного слоя по профилю бурения (см. рис. 3), то можно заметить существенно более низкие относительно большей части тороса толщины консолидированного слоя на участке точек № 20–24. Если для точек № 1–19 среднее значение толщины этого слоя составляет 5,22 м, то для точек № 20–24 – всего 2,23 м, что весьма близко к средней толщине консолидированного слоя однолетних торосов (2,33 м), исследованных в тот же период в этом районе.

Также существенные различия можно видеть в пористости двух фрагментов. Средняя пористость второго фрагмента (33,4% для точек № 20–24) больше средней пористости первого (4,6% для точек № 1–19) более чем в 7 раз. Вполне вероятно, наше ледяное образование представляет собой составной торос из более крупного старого и относительно небольшого однолетнего фрагментов. В работе [5] нам удалось связать с помощью эмпирических коэффициентов среднюю толщину консолидированного слоя однолетних торосов, исследованных в разных районах морей Карского и Лаптевых, с суммой градусо-дней мороза, подсчитанной по данным полярных станций, соответствующих районам исследований, следующим уравнением:

$$H_{\text{КС}} = 6,64(\Sigma^{\circ}\text{C})^{1/2} - 231, \quad (2)$$

где $H_{\text{КС}}$ – средняя толщина консолидированного слоя, см; $\Sigma^{\circ}\text{C}$ – сумма градусо-дней мороза.

Поскольку точное время образования консолидированного слоя в торосах (как и точное время образования самих торосов) нам не известно, то сумма градусо-дней мороза рассчитывалась от даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С, а конец расчётного периода соответствовал времени исследования торосов в конкретном районе. Вид предложенной зависимости исходит из теоретической формулы Стефана, показавшей, что толщина льда пропорциональна квадратному корню из суммы градусо-дней мороза. Ближайшая действующая метеостанция к району исследования старого тороса – полярная станция на о. Котельный. Согласно её данным, сумма градусо-дней мороза за два зимних сезона с 7 сентября 2013 г. (день устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С) по 9 мая 2015 г. (день исследования старого тороса) составила 9058. Если брать только зимние периоды, то сумма градусо-дней мороза за две зимы (до 9 мая 2015 г.) будет равна 9415. Подставив в формулу (2) среднюю толщину консолидированного слоя тороса 4,60 м, получим соответствующее ей значение суммы градусо-дней мороза 10 830. А если мы возьмём среднее значение толщины консолидированного слоя для заведомо старого фрагмента тороса (точки № 1–19) равным 5,22 м, то соответствующая ей сумма градусо-дней мороза составит 12 860. В обоих случаях расчётная по формуле (2) сумма градусо-дней мороза превышает сумму градусо-дней за две зимы (2013/2014 и 2014/2015 гг.) по данным метеостанции на о. Котельный. Это даёт определённые основания считать, что наш торос уже существовал к наступлению осени 2013 г. и соответственно возраст его больше двух лет.

Необходимо, однако, понимать условность этих расчётов. Во-первых, исследуемый старый торос мог быть принесён в район исследования из региона с более суровым температурным режимом; во-вторых, эмпирическая формула (2) выражает связь суммы градусо-дней мороза и средней толщины консолидированного слоя однолетних торосов. Связь толщины консолидированного слоя старых торосов с температурными условиями более сложная. Особенно неоднозначен вклад летних процессов в изменение толщины консолидированного слоя старого тороса. В работе [10] описывается механизм летней кон-

солидации старого тороса за счёт дренажа талой воды с поверхности и последующего замерзания её в толще тороса, т.е. по мнению автора, консолидированный слой увеличивается в летний относительно тёплый период. К.В. Хойланд [26] также показывает, что летом талая вода, стекая с поверхности и замещая рассол в толще льда, способствует образованию нового льда; и пока присутствует талая вода, а киль тороса сохраняет достаточный для её замерзания запас холода, происходит рост консолидированного слоя. В этой работе [25] описывается модель консолидации однолетних торосов, которую автор предлагает использовать и для старых торосов. Модель основана на законе Стефана и представляет собой простую аналитическую зависимость, связывающую толщину консолидированного слоя с толщиной окружающего ровного льда с учётом пористости ледяного образования:

$$h_c^2(t) = h_{c,0}^2 + (h_i^2(t) - h_{i,0}^2)/\eta, \quad (3)$$

где $h_c(t)$ и $h_i(t)$ – толщины консолидированного слоя и ровного льда на конец расчётного периода соответственно; $h_{c,0}$ и $h_{i,0}$ – толщины консолидированного слоя и ровного льда в начальный момент (на предыдущем расчётном шаге) соответственно; η – пористость неконсолидированной части тороса.

К.В. Хойланд принимал, что ровный лёд полностью стает за лето, поэтому $h_{i,0}$ всегда равно нулю. Используя данные, полученные в экспедиционных исследованиях торосов и ровного льда в этом районе в 2014 и 2015 гг., мы попытались оценить динамику толщины консолидированного слоя для нашего старого тороса по предлагаемой модели. Для расчётов использовали: среднюю за два года толщину однолетнего ровного льда в районе (1,1 м) и среднюю за два года пористость неконсолидированной части килля тороса (29%). Толщина консолидированного слоя тороса после первого года была определена как среднее значение в однолетних торосах данного района за два года (2,3 м). По расчётам формулы (3) получилось следующее: толщина консолидированного слоя после второго года – 3,1 м, после третьего – 3,7 м. Только на шестой год при таких начальных условиях расчётная величина толщины достигает 5,1 м – наиболее близкого значения средней толщине консолидированного слоя (5,2 м) по измерениям на «старом» фрагменте (точки № 1–19) нашего тороса. При рас-

смотрении результатов данной модели следует учитывать ряд сделанных серьёзных допущений: средняя толщина и возраст окружающего торос ровного льда остаются постоянными в течение всех расчётных лет, а средняя пористость неконсолидированной части тороса не меняется даже при ежегодном росте консолидированного слоя.

Таким образом, одна часть рассмотренных здесь признаков нашего тороса (возраст окружающего льда, относительно высокая пористость киля тороса и неполная его консолидация) больше соответствует двухлетнему торосу, а другая часть признаков (отсутствие блоков и почти полная сглаженность паруса, относительно высокое значение толщины консолидированного слоя) более характерна для многолетнего тороса. Придерживаясь гипотезы о том, что наш торос — сложное ледяное образование, состоящее из старого и однолетнего фрагментов, мы предполагаем, что по возрасту старой фракции наш торос относится к многолетнему (вероятно, 3–4-летнему).

Заключение

Принимая во внимание планы ввода в 2021–2022 гг. ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс», подготавливаемой по заказу Росгидромета в рамках реализации Государственной программы по социально-экономическому развитию Арктической зоны для круглогодичных работ в высоких широтах Северного Ледовитого океана, разработка и апробация методов изучения старых ледяных образований — важная насущная задача. Как показал опыт работ, рассмотренных в настоящей статье, для полноценного исследования крупного ледяного образования целесообразно применять комплексный подход, предусматривающий водяное термобурение для определения параметров внутренней структуры, тахеометрическую и гидролокационную съёмку для определения внешних параметров и корректной оценки объёма тороса, видеосъёмку с помощью телеуправляемого подводного аппарата для обследования киля тороса, а также методы определения физических (температура, солёность, плотность) и прочностных свойств льда.

Комплексное исследование старого тороса в Восточно-Сибирском море в мае 2015 г. позволило сравнить основные морфометрические ха-

рактеристики старого тороса и средние значения однолетних торосов, исследованных в том же районе в тот же период времени. Установлено, что старый торос имел существенно превосходящие геометрические параметры. Объём и масса старого тороса больше, чем у среднего однолетнего тороса, соответственно в 5,6 и 5,8 раза. Столь значительное преимущество старого тороса обусловлено скорее не возрастом (однолетние торосы могут быть крупнее старых), а составным типом ледяного образования. Средняя для всего ледяного образования толщина консолидированного слоя почти в 2 раза больше средней толщины консолидированного слоя у однолетних, а среднее значение консолидированного слоя в старой части тороса больше, чем у однолетних, в 2,2 раза. Старый торос характеризуется также почти полной сглаженностью (без возможности выделить отдельные блоки) и минимальной пористостью паруса. Солёность и плотность льда, слагающего парус старого тороса, были значительно ниже, чем у однолетних торосов. Отношение киль/парус в среднем больше у однолетних торосов: 3,46 против 3,07 у старого тороса.

Распределения параметров внутренней структуры (толщины консолидированного слоя и пористости) по профилю бурения позволяют предположить, что исследованное ледяное образование — составной торос, испытавший вторичное торошение и состоящий из более крупного старого фрагмента и относительно небольшого однолетнего. По результатам анализа возрастных признаков наиболее вероятна идентификация рассматриваемого тороса как многолетнего, возрастом 3–4 года.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.И. Шушлебину (ААНИИ) за ценную научную консультацию. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60109. Исследование проведено в рамках инновационной деятельности ПАО «НК «Роснефть».

Acknowledgments. The authors are grateful to A.I. Shushlebin (AARI) for valuable scientific advice. This study is supported by the RFBR grant № 18-05-60109. The investigations were performed as part of the innovative activity of Public joint-stock «Rosneft Oil Company».

Литература

References

1. Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В. Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта. Патент на изобретение № 2153070 от 20.07.2000. Бюл. № 20. <http://www.findpatent.ru/patent/215/2153070.html>.
2. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Морфометрические параметры торосов и стамух по данным экспедиционных исследований в северо-западной части Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 68–76.
3. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Статистическая модель морфометрии гряды тороса в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 3 (89). С. 49–61.
4. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Статистическая модель морфометрии гряды тороса на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Лёд и Снег. 2012. № 3 (119). С. 67–72.
5. Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Миронов Е.У., Гузенко Р.Б., Харитонов В.В. Особенности развития консолидированного слоя гряд торосов в морях Карском и Лаптевых // Нефтяное хозяйство. 2016. № 11. С. 49–54.
6. Johnston M., Masterson D., Wright B. Multi-year ice thickness: knowns and unknowns // Proceedings of the 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9–12, 2009, Luleå, Sweden. Paper POAC 09-120.
7. Sudom D., Timco G. Knowledge gaps in sea ice ridge properties // Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2013, Espoo, Finland. Paper POAC 13-070.
8. Kovacs A., Weeks W., Ackley S., Hibler W. Structure of a multi-year pressure ridge // Arctic. 1973. № 26 (1). P. 22–31.
9. Гаврило В.П., Грищенко В.Д., Лоцилов В.С. К вопросу о натурных исследованиях морфологии торосов на арктических льдах и возможности моделирования процессов торошения // Тр. ААНИИ. 1974. Т. 316. С. 70–76.
10. Kovacs A. Characteristics of Multi-year pressure ridges // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition. 1983. V. 3. P. 173–182.
11. Poplin J.P., Ralston T.D., St. Lawrence W. A thermal ice drill for profiling thick multiyear ice // Cold Regions Science and Technology. 1987. № 14. P. 1–11.
12. Грищенко В.Д. Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Тр. ААНИИ. 1988. Т. 401. С. 46–54.
13. Timco G.W., Burden R.P. An analysis of the shape of sea ice ridges // Cold Regions Science and Technology. 1997. № 25. P. 65–77.
14. Høyland K.V., Barrault S., Gerland S., Goodwin H., Nicolaus M., Olsen O.M., Rinne E. The consolidation in second- and multi-year sea ice ridges, Part 1: Measurements in early winter. 19th IAHR Intern. Symposium on Ice. Vancouver, Canada, 2008: 1439–1449.
1. Morev V.A., Morev A.V., Kharitonov V.V. Method of determination of structure of ice ridges and stamukhas, ice properties and ice and soil boundaries. Patent for invention № 2153070, 20.07.2000. № 20. [In Russian]. <http://www.findpatent.ru/patent/215/2153070.html>.
2. Mironov Ye.U., Porubaev V.S. Morphometric parameters of ice ridges and stamukhas from data of expedition studies in the northwestern Caspian Sea. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2011, 5: 68–76. [In Russian].
3. Mironov Ye.U., Porubaev V.S. Statistical model of ice ridge morphometry in the southwestern Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2011, 3 (89): 49–61. [In Russian].
4. Mironov Ye.U., Porubaev V.S. Statistical model of ice ridge morphometry offshore the northeast coast of Sakhalin Island. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 3 (119): 67–72. [In Russian].
5. Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O., Mironov Ye.U., Guzenko R.B., Kharitonov V.V. Peculiarities of the consolidated layer development of ice ridges in the Kara and Laptev Seas. *Neftianoe khoziaistvo*. Oil Industry. 2016, 11: 49–54. [In Russian].
6. Johnston M., Masterson D., Wright B. Multi-year ice thickness: knowns and unknowns. Proceedings of the 20th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9–12, 2009, Luleå, Sweden. Paper POAC 09-120.
7. Sudom D., Timco G. Knowledge gaps in sea ice ridge properties. Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2013, Espoo, Finland. Paper POAC 13-070.
8. Kovacs A., Weeks W., Ackley S., Hibler W. Structure of a multi-year pressure ridge. *Arctic*. 1973, 26 (1): 22–31.
9. Gavrilov V.P., Grishchenko V.D., Loshchilov V.S. On the issue of field studies of the morphology of hummocks on the Arctic ice and the possibility of modeling hummocking processes. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1974, 316: 70–76. [In Russian].
10. Kovacs A. Characteristics of Multi-year pressure ridges. Proc. of the 7th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition. 1983, 3: 173–182.
11. Poplin J.P., Ralston T.D., St. Lawrence W. A thermal ice drill for profiling thick multiyear ice. *Cold Regions Science and Technology*. 1987, 14: 1–11.
12. Grishchenko V.D. Morphometric characteristics of ice ridges on ice of the Arctic Basin. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1988, 401: 46–54. [In Russian].
13. Timco G.W., Burden R.P. An analysis of the shape of sea ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*. 1997, 25: 65–77.
14. Høyland K.V., Barrault S., Gerland S., Goodwin H., Nicolaus M., Olsen O.M., Rinne E. The consolidation in second- and multi-year sea ice ridges, Part 1: Measurements in early winter. 19th IAHR Intern. Symposium on Ice. Vancouver, Canada, 2008: 1439–1449.

- ments in early winter // 19th IAHR Intern. Symposium on Ice. Vancouver, Canada, 2008. P. 1439–1449.
15. *Kharitonov V.V., Morev V.A.* Morphometric characteristics of multi-year ice ridges in Russian sector of Arctic // Proc. of the 20th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9–12, 2009, Luleå, Sweden. Paper POAC 09-121.
16. *Strub-Klein L., Barrault S., Goodwin H., Gerland S.* Physical properties and comparison of first- and second-year sea ice ridges // Proc. of the 20th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9–12, 2009, Luleå, Sweden. Paper POAC 09-117.
17. *Sudom D., Timco G., Sand B., Fransson L.* Analysis of first-year and old ice ridge characteristics // Proc. of the 21st Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2011, Montreal, Canada. Paper POAC 11-164.
18. *Kharitonov V.V.* Evolution of internal structure of ice ridge investigated at «North Pole–38» and «North Pole–39» drifting stations // Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9–13, 2013, Espoo, Finland. Paper POAC 13-048.
19. *Johnston M.* Seasonal changes in the properties of first-year, second-year and multi-year ice // Cold Regions Science and Technology. 2017. № 141. P. 36–53.
20. *Mironov Ye.U., Morev V.A., Porubaev V.S., Kharitonov V.V.* Study of Geometry and Internal Structure of Ice Ridges and Stamukhas using Thermal Water Drilling // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 16–19, Trondheim, Norway, 2003. P. 623–634.
21. *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Бородин В.А., Нюбом А.А., Шушлебин А.И.* Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явления сжатия и торошения в морских льдах. СПб.: ААНИИ, 2017. 174 с.
22. *Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалёв С.М., Якевич А.А., Щепанюк С.Н., Ефимов Я.А., Корнишин К.А.* Комплексная система определения характеристик прочности льда в натуральных условиях и на образцах. Патент на изобретение № 2682835. Приоритет изобретения 19 марта 2018 г. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 21 марта 2019 г. <http://www.findpatent.ru/patent/268/2682835.html>.
23. *Richter-Menge J., Cox G.* Structure, salinity and density of multi-year sea ice pressure ridge // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Texas, USA, 1985. P. 194–198.
24. *Cox G. and Richter-Menge J.* Confined compressive strength of multi-year pressure ridge sea ice samples. Proc. of the 5th Intern. Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), 1986. V. IV. P. 365–373.
25. *Høyland K.V.* The consolidation in second- and multi-year sea ice ridges, Part II: Review and speculations // 19th IAHR Intern. Symposium on Ice, Vancouver, Canada, 2008. P. 1451–1457.
15. *Kharitonov V.V., Morev V.A.* Morphometric characteristics of multi-year ice ridges in Russian sector of Arctic. Proc. of the 20th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9–12, 2009, Luleå, Sweden. Paper POAC 09-121.
16. *Strub-Klein L., Barrault S., Goodwin H., Gerland S.* Physical properties and comparison of first- and second-year sea ice ridges. Proc. of the 20th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9–12, 2009, Luleå, Sweden. Paper POAC 09-117.
17. *Sudom D., Timco G., Sand B., Fransson L.* Analysis of first-year and old ice ridge characteristics. Proc. of the 21st Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2011, Montreal, Canada. Paper POAC 11-164.
18. *Kharitonov V.V.* Evolution of internal structure of ice ridge investigated at «North Pole–38» and «North Pole–39» drifting stations. Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9–13, 2013, Espoo, Finland. Paper POAC 13-048.
19. *Johnston M.* Seasonal changes in the properties of first-year, second-year and multi-year ice. Cold Regions Science and Technology. 2017, 141: 36–53.
20. *Mironov Ye.U., Morev V.A., Porubaev V.S., Kharitonov V.V.* Study of Geometry and Internal Structure of Ice Ridges and Stamukhas using Thermal Water Drilling. Proc. of the 17th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 16–19, Trondheim, Norway, 2003: 623–634.
21. *Smirnov V.N., Kovalev S.M., Borodkin V.A., Niu-bom A.A., Shushlebin A.I.* Instrumental'nyi monitoring i kratkosrochnyi prognoz yavleniy szhatiya i torosheniya v morskikh l'dakh. Instrumental monitoring and short-term forecast of compression and hummocking processes in sea ice. St. Petersburg: AARI, 2017: 174 p. [In Russian].
22. *Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Kovalev S.M., Iat-skevich A.A., Shchepaniuk S.N., Efimov Ya.A., Kornishin K.A.* Comprehensive system for determining the strength characteristics of ice in natural conditions and on samples. Patent for invention № 2682835, 2019. [In Russian]. <http://www.findpatent.ru/patent/268/2682835.html>.
23. *Richter-Menge J., Cox G.* Structure, salinity and density of multi-year sea ice pressure ridge. Proc. of the 4th Intern. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Texas, USA, 1985: 194–198.
24. *Cox G. and Richter-Menge J.* Confined compressive strength of multi-year pressure ridge sea ice samples. Proc. of the 5th Intern. Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE). 1986, IV: 365–373.
25. *Høyland K.V.* The consolidation in second- and multi-year sea ice ridges, Part II: Review and speculations. 19th IAHR Intern. Symposium on Ice, Vancouver, Canada, 2008: 1451–1457.