

ТОРОСЫ ПРОЛИВА ШОКАЛЬСКОГО (АРХИПЕЛАГ СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ)

В.В. Харитонов

*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия; sogra.kharitonov@mail.ru*

В апреле–мае 2016 г. в проливе Шокальского (Северная Земля) были исследованы морфологические характеристики трех однолетних торосов с помощью водяного термобурения с записью скорости. Скважины бурились вдоль поперечного сечения гряды с интервалом 0.25 м. Представлены профили поперечного сечения торосов. Высота паруса изученных торосов колебалась в пределах 2.5–3.4 м, осадка киля – от 8.3 до 10.3 м. Отношение осадки киля к высоте паруса составило 2.8–3.3, а толщина консолидированного слоя 2.2–2.4 м. Пористость неконсолидированной части киля в двух торосах 25–30 %, в третьем – около 19 %. Приведено распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине для исследованных торосов. Главной особенностью одного из них был экстремально крутой угол склона киля – около 87°.

Торос, термобурение, профиль поперечного сечения, консолидированный слой, киль

ICE RIDGES IN THE SHOKALSKY STRAIT, THE SEVERNAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO

V.V. Kharitonov

*Arctic and Antarctic Research Institute,
38, Beringa str., St. Petersburg, 199397, Russia; sogra.kharitonov@mail.ru*

The paper discusses the main characteristics of the three first-year ice ridges examined with respect to geometry and morphology in the Shokalsky Strait (Severnaya Zemlya Archipelago) in April and May 2016. These studies were conducted using hot water thermal drilling with computer-recording of penetration rate. The boreholes drilled along the cross-section of the ridge crest were spaced at 0.25 m. Cross-sectional profiles of the ice ridges are presented. The measured dimensions of the studied ice ridges were sail height varied from 2.5 up to 3.4 m, the keel depth varied from 8.3 up to 10.3 m. The average keel depth to sail height ratio varied from 2.8 to 3.3, and the thickness of the consolidated layer was 2.2–2.4 m. The porosity of the unconsolidated part of the keel was about 25–30 % in the two ridges and about 19 % in the third one. The distributions of volumetric content of solid phase in sea ice versus depth are analysed for all the studied ice ridges. One of these ice ridges was characterized by an extremely steep keel slope angle (about 87°).

Ice ridge, thermal drilling, cross-sectional profile, consolidated layer, keel

ВВЕДЕНИЕ

Исследования морфометрических характеристик торосистых образований как наиболее мощных участков ледяного покрова, в отличие от аналогичных исследований морфометрии недеформированного льда, не обладают богатой историей, а количество имеющихся на сегодняшний день данных наблюдений нельзя назвать достаточным. Л. Струб-Клейн и Д. Судом [Strub-Klein, Sudom, 2012] опубликовали обзор многолетних исследований торосов в арктических морях, суммируя сведения, накопленные зарубежными и отечественными учеными, начиная с 1971 г. Существующие пробелы в этих знаниях обобщили Д. Судом и Г. Тимко [Sudom, Timco, 2013]. На шельфе замерзающих морей России торосы также активно изучаются, так как их морфометрические

характеристики, в первую очередь толщину консолидированного слоя (КС) * тороса, необходимо учитывать на стадии проектирования при оценке возможных нагрузок на сооружения. Информация об этих характеристиках в последнее время пополняется (см., например, [Павлов и др., 2016]). Однако очень мало исследований выполнено по морфометрии деформированного и торосистого льда в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, а для пролива Шокальского, в частности, такой информации просто нет. И это действительно проблема, так как в условиях меняющегося климата, уменьшения площади льдов в Северном Ледовитом океане, уменьшения их толщины любая информация о внутреннем строении современных торосов представляет несомненную ценность. На

* Консолидированный слой торосистого образования – это слой плотного (твердого) льда с верхней границей в районе ватерлинии, образовавшийся в результате действия холода и замерзания воды в промежутках между блоками восторженного льда и включающий в себя эти блоки, с прочностью, близкой к прочности ровного льда.

решение данной проблемы направлено настоящее исследование. Цель работы – восполнить отсутствие информации о торосистых образованиях рассматриваемого района. Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи:

- найти подходящие для исследования объекты;
- изучить морфометрические характеристики и внутреннее строение торосистых образований;
- получить информацию о распределении толщины КС.

Из недавних работ, посвященных подобной тематике, можно отметить [Strub-Klein et al., 2009; Strub-Klein, Høyland, 2011; Sand et al., 2013], где рассмотрены результаты исследования морфометрии торосов в Баренцевом море и проливе Фрама. Выполнено также сравнение морфометрических характеристик однолетних и двухлетних торосов. Отмечено, что киль двухлетних торосов почти полностью консолидирован, а морфометрические характеристики исследованных торосов в основном являются типичными для торосов Баренцева моря. Большое внимание уделено влиянию океанических течений на эрозию кила. Маленькие торосы в припае сильнее подвергаются эрозии кила, чем крупные торосы. Замечено также, что в мае происходит уменьшение толщины блоков льда в парусе под действием солнечной радиации. В работе [Sand et al., 2015] сделан акцент на пополнении информации о параметрах торосов, которой явно недостаточно согласно [Sudom, Timco, 2013]. Среди таких параметров: ширина кила, углы ската паруса и кила, площадь, занимаемая килем на поперечном сечении гряды тороса, толщина КС. Отмечена перманентная недостаточность ресурсов для проведения комплексных ледовых исследований. Торосы российского сектора Баренцева моря рассмотрены А.К. Наумовым [2010], который делает вывод, что геометрические характеристики парусов и килей торосов восточной части Баренцева моря не сильно отличаются от величин, полученных для Берингова, Балтийского морей и моря Лабрадор, но значительно отличаются от значений для арктического бассейна и моря Бофорта.

Морфометрические характеристики торосов Каспийского моря представлены в работе [Мионов, Порубаев, 2011], Карского моря – в [Мионов, Порубаев, 2012]. Максимальные значения осадки кила торосов Каспийского моря достигают 7 м. Средняя высота парусов гряд торосов Карского моря составляет 3.2 м при средней глубине килей 11.5 м. Максимальные значения этих параметров составляют 4.5 и 15.7 м соответственно. В работе [Shestov, Marchenko, 2014] приведены результаты исследования кила торосов и течений в непосредственной близости от кила и внутри его. Обнаружено, что внутри неконсолидированной части

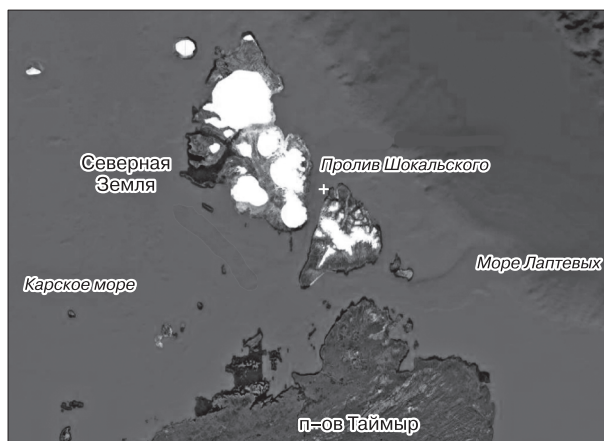


Рис. 1. Карта района работ.

Знак “+” – местоположение полигона.

киля присутствуют течения морской воды, заполняющей полости, причем скорость таких течений в 3 раза выше, чем скорость течения под ровным льдом, окружающим торос. М. Суоминен с коллегами измеряли морфометрические характеристики торосов с помощью бурения и сравнивали их с данными сонаров [Suominen et al., 2017]. В этом эксперименте выбирались совсем небольшие торосы, чтобы судно могло пройти по ним с первой попытки. Поэтому максимальная осадка кила таких торосов составила всего 5 м.

В настоящей статье представлена информация о морфометрических характеристиках и внутреннем строении трех торосов, изученных с помощью водяного бурения весной 2016 г. в припае пролива Шокальского архипелага Северная Земля (рис. 1). Рабочая группа базировалась на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова”, принадлежащем ФГБУ Арктический и Антарктический НИИ (ААНИИ).

Большая часть прилегающего к стационару припая представляла собой востороженный лед с высотой парусов, не превышающей 1–1.5 м. На удалении 5 км от базы удалось обнаружить три тороса с высотой паруса более 2 м, которые и были выбраны для исследования. Был разбит полигон, включающий все три торосистых образования, а также ровный и наслоненный лед. Толщина ровного льда варьировала от 1 до 2 м. Торосы располагались примерно на одной линии на расстоянии 570 и 700 м друг от друга.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРОСОВ

Исследование строения торосов производилось с помощью установки для водяного бурения льда УВБЛ-2 производства ААНИИ, включающей водоподогреватель, водяной термобур и логгер для записи скорости бурения. Эта технология



Рис. 2. Общий вид установки для водяного бурения льда УВБЛ-2.

Показана работа двух буровых постов; в 2016 г. бурение торосов производилось одним постом.

является уникальной, так как зарубежные исследователи применяют шнековое бурение с ручной записью участков льда различной пористости и встречающихся пустот. Питание установки осуществлялось от бензогенератора мощностью 4 кВт. Общий вид установки приведен на рис. 2. Морская вода через смесительную трубу и всасывающий шланг электронасосами прокачивается через водоподогреватель, где нагревается котлом, работающим на дизельном топливе. Некоторое количество горячей воды сливается в смесительную трубу для подогрева всасываемой в водоподогреватель воды. Нагретая до температуры 80–90 °С вода по подводящим шлангам, намотанным на вышки, поступает в измерительные боксы. В процессе работы, по мере удаления буровых постов, подводящие шланги разматываются по повер-

ности льда. В измерительных боксах размещены преобразователь перемещения бура (датчик угловых перемещений ЛИР), датчик температуры воды и логгер. Далее горячая вода по буровым шлангам поступает в термобуры. В процессе бурения буровой шланг вращает измерительное колесо преобразователя. Расчет скорости осуществляется по градуировочным коэффициентам, определенным заранее в лабораторных условиях. Бурение производилось вдоль профилей, проложенных поперек гребня торосов. Пример записи скорости бурения тороса представлен на рис. 3. Средняя скорость водяного бурения плотного льда составляет 0.02–0.04 м/с.

Морфометрические характеристики торосов и их внутреннее строение определяются в результате обработки записей термобурения [Способ...

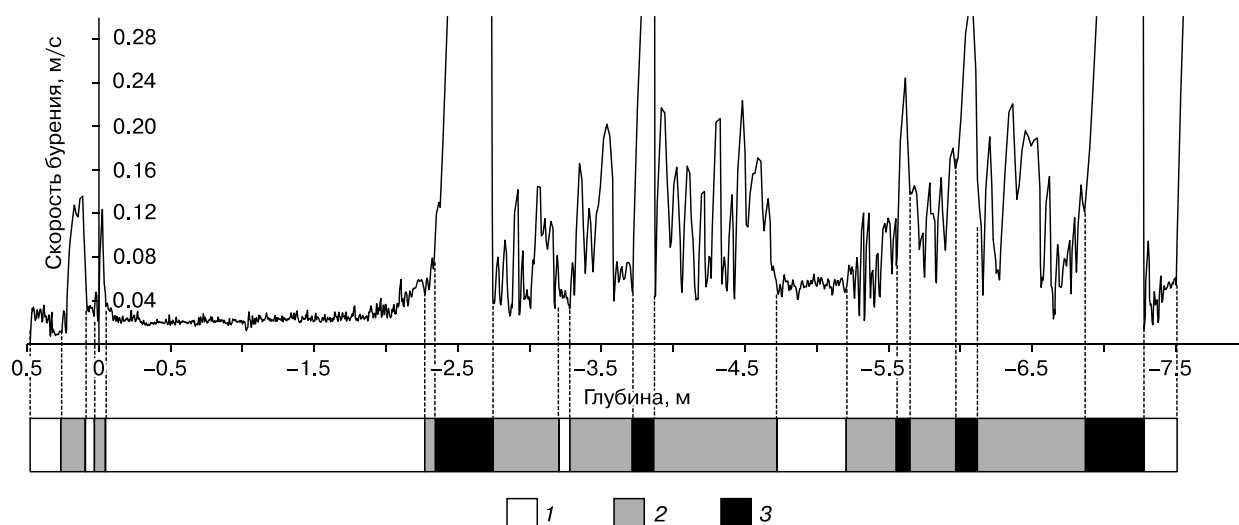


Рис. 3. Пример записи скорости бурения тороса и определенное по ней расположение участков льда различной пористости вдоль скважины.

1 – плотный лед; 2 – рыхлый лед; 3 – пустота.

2000]. Скорость бурения зависит от подаваемой на термобур тепловой мощности, пористости льда и в небольшой степени от его температуры. Расположение пустот, плотного и рыхлого льда на отрезках скважины определяется по скорости погружения бура. Необходимым условием валидности этого определения является бурение скважин при постоянной тепловой мощности или учет изменения мощности во время бурения. На участках рыхлого льда, особенно в пустотах, заполненных снегом, шугой, водой или воздухом, движение термобура резко ускоряется. Дополнительно измеряется расстояние от поверхности снега (льда) до уровня моря. При обработке данных термобурения определяются величины надводной и подводной частей ледяного покрова, границы КС торосов, границы пустот, участки льда различной пористости.

На торосе 1 было проложено 8 секущих линий поперек его гребня, вдоль которых через 0.25 м бурились скважины. На краях линий, где консолидация тороса достигла 100 %, бурение производилось через 0.5–1 м. В центральной части тороса расстояние между линиями составляло 2 м. На торосах 2 и 3 было проложено по одному секущему профилю. В каждой точке измерялись толщина снежного покрова и превышение поверхности льда над уровнем моря. Выполнено также визуальное исследование нижней поверхности торосов с помощью телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) “Гном” и гидролокатора.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

За период с 11 апреля по 28 мая 2016 г. были подробно исследованы три тороса. Их основные морфометрические характеристики приведены в табл. 1. На рис. 4 представлены профили исследованных торосов. Средняя толщина блоков паруса торосов 1 и 2 составляла около 0.28 м, тороса 3 – 0.36 м. В месте бурения парус тороса 3 был занесен большим слоем снега, толщина которого в некоторых местах превышала 2 м.

Все торосы имеют свои отличительные особенности. Первый торос характеризуется экстремально большим углом ската килля, который в среднем составляет 87°. На одном из секущих профилей этот угол принимает даже отрицательное значение (см. рис. 4, а). Было сделано предположение, что при формировании тороса блоки льда складывались аккуратной стопкой и притапливались, образуя практически вертикальную стенку. Однако осмотр левого ската килля тороса 1 показал наличие хаотически сложенных блоков. Такой феномен может образоваться в процессе вторичного торосообразования, когда, например, частично консолидированный киль тороса под действием навала льда на его край притапливается и поворачивается, тогда склон килля может оказаться вертикальным. Рисунок 5 иллюстрирует одну из возможных схем вторичного торосения, когда первичный торос (рис. 5, а) подвергается сжатию и на его краю начинается нагромождение блоков тороса

Таблица 1. Морфометрические характеристики торосов

Характеристика	Торос 1	Торос 2	Торос 3
Количество секущих профилей на торосе	8	1	1
Количество пробуренных скважин	885	123	105
Сред./макс. толщина льда, м	5.06/13.26	5.34/10.44	4.39/9.58
Сред./макс. высота паруса, м	1.59/3.44	1.57/2.54	1.09/2.97
Сред./макс. глубина килля, м	4.84/10.27	4.97/8.33	4.36/8.32
Сред. значение верхней границы КС*, м	0.06	-0.08	-0.01
Сред. значение нижней границы КС, м	-2.34	-2.26	-2.26
Сред. толщина КС, м	2.40	2.16	2.25
Мин./сред./макс. толщина ровного льда вблизи тороса, м	0.93/1.40/1.61	1.36/1.69/1.93	1.50/1.65/1.87
Углы ската паруса, град	24.2–77.5	25.4–38.1	20.3–46.8
Углы ската килля, град	11.2–87.5	24.0–64.3	22.8–40.9
Средняя пористость тороса**	0.13	0.11	0.15
Средняя пористость паруса тороса	0.24	0.13	0.22
Средняя пористость килля тороса	0.14	0.11	0.15
Средняя пористость неконсолидированной части тороса	0.28	0.25	0.30
Макс. киль/макс. парус	3.0	3.3	2.8
Сред. толщина КС/сред. толщина тороса	0.47	0.49	0.51
Сред. толщина КС/сред. толщина ровного льда	1.71	1.28	1.36
Мин./сред./макс. толщина снежного покрова, м	0/0.19/1.97	0.05/0.38/1.11	0/0.81/2.15

* Консолидированный слой.

** Линейная пористость – отношение суммарной длины пустот в скважине к общей длине скважины.

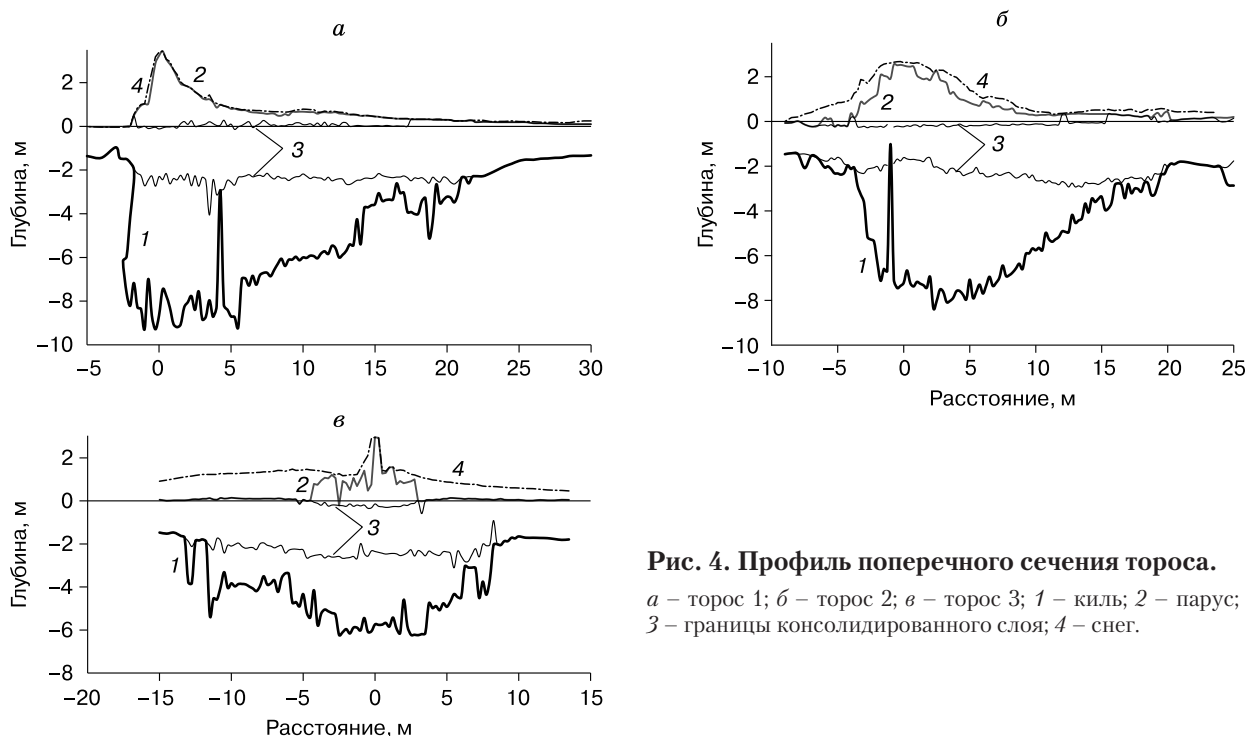


Рис. 4. Профиль поперечного сечения тороса.

а – торос 1; *б* – торос 2; *в* – торос 3; 1 – киль; 2 – парус; 3 – границы консолидированного слоя; 4 – снег.

сящегося льда, тем самым притапливая первичный торос и поворачивая его вокруг центра (см. рис. 5, б). При достаточно большом угле поворота первичного тороса блоки льда, составляющие нижнюю часть его кия, во вторичном торосе могут образовывать вертикальную стену на краю кия вторичного тороса. Несомненно, данный случай требует внимательного и всестороннего рассмотрения, однако можно с уверенностью констатировать обнаружение редкого случая такого формирования кия тороса. Единственный такой же пример был отмечен П. Канканпаой [*Kan-kanpää, 1989*], но в этом случае профиль бурения был выполнен вдоль гряды. В табл. 2 даны максимальные значения угла ската кия, приведенные в различных литературных источниках.

В последнее время большое внимание исследователями уделяется малоизученной, но доволь-

но интересной проблеме распределения толщины КС внутри торосистого образования. Информацию для решения этой проблемы предоставляет, в частности, настоящая статья. Средняя толщина КС тороса 1 составила 2,4 м, максимальная – 4,3 м, минимальная – 1,1 м. Консолидированный слой хорошо развит, неоднороден по толщине. В отличие от первого, на торосе 2 толщина КС варьирует в пределах 1,3–3,1 м, КС имеет плоскую форму без резких изменений толщины, а под парусом толщина несколько меньше, что может быть связано с экранированием парусом и препятствием проникновения холода к килю тороса. У тороса 3 КС несколько меньше по толщине (1,0–3,2 м), чем у торосов 1 и 2, за счет более молодого возраста тороса 3 и имеет выраженный прогиб под парусом. В табл. 2 для сравнения приведены данные о КС из литературы.

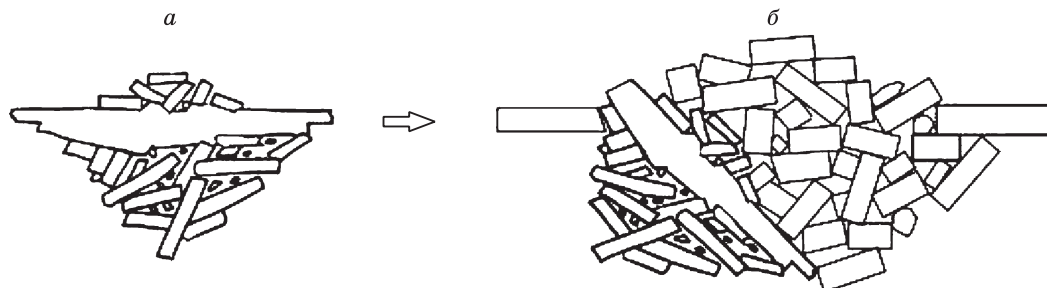


Рис. 5. Одна из возможных схем образования вторичного тороса.

а – первичный торос; *б* – результат вторичного торосообразования. Левый склон кия вторичного тороса образует вертикальную стенку.

Толщина КС не коррелирует с пористостью неконсолидированной части киля, однако обнаруживается небольшая значимая обратная корреляция с превышением снежного покрова и льда над уровнем моря (коэффициент корреляции -0.35). Таким образом, можно констатировать, что КС исследованных торосов определялся не только плотностью упаковки битого льда в киле, а в большей степени доступом холода к неконсолидированному килю. В большинстве случаев в той части киля, которая закрыта парусом или толстым снежным покровом, толщина КС несколько меньше.

На торосе 1 в правой части киля толщина КС плавно уменьшается и КС переходит в ровный лед. Характер этого уменьшения хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$A + B \exp\left(1 + \frac{x}{x_0}\right)^3.$$

Согласно закону сохранения энергии, связь скорости термобурения с подаваемой мощностью можно выразить калориметрической формулой

$$v = KP / \left[\Lambda (\rho(1-a-s)(-c_i t_i + L) - \rho_w s c_w t_i + (\rho(1-a-s) + \rho_w s) c_w t_w) \right], \quad (1)$$

где v – скорость погружения термобура, м/с; P – подаваемая на термобур тепловая мощность, Вт; K – коэффициент, учитывающий рассеяние тепла через боковую поверхность коронки термобура (КПД коронки); Λ – площадь миделева сечения коронки термобура, м²; ρ – плотность монокристалла льда, кг/м³; a – объемное содержание воздуха во льду; s – объемное содержание рассола во льду; c_i – теплоемкость чистого льда, Дж/(кг·°C); t_i – температура льда, °C; L – удельная теплота плавления льда, Дж/кг; ρ_w – плотность расплава, кг/м³; c_w – теплоемкость расплава, Дж/(кг·°C); t_w – температура расплава, °C. Определим объемное содержание твердой фазы льда VCI (volume content of ice) как

$$VCI = 1 - a - s. \quad (2)$$

Величина VCI равна единице минус пористость и аналогична коэффициенту заполнения, но несколько меньше, так как учитывает наличие микропор в блоках льда.

Тогда из (1) и (2) скорость бурения v обратно пропорциональна объемному содержанию твердой фазы льда:

$$VCI \approx \frac{K(VCI)P}{\Lambda \rho L} \cdot \frac{1}{v}. \quad (3)$$

Выражение $K(VCI)$ означает, что, строго говоря, коэффициент K может зависеть от объемного содержания твердой фазы льда VCI . Характер этой зависимости неизвестен и трудноопределим. Однако за счет высокой скорости бурения водяного

Таблица 2. Некоторые морфометрические характеристики торосов из литературных источников

α_{\max} , град	$h_{\text{КС}}$, м	$h_{\text{КС}}/h_i$	Источник
32	–	–	[Weeks et al., 1971]
52*	–	–	[Грищенко, 1988]
64	–	–	[Kankaanpää, 1989]
80–90	–	–	[Timco, Burden, 1997]
29	1.9	1.3–1.6	[Bonnetmaire et al., 2003]
–	1.5–2.2	–	[Mironov, Porubaev, 2005]
78	1.8–5.4	1.1–3.5	[Kharitonov, 2012]
58	0.4–3.0	1.3–1.6	[Kharitonov, 2013]
35	1.5–1.9	1.9–2.0	[Sand et al., 2013]
29	1.2–1.8	1.9–2.5	[Sand et al., 2015]

Примечание. α_{\max} – максимальный угол ската киля; $h_{\text{КС}}$ – средняя толщина консолидированного слоя; $h_{\text{КС}}/h_i$ – отношение средней толщины консолидированного слоя к средней толщине ровного льда.

* Для торосов из тонкого (до 0.3 м) льда.

термобура влияние объемного содержания твердой фазы льда VCI на КПД коронки, т. е. на коэффициент K , будет нивелировано. Таким образом, в первом приближении можно считать, что коэффициент пропорциональности между скоростью бурения v и значением объемного содержания твердой фазы льда VCI в (3) не зависит от величины объемного содержания.

Зависимость величины, обратной скорости, от глубины – это распределение объемного содержания твердой фазы льда вдоль скважины в относительных единицах, поскольку коэффициент пропорциональности имеет размерность скорости. Точные значения VCI неизвестны, так как неизвестен коэффициент пропорциональности между VCI и обратной скоростью. Поэтому для упрощения в качестве значений VCI используются $1/v$ как некие относительные величины. Для каждой скважины это распределение будет индивидуальным. Усреднив эти кривые по всем скважинам, можно получить среднестатистическое распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине для отдельного тороса или для всего района исследований. Усреднение происходит следующим образом.

Последовательно рассматриваются все глубины – от максимальной высоты паруса до минимальной глубины киля. На каждой выбранной глубине усредняются значения $1/v$ во всех скважинах, соответствующие этой глубине. В тех скважинах, где рассматриваемая глубина выходит за пределы паруса или киля, значение $1/v$ принимается равным нулю.

На рис. 6 приведено распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине для исследованных торосов. Консолидированный слой

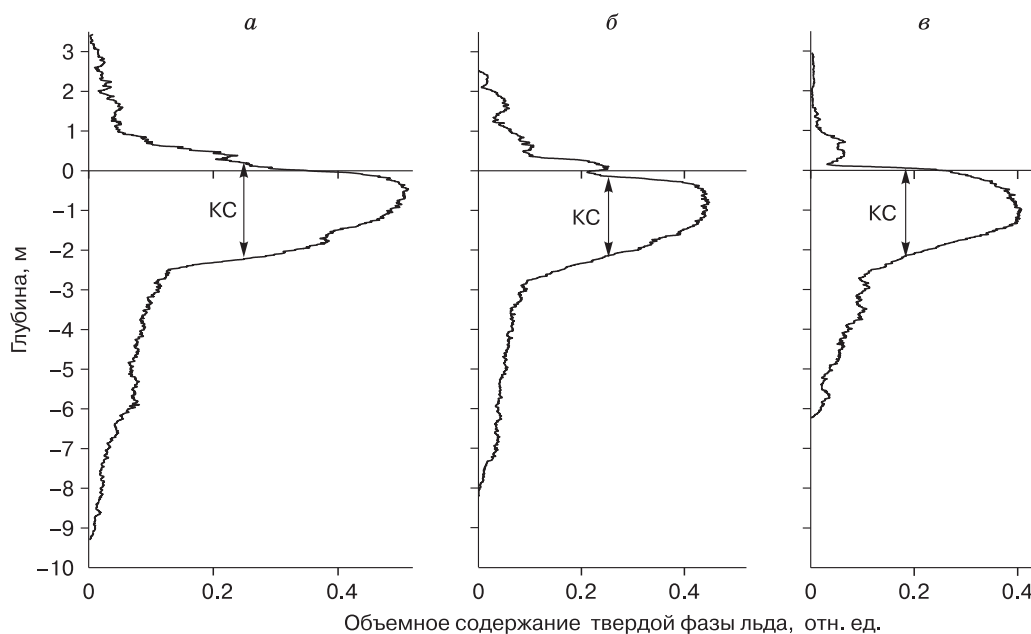


Рис. 6. Распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине для исследованных торосов.

a – торос 1; *б* – торос 2; *в* – торос 3. КС – консолидированный слой.

выделяется резким увеличением объемного содержания твердой фазы льда в районе уровня воды. Чем дальше торос подвергался воздействию холода, тем больше толщина его КС и меньше разброс положения его нижней границы. Это отражается на поведении кривой VCI в диапазоне глубин от -1 до $-2.5...-3$ м. Кривая становится более полой. Торос 1 исследовался 14–16 апреля, торос 2 – 8–11 мая, торос 3 – 24–25 мая. Соответственно, лед торосов становился все более и более прогретым, средняя скорость бурения возрастала, что отразилось на графиках. Так, для тороса 1 соответствующее КС значение $VCI = 0.5$, $v = 2$ см/с, для тороса 2 $VCI = 0.43$, $v \approx 2.3$ см/с, для тороса 3 $VCI = 0.4$, $v = 2.5$ см/с.

На рис. 6, б верхнее плато кривой VCI для тороса 2 в диапазоне глубин $0.3...-0.3$ м фактически разделено на две части. Такой вид графика обусловлен тем, что в результате наслоения льда во время торования и последующей консолидации на дистанции 15.5–19 м (см. рис. 4, б) КС тороса имеет резкое утолщение, которое и дает такой разрыв на распределении верхней границы КС.

На рис. 6, в в диапазоне глубин $0...-0.6$ м кривая VCI достаточно резко пошла вниз. Такое распределение VCI , соответствующее верхней границе КС, обусловлено тем обстоятельством, что торос 3 исследовался 24–25 мая, когда уже началось термическое разрушение верхнего слоя КС под воздействием солнечной радиации.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили получить новые данные о ледяном покрове пролива Шокальского. На основе выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

- отношения максимальный киль/максимальный парус для исследованных торосов равны 3.2, 3.3 и 2.8;

- толщина КС этих торосов варьировала в интервале 1.0–4.3 м, средние значения толщины КС 2.2–2.4 м; толщина КС определялась в меньшей степени плотностью упаковки битого льда в киле и в большей – доступом холода к неконсолидированному килю;

- отношения средняя толщина КС/средняя толщина ровного льда для исследованных торосов равны 1.71, 1.28 и 1.36;

- степень консолидации всех торосов составила примерно 50 %;

- на краях тороса, где торос полностью консолидирован, КС плавно уменьшается и переходит в ровный лед, при этом толщина КС изменяется по экспоненциальному закону;

- зафиксирован экстремально крутой угол ската килля тороса 1 – в среднем около 87° , который на определенных участках гребня достигал отрицательных значений.

Автор выражает благодарность сотрудникам АНИИ Р.А. Савину и Г.А. Дешевых за помощь в термобурении торосов.

Литература

- Грищенко В.Д.** Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Тр. ААНИИ, 1988, т. 401, с. 46–55.
- 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.
- Миронов Е.У., Порубаев В.С.** Формирование гряд торосов в прибрежной части Карского моря и их морфометрические характеристики // Современ. проблемы науки и образования, 2012, № 4. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6707> (дата обращения: 05.07.2018).
- Наумов А.К.** Морфометрические характеристики ледяных образований Баренцева моря: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2010, 12 с.
- Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О. и др.** Особенности развития консолидированного слоя гряд торосов в морях Карском и Лаптевых // Нефть. хоз-во, 2016, № 11, с. 49–54.
- Способ** определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта: пат. RU2153070 C1. Рос. Федерация: МПК E21C 39/00(2000.01), G01N 9/00(2000.01) / Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В.; патентообладатели – авторы. – № 2153070; заявл. 19.11.1998; опубл. 20.07.2000, Бюл. № 20.
- Bonnemaire B., Høyland K.V., Liferov P., Moslet P.O.** An ice ridge in the Barents Sea, part I: morphology and physical parameters in-situ // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (June 16–19, 2003), Trondheim, Norway, 2003.
- Kankaanpää P.** Structure of first-year ridges in the Baltic Sea // Proc. of the 10th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Condition, POAC'89 (June 12–16, 1989, Luleå, Sweden), Luleå, Luleå Univ. of Technol., 1989, vol. 1, p. 87–102.
- Kharitonov V.V.** Internal structure and porosity of ice ridges investigated at “North Pole 38” drifting station // Cold Regions Sci. and Technol., 2012, vol. 82, p. 144–152.
- Kharitonov V.V.** On the results of research of the internal structure of ice ridges in the “North Pole – 2010” expedition at Barneo ice camp in April 2010 // Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC) (June 9–13, 2013), Espoo, Finland, 2013.
- Mironov Ye.U., Porubaev V.S.** Structural peculiarities of ice features of the offshore of the Caspian Sea, the Sea of Okhotsk and the Pechora Sea // Proc. of the 18th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC) (June 26–30, 2005), Potsdam, New York, 2005, vol. 2, p. 483–492.
- Sand B., Petrich C., Sudom D.** Morphologies of ridges surveyed off Svalbard and in Fram Strait, 2011 and 2012 field expeditions // Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC) (June 9–13, 2013), Espoo, Finland, 2013.
- Sand B., Bonath V., Sudom D., Petrich C.** Three years of measurements of first year ridges in the Barents Sea and Fram Strait // Proc. of the 23th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC) (June 14–18, 2015), Trondheim, Norway, 2015.
- Shestov A.S., Marchenko A.V.** Properties of ice ridge keels and sea currents in their vicinity in the Barents Sea // Proc. of the 22th IAHR Intern. Symp. on Ice (August 11–15, 2014), Singapore, 2014.
- 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 Eng. under Arctic Conditions (June 9–12, 2009), Luleå, Sweden, 2009.
- Strub-Klein L., Høyland K.** One season of a 1st year sea ice ridge investigation – Winter 2009 // Proc. of the 21st Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (July 10–14, 2011), Montréal, Canada, 2011.
- Strub-Klein L., Sudom D.** A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges // Cold Regions Sci. and Technol., 2012, vol. 82, p. 94–109.
- Sudom D., Timco G.** Knowledge gaps in sea ice ridge properties // Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC) (June 9–13, 2013), Espoo, Finland, 2013.
- Suominen M., Polojärvi A., Oikkonen A.** Ridge profile measurements for understanding ridge resistance // Proc. of the 24th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (June 11–16, 2017), Busan, Korea, 2017.
- Timco G.W., Burden R.P.** An analysis of the shapes of sea ice ridges // Cold Region Sci. and Technol., 1997, vol. 25, p. 65–77.
- Weeks W.F., Kovaks A., Hibler III W.D.** Pressure ridge characteristics in the Arctic coastal environment // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Condition (POAC'71) (Aug. 23–30, 1971), Trondheim, Norway, 1971, vol. 1, p. 152–183.

References

- Grishchenko V.D. Morphometric characteristics of ice ridges in the Arctic Basin. In: Proc. of AARI, 1988, vol. 401, p. 46–55 (in Russian).
- Mironov Ye.U., Porubaev V.S. Morphometric parameters of ice hummocks and stamukhas from the data of expeditionary research in the Northwestern Part of the Caspian Sea. Russian Meteorology and Hydrology, 2011, No. 5, p. 68–76.
- Mironov Ye.U., Porubaev V.S. Formation of ice ridges in the coastal part of the Kara sea and their morphometric characteristics. Modern Problems of Science and Education, 2012, No. 4. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6707> (submittal date: 05.07.2018).
- Naumov A.K. Morphometric characteristics of ice formations of the Barents sea. Abstract of the PhD thesis. St. Petersburg, 2010, 12 p. (in Russian).
- Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O., Mironov E.U. et al. Peculiarities of consolidated layer growth of the Kara and Laptev Sea ice ridges. Neftyanoe Khozyaystvo [Oil Industry], 2016, No. 11, p. 49–54 (in Russian).
- Patent RU 2153070 C1. Sposob opredeleniya struktury torosov i stamukh, svoistv l'da i granitsy l'da i grunta [Method of determination of ice ridge and stamukha structure, ice features and boundaries of ice and ground]. Morev V.A., Morev A.V., Kharitonov V.V. Russian Federation: МПК E21C 39/00 (2000.01), G01N 9/00 (2000.01). Patent Holders: authors. – No. 2153070. Claimed 19.11.1998. Published 20.07.2000, Bull. No. 20. (in Russian).
- Bonnemaire B., Høyland K.V., Liferov P., Moslet P.O. An ice ridge in the Barents Sea, part I: morphology and physical parameters in-situ. In: Proc. of the 17th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Trondheim, Norway, June 16–19, 2003.
- Kankaanpää P. Structure of first-year ridges in the Baltic Sea In: Proc. of the 10th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineer-

ing under Arctic Condition, POAC'89, June 12–16, 1989, Luleå, Sweden, Luleå University of Technology, 1989, vol. 1, p. 87–102.

Kharitonov V.V. Internal structure and porosity of ice ridges investigated at “North Pole 38” drifting station. Cold Regions Science and Technology, 2012, vol. 82, p. 144–152.

Kharitonov V.V. On the results of research of the internal structure of ice ridges in the “North Pole – 2010” expedition at Barneo ice camp in April 2010. In: Proc. of the 22nd Intern. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Espoo, Finland, June 9–13, 2013.

Mironov Ye.U., Porubaev V.S. Structural peculiarities of ice features of the offshore of the Caspian Sea, the Sea of Okhotsk and the Pechora Sea. In: Proc. of the 18th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Potsdam, New York, June 26–30, 2005, vol. 2, p. 483–492.

Sand B., Petrich C., Sudom D. Morphologies of ridges surveyed off Svalbard and in Fram Strait, 2011 and 2012 field expeditions. In: Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Espoo, Finland, June 9–13, 2013.

Sand B., Bonath V., Sudom D., Petrich C. Three years of measurements of first year ridges in the Barents Sea and Fram Strait. In: Proc. of the 23th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Trondheim, Norway, June 14–18, 2015.

Shestov A.S., Marchenko A.V. Properties of ice ridge keels and sea currents in their vicinity in the Barents Sea. In: Proc. of the 22th IAHR Intern. Symp. on Ice, Singapore, August 11–15, 2014.

Strub-Klein L., Barrault S., Goodwin H., Gerland S. Physical properties and comparison of first- and second-year sea ice ridges. In: Proc. of the 20th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Luleå, Sweden, June 9–12, 2009.

Strub-Klein L., Høyland K. One season of a 1st year sea ice ridge investigation – Winter 2009. In: Proc. of the 21st Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Montréal, Canada, July 10–14, 2011.

Strub-Klein L., Sudom D. A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges. Cold Regions Science and Technology, 2012, vol. 82, p. 94–109.

Sudom D., Timco G. Knowledge gaps in sea ice ridge properties. In: Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Espoo, Finland, June 9–13, 2013.

Suominen M., Polojärvi A., Oikkonen A. Ridge profile measurements for understanding ridge resistance. In: Proc. of the 24th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Busan, Korea, June 11–16, 2017.

Timco G.W., Burden R.P. An analysis of the shapes of sea ice ridges. Cold Region Science and Technology, 1997, vol. 25, p. 65–77.

Weeks W.F., Kovaks A., Hibler III W.D. Pressure ridge characteristics in the Arctic coastal environment. In: Proc. of the 7th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, POAC'71, Trondheim, Norway, August 23–30, 1971, vol. 1, p. 152–183.

*Поступила в редакцию 2 апреля 2018 г.,
после доработки – 10 сентября 2018 г.,
принята к публикации 10 января 2019 г.*