

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.326.7(265.53)

Статистическая модель морфометрии гряды тороса на северо-восточном шельфе о. Сахалин

© 2012 г. Е.У. Миронов, В.С. Порубаев

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

pvs@aari.ru

Статья принята к печати 13 марта 2012 г.

Гидростатическое равновесие, масса льда, морфометрия гряд торосов, Охотское море, шельф о. Сахалин.

Hydrostatic equilibrium, ice mass, morphometry of ice ridges, offshore the coast of Sakhalin Island, the Sea of Okhotsk.

Приведены характеристики геометрии и внутренней структуры гряд торосов, исследованных на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Получена формула, позволяющая рассчитать глубину кия гряды тороса по высоте его паруса. Даны графики плотности распределения вероятностей для характеристик гряды тороса. Построена модель морфометрии и определена масса среднестатистической гряды тороса. Рассмотрены факторы, влияющие на гидростатическое равновесие гряды тороса.

Введение

Начатое в 1990-е годы активное освоение углеводородных месторождений на шельфе замерзающих морей показало, что одна из ключевых проблем этого процесса — расчёт ледовых нагрузок на стационарные ледостойкие платформы и терминалы. При выборе нормативных параметров морского льда обязательно должны быть определены морфометрические характеристики гряды тороса, включая её внутреннюю структуру [1, 17], а также оценена масса льда в гряде тороса. Статистическая модель морфометрии поперечного сечения гряды тороса позволяет обобщить имеющиеся натурные данные с учётом современных знаний о физических процессах торосообразования. Впервые модель поперечного сечения гряды тороса была предложена в работах [4, 11], где авторы представили аппроксимацию сечения гряды тороса в форме равнобедренного треугольника для её надводной и подводной частей. Последующие зарубежные и отечественные исследователи продолжали, в основном, аппроксимировать сечение гряды тороса в виде треугольной призмы [9, 10, 18, 24, 28].

Аппроксимация паруса и кия гряды тороса как треугольниками, так и трапециями дана в работе [1]. Модель гряды тороса, созданная на основе данных надводной и подводной фотосъёмки, приведена в работах [3, 5], где парус и киль гряды тороса аппроксимированы равнобедренными трапециями. В работе [27] представлены статистические модели одно- и многолетней гряды тороса. Однолетняя гряда тороса и в парусе, и в киле аппроксимирована треугольниками; в многолетней гряде тороса киль аппроксимирован трапецией. Причём для создания среднестатистической гряды тороса использо-

ваны сведения по разным регионам, включая и моря умеренной зоны, что не вполне оправдано.

Интересна работа [28], где обобщены данные о рельефе нижней поверхности льда, полученные с подводных лодок, и отдельные наблюдения надводной части гряды тороса при эпизодических всплываниях подводных лодок. В результате на основе большого объёма натурных данных о рельефе нижней поверхности льда впервые была разработана модель поперечного сечения гряды тороса и получены соотношения между основными геометрическими параметрами гряды тороса для Арктического бассейна. При этом принималось условие, что гряда тороса находится в гидростатическом равновесии. Авторы работ [6, 7] исследовали подводную часть гряд торосов с помощью аквалангов, что позволило им точно измерять максимальную глубину кия. В зависимости от толщины всторошенного льда и возраста гряды тороса создано несколько видов поперечных сечений гряд торосов. Парус и киль принимались в форме треугольной призмы.

В работе [15] предложена статистическая модель гряды тороса для юго-западной части Карского моря. Аналогичный методический подход использован нами в данной работе для расчёта статистической модели гряды тороса шельфа о. Сахалин. Обе эти работы основаны на данных о внешнем и внутреннем строении торосов, полученных с помощью теплового бурения. Бурение велось с помощью установок, в основу которых были положены разные методы бурения — электронагревателями и горячей водой. Метод бурения на основе электронагревания впервые описан в работе [22] и применялся при бурении ледников. В 1996 г. установка на

основе электронагревания была усовершенствована, что позволило записывать параметры бурения на компьютер, и применялась при исследовании торосов и стамух в Печорском море. Метод водного бурения впервые описан в работе [26]. Позже водное бурение использовалось при исследовании многолетних дрейфующих льдов моря Бофорта [25] и на шельфе о. Сахалин (1995–1998 гг.) [2, 19]. В 1998 г. на Сахалине, наряду с водным бурением, велось и электробурение с записью получаемых параметров на компьютер. Оба метода имели недостатки. Так, метод электробурения, отличаясь высокой точностью измерения, имел низкую скорость бурения, что не позволяло исследовать большое число торосов и стамух. А метод водного бурения, который имел высокую скорость бурения, не давал желаемой точности измерений. По скорости водного бурения визуально определяли характеристики льда и фиксировали встречающиеся пустоты.

В конце 1990-х годов в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте была разработана, а в 2001 г. изготовлена установка, совмещающая водное бурение с записью параметров бурения на компьютер [16, 23]. Запись и последующая обработка данных позволяют получить объективную информацию о распределении слоёв льда различного типа (твёрдый, рыхлый), наличии пустот в ледяном образовании; определяются также высота паруса и глубина килля, границы льда и грунта. Такие установки с 2002 по 2010 г. использовались при исследовании гряд торосов и стамух в северной части Каспийского моря, на шельфе о. Сахалин и в юго-западной части Карского моря [12–14, 17, 20].

Геометрия гряд торосов

В настоящей работе использованы данные, полученные в 1995–1998 и 2006 гг. на северо-восточном шельфе о. Сахалин в Охотском море. Всего за это время исследовано 116 гряд торосов, которые имели, главным образом, треугольную форму килей. Трапециевидная форма, характерная для килей, обламывающихся при взаимодействии с грунтом дна, встречалась редко. Это

Таблица 1. Геометрические параметры гряд торосов по данным измерений

Параметры	Значения параметров		
	минимальное	среднее	максимальное
Длина гряды тороса, м	50	80	105
Ширина паруса w , м	12	24	52
Высота паруса h , м	1,1	3,1	5,5
Глубина килля H , м	7,3	13,2	23,0
Ширина килля L , м	34	74	123
Толщина гряды тороса T , м	8,10	15,2	26,6
Отношение киль/парус	2,4	4,6	9,0

объясняется тем, что гряды торосов исследовались на большом расстоянии от берега, где глубина моря достаточно большая и взаимодействия килей гряд торосов со дном практически не происходило. Геометрические параметры гряд торосов даны в табл. 1, из которой видно, что на северо-восточном шельфе о. Сахалин гряды торосов представляют собой мощные ледяные образования. Максимальная высота паруса составила 5,5 м. Отметим, что для паруса это большая величина. Максимальная глубина килля также весьма значительна — 23 м.

При прокладке профилей бурения перпендикулярно гряде тороса одна из скважин обязательно располагается на гребне паруса, однако зафиксировать максимальную глубину килля удаётся не всегда, так как киль смещён относительно паруса. Именно поэтому величина отношения киль/парус для гряд торосов Охотского моря в табл. 1 несколько занижена. По данным [7], когда максимальная осадка килей точно фиксировалась аквалангистами, соотношение для гряд торосов, сложенных из ледяных блоков однолетнего льда, в среднем равнялось 5,0. На северо-восточном шельфе о. Сахалин гряды торосов также сложены ледяными блоками однолетнего льда. Это позволяет предположить, что реальное отношение киль/парус в данном районе будет близко к этому значению, т.е. к 5,0.

Осреднённое отношение максимальных значений глубины килля и высоты паруса — величина непостоянная и определяется толщиной гряды тороса. Следует отметить, что не существует прямой связи между максимальными и минимальными значениями толщины тороса и отношением киль/парус, как могло бы показаться из табл. 1. В реальности наблюдается обратная связь, т.е. при увеличении толщины тороса значение отношения киль/парус уменьшается. На рис. 1 показано изменение этого отношения в зависимости от высоты паруса. При увеличении высоты паруса отношение киль/парус H/h уменьшается, приближаясь к 3,0 согласно формуле

$$H/h = 8,5h^{-0,6}. \quad (1)$$

Связь глубины килля с высотой паруса можно описать выражением

$$H = 8,5h^{0,4}. \quad (2)$$

Формулу (2) можно получить как из формулы (1), так и непосредственно путём определения связи между рядами значений высоты паруса и осадки килей.

Плотность распределения вероятностей высоты парусов, глубины килей и толщины гряд торосов аппроксимируется логнормальным законом, который имеет следующий вид:

$$f(x) = \frac{1}{bx\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - a)^2}{2b^2}\right).$$

Параметры a и b логнормального закона распределения связаны с математическим ожиданием m и коэффициентом вариации C :

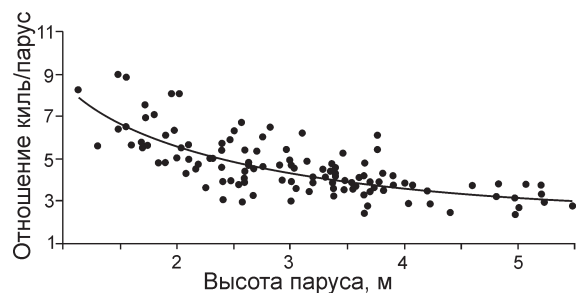


Рис. 1. Изменение отношения киль/парус в зависимости от высоты паруса

Fig. 1. Keel/sail ratio depending on the sail height

$$a = \ln \frac{m}{\sqrt{1+C^2}}; \quad b = \sqrt{\ln(1+C^2)}.$$

Аналогичная аппроксимация плотности распределения вероятностей высоты паруса, глубины килля гряды тороса и других ледовых характеристик использована в работах [8, 12, 13, 21]. График распределения плотностей вероятностей толщины тороса приведён на рис. 2, а.

Консолидированный слой гряд торосов

Консолидированный слой исследованных гряд торосов хорошо выделяется на профилях бурения и образует сплошную область по всей протяжённости гряды тороса. Методика определения толщины консолидированного слоя ледяного образования подробно изложена в работах [13, 16]. Для всего ряда наблюдений получены следующие значения толщины консолидированного слоя: среднее — 1,75 м; минимальное — 0,47 м, что может иметь место в молодых грядах торосов, образовавшихся незадолго до начала их исследования; максимальное из средних — 3,52 м. Тонкий консолидированный слой в отдельных грядах торосов объясняется небольшим периодом его намерзания. Плотность распределения вероятностей средней толщины консолидированного слоя хорошо описывается логнормальным законом. График распределения дан на рис. 2, б. Распределение толщины консолидированного слоя имеет положительную асимметрию. Центром распределения служит модальное значение толщины, величина которой в данном случае равна 1,45. Среднее значение толщины консолидированного слоя превышает его модальное значение на 0,3 м, что для консолидированного слоя — величина существенная.

Пористость гряд торосов

Пористость гряды тороса отражает долю пустот в нём; остальная его часть состоит из твёрдого и рыхлого льда. Коэффициент заполнения — аналог пористости — использовался в работах [4, 7, 28] при построении модели сечения гряды тороса и определялся на основе косвенных данных. После внедрения метода термобу-

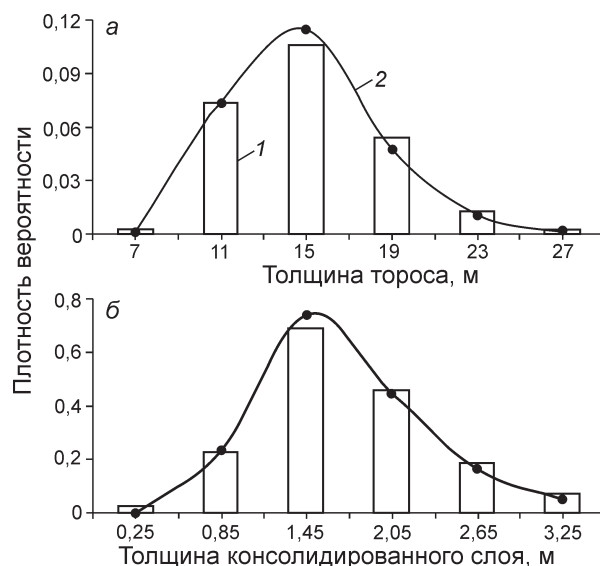


Рис. 2. Распределение плотности вероятностей толщины: а — гряды тороса; б — консолидированного слоя; 1 — эмпирические значения; 2 — теоретические значения

Fig. 2. Probability distribution density: а — of ice ridge thickness; б — of the consolidated layer thickness; 1 — empirical values; 2 — theoretical values

рения появилась возможность измерять объём льда и пустот в толще гряды тороса и объективно находить его пористость. Пористость определяется для отдельных скважин, отдельных профилей (их в одной гряде тороса, как правило, несколько) и всей гряды тороса. Пористость, полученная в отдельных скважинах, не показательна: она может быть или слишком высокой, или слишком низкой и не пригодна для характеристики пористости всего тороса. Средняя пористость, полученная по данным бурения нескольких скважин одного профиля, может характеризовать всю гряду тороса, однако наиболее показательна средняя пористость гряды тороса, рассчитанная по данным нескольких профилей. Рассчитанные по ряду средних значений пористости торосов статистики приведены в табл. 2.

Повышенную пористость обычно имеют молодые гряды торосов, образовавшиеся незадолго до начала исследований. В киях гряд торосов, сформировавшихся в начале холодного сезона, ко времени исследования многие пустоты замерзают. Пористость таких гряд торосов бывает пониженной. Пористость рассчитана с учётом консолидированного слоя и без него. Пористость тороса с учётом консолидированного слоя имеет меньшие значения, так как консолидированная часть тороса практически не имеет пустот.

Распределение плотности вероятностей пористости описывается логнормальным законом и имеет положительную асимметрию. Модальное значение пористости отличается от среднего всего на 2–3%. Модальное и среднее значения пористости с учётом кон-

Таблица 2. Статистики, рассчитанные по ряду средних значений пористости торосов с консолидированным слоем (числитель) и без него (знаменатель)

Пористость, %	Торос	Парус	Киль
Минимальное из средних	4/7	2/7	4/5
Среднее из средних	19/24	10/26	20/24
Максимальное из средних	33/39	28/41	37/39

солидированного слоя равны соответственно 16 и 19%. Эти же характеристики учёта консолидированного слоя равны соответственно 22 и 24%. Данные термобурирования показали, что гряды торосов содержат значительно больше льда (меньшее количество пустот), чем считалось ранее [7, 10].

Статистическая модель гряды тороса

Статистическую модель гряды тороса можно представить в виде профиля со средними морфометрическими параметрами. Горизонтальная протяжённость профиля паруса и киля измерялась от оси паруса (рис. 3). Приведём средние морфометрические параметры элементов гряды тороса (отклонение влево считается со знаком минус, как обычно принято в декартовой системе координат): сторона паруса (малая w_1 – 10 м, большая w_2 – 14 м), сторона киля: малая L_1 – 34 м, большая L_2 – 40 м), смещение осей паруса и киля $d = 8$ м.

Статистическая модель учитывает реально существующую асимметрию профиля гряды тороса. Максимальная высота паруса гряды тороса с треугольной формой киля, как правило, не совпадает с максимальной глубиной киля. Кроме того, асимметрия отмечается и в самом парусе, и в киле. Как правило, один склон

паруса или киля больше другого. На рис. 3 приведён профиль гряды тороса с треугольной формой паруса и киля. Кроме паруса и киля, гряда тороса имеет возвышение – часть льда над килем, где нет паруса. Толщина возвышения постепенно увеличивается от края гряды тороса в сторону паруса, но у самого основания паруса толщина возвышения может уменьшаться, иногда существенно. Иногда возвышение у основания паруса расположено ниже уровня воды, причём толщина возвышения по разные стороны от паруса различна. Профили возвышения и снега при увеличенном масштабе по вертикали показаны на рис. 4.

Видно, что возвышение у основания паруса имеет незначительную толщину льда, хотя толщина снега в этом месте наибольшая. Толщина снега на возвышении гряды тороса больше, чем на парусе. Приведём средние значения: толщина льда (возвышение 1 – 0,36 м, возвышение 2 – 0,49 м), толщина снега (на возвышении 1 – 0,32 м, на возвышении 2 – 0,31 м), толщина снега на парусе – 0,21 м).

Гряда тороса имеет асимметричный профиль, поэтому углы наклона паруса с разных сторон неодинаковы. В киле углы также не равны друг другу. Для среднестатистической гряды тороса значения углов склона паруса и киля таковы (в градусах): углы склона паруса – α_1 – 17, α_2 – 12; углы склона киля – β_1 – 18, β_2 – 22. Сравнение полученных нами значений углов со значениями для гряд торосов Карского моря [15] показывает хорошее их совпадение. Отличия углов гряд торосов Охотского и Карского морей не превышают 1°. В работе [1] приведены значения углов для симметричной гряды тороса Охотского моря. В парусе они составляют 14°, а в киле – 24°, что хорошо согласуется со значениями углов, полученными нами.

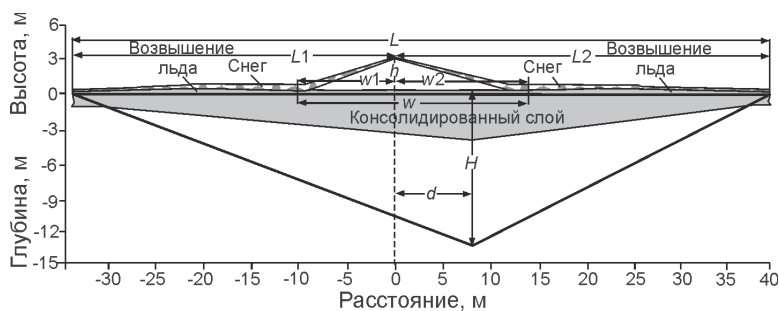


Рис. 3. Графическое представление статистической модели гряды тороса Охотского моря
Fig. 3. Graphical representation of the ice ridge statistical model of the Sea of Okhotsk

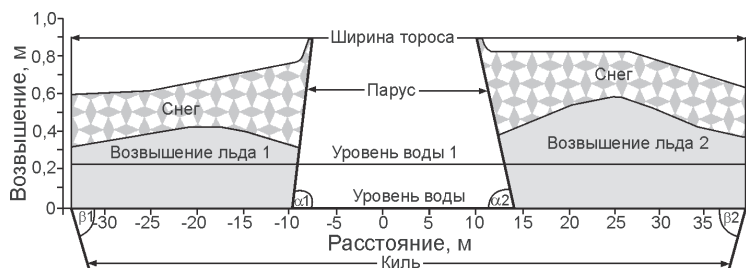


Рис. 4. Подробная схема гряды тороса в районе уровня воды
Fig. 4. Detailed ice ridge scheme in the water line area

Масса льда гряды тороса

Масса льда гряды тороса M_r складывается из массы льда в киле M_k , парусе M_s и возвышении M_e , т.е. $M_r = M_k + M_s + M_e$. Чтобы правильно рассчитать массу льда, необходимо определить пористость или её аналог — коэффициент заполнения гряды тороса. Пористость показывает долю пустот в торосистом образовании и рассчитывается по данным термобурения. Однако гряда тороса состоит не только из твёрдого льда и пустот. Она содержит также рыхлый лёд, который тоже имеет определённую долю пустот. Рыхлый лёд представляет собой раздробленный на мелкие части лёд, нередко заполняющий пространства между ледяными блоками в гряде тороса. Расчёты показывают, что количество рыхлого льда в парусе в среднем составляет 14%, в киле — 28%. Доля пустот в рыхлом льду паруса и киля различна. Хотя прямых измерений этой характеристики не проводилось, оценки показывают, что доля пустот в рыхлом льду паруса и киля равна соответственно 20 и 30%. Большой объём пустот в рыхлом льду киля объясняется тем, что часть кристаллов рыхлого льда киля растворяется в воде или уносится течениями. Рассчитанная пористость паруса и киля гряды тороса с учётом пустот в рыхлом льду составила 13 и 28%, следовательно, коэффициент заполнения соответственно равен 87 и 72%.

Твёрдый лёд содержит некоторое количество пузырьков газа и солей, которые влияют на его плотность. Плотность льда неодинакова в разных регионах исследования. Измерения на северо-восточном шельфе о. Сахалин показали, что здесь средняя плотность льда равна 882 кг/м³. Масса льда паруса, киля и возвышения гряды тороса определяется по следующим формулам:

$$M_r = \rho_i C_k K_k; \quad M_s = \rho_i C_s K_s; \quad M_e = \rho_i C_e K_e,$$

где ρ_i — плотность льда; C_k , C_s , C_e — соответственно объём киля, паруса и возвышения льда; K_k , K_s , K_e — соответственно коэффициенты заполнения киля, паруса и возвышения (коэффициент заполнения возвышения несколько больше коэффициента заполнения паруса).

На поверхности гряды тороса, как правило, лежит снег. Масса снега рассчитывается по формуле $M_{sn} = \rho_{sn} C_{sn}$, где ρ_{sn} — плотность снега, а C_{sn} — его объём. Приведём массу льда и снега в среднестатистической гряде тороса для длины, равной 1 м (числитель), и для всей средней длины гряды тороса, равной 80 м (знаменатель): во всей гряде тороса 353,0/28240 т, в парусе 28,6/2288 т, в киле 308,4/24672 т, в возвышении 16,0/1280 т. Масса снега на торосе равна 4,3/344 т. Основная масса льда сосредоточена в киле гряды тороса. В процентном отношении киль содержит 87% массы льда гряды тороса. На долю паруса и возвышения приходится всего 13%.

Гидростатическое равновесие гряды тороса

Гряда тороса находится в гидростатическом равновесии. Накопление снега в результате задержания его парусом дополнительно увеличивает массу гряды тороса. Однако её заглубление может не происходить. У сформировавшейся гряды тороса консолидированный слой составляет единое целое с окружающим льдом, поэтому гряда тороса, вмороженная в ледяное поле, может поддерживаться на плаву не только за счёт выталкивающей силы воды, действующей на киль, но и за счёт окружающего ледяного поля, в которое она вморожена. В районах с высокой динамикой сплошность ледяного покрова часто нарушается. При этом гряды торосов для достижения гидростатического равновесия погружаются в воду. Если вес гряды тороса с учётом веса снега больше архимедовой силы или эти величины равны, то соотношение сил в данном случае определяется выражением

$$(M_r + M_{sn})g \geq g \rho_w V_k,$$

где M_r — масса гряды тороса; M_{sn} — масса снега; g — ускорение свободного падения; ρ_w — плотность воды; V_k — объём льда в киле гряды тороса.

При взломе окружающих ледяных полей гряда тороса погрузится на некоторую величину в воду и займёт положение, показанное на рис. 4 как «Уровень 1». Приведём формулу для расчёта величины возможного погружения гряды тороса в воду у согласно работе [15]:

$$y = h_E \frac{L}{L-a} - \sqrt{h_E^2 \left(\frac{L}{L-a} \right)^2 - \frac{1}{K_e} \frac{2h_E}{L-a} \left(\frac{M_r + M_{sn}}{\rho_w} - C_k K_k \right)}, \quad (3)$$

где h_E — максимальная толщина возвышения; L — ширина киля; $a = w(h - h_E)/h$; w — ширина паруса; h — высота паруса; K_e — коэффициент заполнения возвышения; C_k — объём киля; K_k — коэффициент заполнения киля.

Расчёты по формуле (3) при использовании среднестатистических параметров показали, что погружение гряды тороса в воду составит всего 1 см. Это ниже точности расчётов и свидетельствует, что на шельфе о. Сахалин среднестатистическая гряда тороса находится в гидростатическом равновесии, так как вес гряды тороса и снега практически равен архимедовой силе.

Заключение

В 1995–1998 и 2006 гг. выполнен комплекс ледовых исследований на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Получены данные натурных исследований морфометрических параметров гряд торосов этого района. На основе исходных данных создана статистическая модель гряды тороса, учитывающая реально существующую в ней асимметрию. Профили парусов и килей представляют собой не равнобедренные треугольники. Ось паруса, как правило, не совпадает с осью киля

гряды тороса. Средняя высота парусов гряд торосов составила 3,1 м при средней глубине килей 13,1 м. Для сравнения — в юго-западной части Карского моря [15] средняя высота паруса — 2,6 м, а средняя глубина килей — 9,7 м. Максимальные значения этих параметров на шельфе о. Сахалин соответственно равны 5,5 и 23,0 м. Это — достаточно большие значения для гряды тороса. В юго-западной части Карского моря максимальные значения высоты паруса и глубины килей также меньше — соответственно 4,5 и 15,7 м. Пористость гряд торосов на шельфе о. Сахалин невысока и по данным измерений для паруса составила 10%, а для килей — 20%. Консолидированный слой, как правило, развит хорошо и для гряд торосов с треугольной формой килей равен в среднем 1,75 м. Основная масса льда (87%) сосредоточена в киле гряды тороса; на долю паруса и возвышения приходится всего 13% льда гряды тороса.

Литература

1. Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П., Литонов О.Е., Мансуров М.Н., Панов В.В., Трусков П.А. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 360 с.
2. Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А. Торосы и стамухи Охотского моря. СПб.: «Прогресс—Погода», 1997. 185 с.
3. Бузев А.Я., Шестериков Н.П. Зависимость средней толщины припайного льда от торосистости // Проблемы Арктики и Антарктики. 1969. Вып. 32. С. 30–36.
4. Бурке А.К. Морские льды. М.—Л.: изд. Главсевморпути, 1940. 96 с.
5. Гаврило В.П., Грищенко В.Д., Ложилов В.С. К вопросу о натурных исследованиях морфологии торосов на арктических льдах и возможности моделирования процессов торосения // Тр. ААНИИ. 1974. Т. 316. С. 70–76.
6. Грищенко В.Д. Некоторые особенности таяния и нарастания подводной части льдов в Арктическом бассейне // Тр. ААНИИ. 1981. Т. 372. С. 123–128.
7. Грищенко В.Д. Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Тр. ААНИИ. 1988. Т. 401. С. 46–54.
8. Гудошников Ю.П., Зубакин Г.К., Наумов А.К. Статистические характеристики элементов торосистых образований // Ледяные образования морей Западной Арктики. СПб.: изд. ААНИИ, 2006. С. 88–99.
9. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: изд. Главсевморпути, 1945. 360 с.
10. Кириллов А.А. Учет торосистости при определении объема льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1957. Вып. 2. С. 53–58.
11. Макаров С.О. «Ермак» во льдах. СПб., 1901. 507 с.
12. Миронов Е.У., Смирнов В.Н., Никитин В.А., Порубаев В.С. Основные результаты пятилетних ледовых исследований для обеспечения проектирования объектов обустройства нефтегазовых месторождений в северо-западной части Каспийского моря // Тр. 7-й междунар. конф. РАО'05, 13–15 сентября 2005. СПб., 2005. С. 293–298.
13. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Порубаев В.С. Морфометрические характеристики гряд торосов и стамух по данным натурных наблюдений и модельных расчетов в северо-западной части Каспийского моря // Тр. 9-й междунар. конф. РАО'09, 15–18 сентября 2009. Т. 1. СПб., 2009. С. 280–286.
14. 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.
15. 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.
16. Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В. Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта. Патент № 2153070 от 20.07.2000.
17. Смирнов В.Н., Миронов Е.У. Исследование прочности, морфометрии и динамики льда в инженерных задачах при освоении шельфа в замерзающих морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 5–15.
18. Kovacs A. On pressured sea ice // Sea Ice: Proc. of Int. Conf. Reykjavik, 1971. P. 276–295.
19. Mironov Ye., Poplin J.P., Wang A.T., Klyachkin S.V., Speransky D.A. Winter 1998 study of ice ridge geometry offshore Sakhalin Island // Proc. of the 15th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, POAC'99. V. 1. Helsinki, 1999. P. 60–69.
20. Mironov Y.U., Morev V.A., Porubayev V.S., Kharitonov V.V. Study of geometry and internal structure of ice ridges and stamukhas using thermal water drilling // Proc. of the 17th Int. Conf. on POAC'03, June 16–19, 2003. V. 2. Trondheim, Norway, 2003. P. 623–634.
21. Mironov Ye.U., Porubayev V.S. Structural peculiarities of ice features on the offshore of the Caspian Sea, the Sea of Okhotsk and the Pechora Sea // Proc. of the 18th Int. Conf. on POAC'05, June 26–30, 2005. Potsdam, USA, 2005. P. 709–720.
22. Morev V.A., Pukhov V.A., Zagorodnov V.S., Yakovlev V.M. Equipment and technology for drilling in temperate glaciers // Proc. of 2 Int. Workshop on ice drilling technology, Calgary, Special Report, New Hampshire, 1984. P. 125–127.
23. Morev V., Kharitonov V. Definition of the internal structure of large ice features by thermal drilling methods // Proc. of the 16th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, POAC'01. V. 3. Ottawa, Ontario, Canada, 2001. P. 1465–1472.
24. Parmeter R., Coon M. Model of pressure ridge formation in sea ice // Journ. of Geophys. Research. 1971. V. 77. № 33. P. 6565–6577.
25. 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.
26. Taylor Ph. L. A hot water drill for temperate ice // CRREL Special Report 84–34. 1984. P. 105–117.
27. Timco G. W., Burden R.P. An analysis of the shapes of sea ice ridges // Cold Regions Science and Technology. 1997. № 25. P. 65–77.
28. Wittman W.I., Schule S.J. Comments of the mass budget of Arctic pack ice // Proc. of the Arctic Heat Budget and Atmospheric Circulation. The Rand Corporation. 1966. P. 215–246.

Summary

The work presents characteristics on geometry and inner structure of ice ridges investigated at offshore the northeast coast of Sakhalin Island. A formula was obtained which allows one to calculate the ice ridge keel depth by the height of its sail. Plots of the probability distribution density for ice ridge characteristics are given. A model of morphometry of a mean statistical ice ridge was constructed, and its mass is determined. Factors influencing the hydrostatic ice ridge equilibrium are considered.