

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОРФОМЕТРИИ ГРЯДЫ ТОРОСА В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

д-р геогр. наук *Е.У.МИРОНОВ*, канд. техн. наук *В.С.ПОРУБАЕВ*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, *mir@aari.ru pvs@aari.ru*

В работе приведены характеристики по геометрии и внутренней структуре гряд торосов в юго-западной части Карского моря, полученные на основе специальных исследовательских работ, выполненных в этом районе. Приведены формулы плотности распределения вероятности для характеристик гряды тороса. Построена модель морфометрии среднестатистической гряды тороса. Показано, что гряда тороса, замороженная в ледяное поле, находится в гидростатическом равновесии не только за счет баланса собственного веса и архимедовой силы, но и под воздействием окружающих ледяных полей. Рассчитана величина погружения гряды тороса в случае взлома окружающих ледяных полей.

Ключевые слова: арктические моря, Карское море, методы термобурения льда, морфометрия гряд торосов.

ВВЕДЕНИЕ

Активное освоение углеводородных месторождений на шельфе замерзающих морей, начатое в 1990-е гг., показало, что одной из ключевых проблем является расчет ледовых нагрузок на стационарные ледостойкие платформы и терминалы. При выборе нормативных параметров морского льда необходимым условием является оценка морфометрических характеристик гряды тороса, включая его внутреннюю структуру [Алексеев и др., 2001; Смирнов, Миронов, 2010]. Статистическая модель морфометрии поперечного сечения гряды тороса позволяет обобщить имеющиеся натурные данные с учетом современных знаний о физических процессах торосообразования.

Впервые модель поперечного сечения гряды тороса была предложена в работах [Бурке, 1940; Макаров, 1901]. В этих работах была предложена аппроксимация сечения гряды тороса в форме равнобедренного треугольника для его надводной и подводной части. Большинство последующих зарубежных и отечественных исследователей продолжали аппроксимировать сечение гряды тороса в виде треугольной призмы [Зубов, 1945; Кириллов, 1957; Kovacs, 2003; Parmeter, Coon, 1971; Wittman, Schule, 1966]. В работе [Бузуев, Шестериков, 1969] представлена модель тороса В.С.Лошилова, который на основании данных подводной и надводной фотосъемки аппроксимировал парус и киль гряды тороса равнобедренными трапециями.

Наибольший интерес представляет работа [Wittman, Schule, 1966], в которой обобщены данные о рельефе нижней поверхности льда, полученные с подводных лодок, и отдельные фиксации надводной части торосов при эпизодических всплываниях подводных лодок. В результате впервые была разработана модель поперечного сечения гряды тороса на основе большого количества натурных данных о рельефе нижней поверхности льда и получены соотношения между основными геометрическими параметрами тороса для Арктического бассейна. При этом принималось условие, что гряда тороса находится в гидростатическом равновесии.

В работах [Грищенко, 1981, 1988] исследования подводной части гряд торосов проводились с использованием акваланга, что позволило автору предложить несколько видов поперечных сечений гряд торосов, в зависимости от толщины восторошенного льда и возраста гряды тороса. Коэффициент заполнения гряды тороса принимался на основе качественной оценки наблюдений и логических умозаключений. В результате были получены соотношения между морфометрическими параметрами гряд торосов шести видов при условии гидростатического равновесия гряды тороса и ее аппроксимации в форме треугольной призмы.

Для получения детальной информации о внутреннем строении торосистых образований был разработан метод теплового бурения, при котором для эффективного и быстрого получения глубоких скважин производится бурение горячей водой. Тепловое водное бурение было впервые применено в ледниках [Morev et al., 1984; Taylor, 1984]. Затем термобурение использовалось при исследовании многолетних дрейфующих льдов моря Бофорта [Porlin et al., 1987], торосов и стамух в 1995 г. в Обской губе и в 1995–1998 гг. на шельфе о. Сахалин [Астафьев и др., 1997; Mironov et al., 1999]. Во время проходки скважин, по данным о скорости бурения, визуальное определялись характеристики льда и фиксировались встречающиеся пустоты.

В конце 1990-х гг. в АНИИ была разработана, а в 2001 г. изготовлена термобуровая установка бурения льда горячей водой с записью параметров бурения на компьютер [Морев и др., 2000]. Запись и последующая обработка данных бурения позволяет получать объективную информацию о распределении слоев льда различного типа (твердый, рыхлый), о распределении пустот в ледяном образовании, при этом определяются также высота паруса и глубина киля, границы льда и грунта [Morev, Kharitonov, 2001]. Такая установка с 2002 по 2010 г. использовалась при проведении работ по исследованию торосов и стамух в северной части Каспийского моря, на шельфе о. Сахалин и в юго-западной части Карского моря [Миронов и др., 2005; Миронов и др., 2009; Миронов, Порубаев, 2011; Смирнов, Миронов, 2010; Mironov et al., 2003].

Согласно номенклатуре морских льдов гряда тороса представляет собой сравнительно прямолинейное нагромождение деформированного льда. Для удобства изложения далее в тексте статьи вместо термина «гряда тороса» будет в основном употребляться наиболее общий термин «торос».

ГЕОМЕТРИЯ ГРЯД ТОРОСОВ

В работе проанализировано 27 гряд торосов, исследованных в 2007–2010 гг. в юго-западной части Карского моря, большей частью в Байдарацкой губе. Этот период в данном регионе отмечался в целом легкими ледовыми условиями. Поэтому измеренные параметры торосов характерны для легких ледовых условий. Следует отметить, что легкие ледовые условия не обязательно приводят к заниженным параметрам торосов, так как большую роль при этом играет динамика ледяного покрова. Значения измеренных основных параметров торосов приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что торосы, исследованные в юго-западной части Карского моря, в частности в Байдарацкой губе, были достаточно мощными. Средняя высота их парусов составляла более 3 м, а средняя глубина килей превышала 11 м, при средней толщине торосов равной 13,3 м. Максимальная высота паруса составила 4,5 м, максимальная глубина киля превысила 15 м, а максимальная толщина тороса была около 20 м.

Существует связь ширины киля (L) с шириной паруса (w). Связь характеризуется коэффициентом корреляции 0,76 и аппроксимируется формулой:

$$L = 0,98 \cdot w + 26.$$

Во время экзарации кили торосов обламываются, приобретая профиль трапеции. Исследованные гряды торосов были разделены на две группы. К первой группе отнесены торосы, профили килей которых хорошо аппроксимируются треугольниками, ко второй – торосы, кили которых хорошо аппроксимируются трапецией. Паруса в обоих случаях аппроксимированы треугольниками. Параметры торосов первой и второй групп приведены в табл. 2 и табл. 3.

Расчеты показали, что среднее значение отношения киль/парус у торосов с треугольной формой кия равно 4,0, что превышает значение этой характеристики для торосов с трапециевидной формой кия, которое равно 3,7.

При прокладке линий бурения перпендикулярно гребню тороса выбираются места, где высота паруса наибольшая, и одна из скважин обязательно располагается на гребне паруса. Однако максимальная высота паруса, как правило, смещена относительно максимальной глубины кия, и во многих случаях, когда кили торосов имеют треугольную форму, не удается фиксировать максимальную глубину кия. Поэтому, чтобы уточнить среднюю глубину кия тороса, при треугольной его форме необходимо использовать соотношение киль/парус, полученное в случаях, когда глубина кия измерялась достаточно точно.

Надежные данные по этому соотношению получены при стереофото съемке надводной и подводной частей торосов [Гаврило и др., 1974], где соотношение

Таблица 1

Геометрические параметры гряд торосов по данным измерений

Параметр	Длина гряды тороса	Ширина паруса (w)	Высота паруса (h)	Глубина кия (H)	Ширина кия (L)	Толщина тороса (T)	Соотношение киль/парус
Min, м	24	7	1,5	6,0	21	7,7	3,0
Среднее, м	61	19	3,2	11,5	50	13,3	3,8
Max, м	95	34	4,5	15,7	72	19,8	6,7

Таблица 2

Геометрические параметры гряд торосов с треугольной формой кия

Параметр	Длина гряды тороса	Ширина паруса (w)	Высота паруса (h)	Глубина кия (H)	Ширина кия вверху (L)	Толщина тороса (T)	Соотношение киль/парус
Min, м	45	8	1,5	6,0	31	7,7	3,0
Среднее, м	71	21	2,6	9,7	52	11,2	4,0
Max, м	85	31	4,5	14,9	72	17,1	6,7

Таблица 3

Геометрические параметры гряд торосов с трапециевидной формой кия

Параметр	Длина гряды тороса	Ширина паруса (w)	Высота паруса (h)	Глубина кия (H)	Ширина кия вверху (L)	Ширина кия внизу (B)	Толщина тороса (T)	Соотношение киль/парус
Min, м	24	7	2,0	8,5	21	5	9,9	3,2
Среднее, м	57	17	3,5	12,1	48	10	14,3	3,7
Max, м	95	34	4,4	15,7	66	22	19,8	4,6

киль/парус равно 5,5. Однако эти соотношения относятся к торосам, сложенным из толстого однолетнего льда и имеющим кили в форме трапеций. Наиболее подходящими для сравнения являются данные, приведенные в работе [Грищенко, 1988], когда максимум осадки кия тороса измерялся аквалангистами. Как указано в этой работе, соотношение киль/парус для тороса, средняя толщина ледяных блоков которого составляет 0,30 м, для свежих гряд равно 5,0, для старых торосов 4,2. В среднем эта величина составляет 4,6. В юго-западной части Карского моря средняя толщина ледяных блоков составляла 0,34 м, что дает основание в общем случае использовать соотношение, равное 4,6.

Скорректированная средняя глубина кия треугольной формы равна 11,9 м, что несколько меньше глубины килей трапециевидной формы. Для торосов с трапециевидной формой кия корректировка глубины кия не требуется, так как нижнее основание их кия плоское и максимальная осадка, как правило, фиксируется.

Среднее значение отношения киль/парус, как уже указано выше, для торосов рассматриваемого района равно 4,6. Однако отношение глубины кия к высоте паруса не является константой и связано с высотой паруса. При увеличении высоты паруса эта характеристика уменьшается, приближаясь к значению 3,0 согласно формуле

$$H/h = 5,2 \cdot h^{-0,35}.$$

Возможно, это является одной из причин того, что отношение киль/парус у второй группы торосов меньше, чем в первой группе, так как сравнительный анализ данных табл. 2 и табл. 3 показывает, что высота паруса и глубина килей второй группы больше, чем соответствующие параметры торосов первой группы. Кроме того, на величину отношения киль/парус сказался факт обламывания килей торосов с трапециевидной формой килей.

Глубина кия связана с высотой паруса. Связь глубины кия с высотой паруса несколько отличается для торосов с треугольной и трапециевидной формой кия. Связь имеет вид:

$$H = 2,5 \cdot h + 3,1, \quad H = 2,8 \cdot h + 2,7$$

соответственно.

Коэффициент корреляции между глубиной кия и высотой паруса равен 0,81. Для общего случая связь имеет вид:

$$H = 2,7 \cdot h + 2,8.$$

Плотность распределения вероятности высоты парусов и глубины килей торосов хорошо аппроксимируется логнормальным законом, который представляется следующей формулой:

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

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

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

Аналогичная аппроксимация плотности распределения вероятности высоты паруса, глубины кия торосов и других ледовых характеристик использована в работах [Мионов и др., 2005; Гудошников и др., 2006; Мионов и др., 2009; Mironov, Porubayev, 2005].

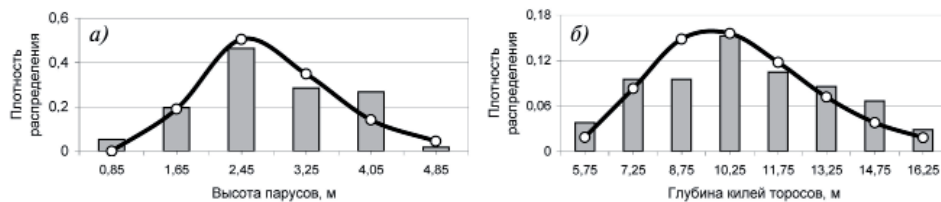


Рис. 1. Плотность распределения вероятности высоты парусов (а) и глубины килей (б) торосов (кривая – теоретические значения, гистограмма – эмпирические значения)

График плотности распределения вероятности этих характеристик для Байдарской губы показан на рис. 1. В расчетах используются максимальные значения высоты парусов и глубины килей торосов по линиям. Линии бурения расположены обычно на расстоянии более 10 метров друг от друга, и потому максимальные значения этих характеристик являются независимыми.

КОНСОЛИДИРОВАННЫЙ СЛОЙ ГРЯД ТОРОСОВ

Консолидированный слой (КС) исследованных торосов хорошо выделяется на профилях бурения и распространяется сплошной областью по всей протяженности тороса. Методика определения консолидированного слоя ледяного образования подробно изложена в работах [Миронов и др., 2009; Морев и др., 2000]. В табл. 4 приведены значения консолидированного слоя для всего ряда наблюдений, а также для торосов с треугольной и трапециевидной формой кия.

Как видно из табл. 4, значения толщины консолидированного слоя у торосов с разной формой кия имеют существенные отличия. Средняя толщина консолидированного слоя и экстремальные ее значения у торосов с трапециевидной формой кия превышают соответствующие значения для торосов с треугольной формой кия. Оценка времени образования торосов показывает, что 84 % исследованных торосов с трапециевидной формой кия образовались в декабре–январе, в то время как кили с треугольной формой кия большей частью образовались в январе по март. Более длительный период существования торосов с трапециевидной формой кия является основной причиной большего значения средней толщины консолидированного слоя.

Известно, что плотность распределения вероятности толщины консолидированного слоя описывается логнормальным законом [Mironov, Porubayev, 2005]. Распределение, рассчитанное по всему ряду значений, приведено на рис. 2. При расчете плотности распределения вероятности использованы средние значения толщины консолидированного слоя по линиям.

Модальное значение толщины консолидированного слоя равно 2,5 м и практически совпадает с его средним значением. В левой части распределения значения эмпирической и теоретической плотности невелики. Они обеспечены значениями

Таблица 4

Характеристики консолидированного слоя (КС) гряд торосов с треугольной и трапециевидной формой кия

Форма кия	Треугольная			Трапециевидная			Все торосы		
	минимум из средних	средняя из средних	максимум из средних	минимум из средних	средняя из средних	максимум из средних	минимум из средних	средняя из средних	максимум из средних
Статистики по линиям бурения									
Толщина КС, м	0,98	2,06	3,32	1,77	2,63	3,63	0,98	2,52	3,63

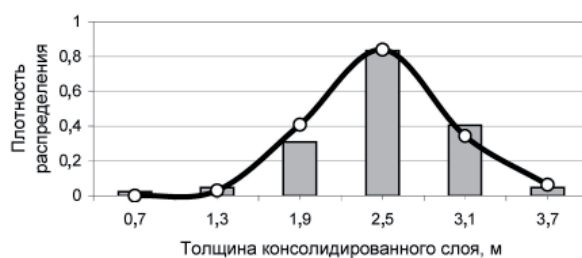


Рис. 2. Плотность распределения вероятности средней толщины консолидированного слоя гряды тороса (кривая — теоретическое распределение, гистограмма — эмпирическое распределение)

толщины консолидированного слоя на краях торосов, где его толщина близка к толщине окружающего ровного льда.

ПОРИСТОСТЬ ГРЯД ТОРОСОВ

Пористость тороса, показывает долю пустот в нем, остальная часть тороса состоит из твердого и рыхлого льда. Коэффициент заполнения тороса, который является аналогом пористости и использовался в предыдущих работах при построении модели сечения тороса, определялся на основе косвенных данных [Бурке, 1940; Грищенко, 1988; Wittman, Schule, 1966]. Только после внедрения метода термобурения была получена возможность измерения границ льда и пустот в толще тороса и объективного определения пористости.

Пористость рассчитывается для отдельных скважин, для отдельных линий, которых в одном торосе несколько, и для всего тороса. Пористость, полученная в отдельных скважинах бурения, не показательна, так как случайно может быть слишком большой либо слишком низкой. Средняя пористость по линии бурения уже может характеризовать весь торос. Наиболее показательной является пористость, средняя для всего тороса, рассчитанная по данным нескольких линий. Рассчитанные средние и экстремальные значения пористости для торосов приведены в табл. 5.

В таблице приведена пористость как с учетом консолидированного слоя, так и без него. Отличия пористости при этом наибольшие в киле, так как консолидированный слой в основном находится в нем. Пористость паруса, как видно из таблицы, изменилась мало.

Минимальные значения пористости, равные 1 %, показывают, что отдельные торосы могут иметь мало пустот. Обычно это торосы, образовавшиеся в начале холодного сезона. К моменту исследования многие пустоты, расположенные ниже уровня воды, в таких торосах замерзают. Пористость этих торосов бывает пониженной. На рис. 3 показана плотность распределения вероятности средней пористости торосов. Эмпирическая гистограмма аппроксимирована распределением Гумбеля.

Таблица 5

Средние и экстремальные значения пористости гряды тороса

Пористость	С консолидированным слоем			Без консолидированного слоя		
	торос в целом	парус	киль	торос в целом	парус	киль
Минимальная, %	1	1	1	2	1	2
Средняя, %	9	5	10	14	7	14
Максимальная, %	23	23	25	38	23	40

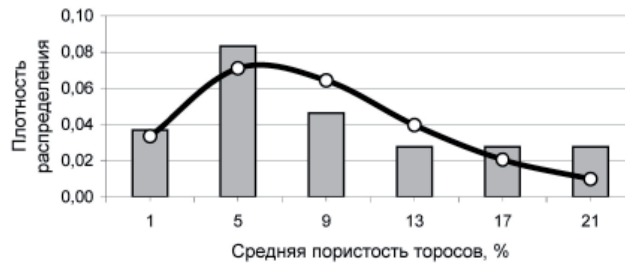


Рис. 3. Плотность распределения вероятности средней пористости торосов (кривая – теоретическое распределение, гистограмма – эмпирическое распределение)

Как видно из рисунка, теоретические значения плотности вероятности в некоторых градациях существенно отличаются от эмпирических значений. Это объясняется недостатком натуральных данных. Тем не менее данные термобурения показывают, что торосы Карского моря имеют значительно большее содержание льда (меньшее количество пустот), чем представлялось ранее [Грищенко, 1988; Кириллов, 1957].

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРЯДЫ ТОРОСА

Статистическую модель тороса можно представить в виде профиля тороса со средними морфометрическими параметрами. Горизонтальная протяженность склонов паруса и киля тороса измерялись от оси паруса. Средние их значения приведены в табл. 6. Отклонение влево считается со знаком минус, как обычно принято в декартовой системе координат.

Статистическая модель учитывает реально существующую асимметрию тороса. Максимум паруса для торосов с треугольной формой киля, как правило, не совпадает с максимальной глубиной киля. Кроме того, асимметрия имеет место и в самом парусе и киле. Как правило, один склон паруса или киля больше другого.

На рис. 4 приведены два варианта профиля для торосов с треугольной и трапециевидной формой киля.

Обычно в моделях описывают только парус и киль. Но торос имеет возвышение. Это часть льда над килем, где нет паруса. Возвышение в торосе постепенно увеличивается в толщине от края тороса в сторону паруса. Средняя толщина возвышения льда, полученная по данным экспедиционных исследований в юго-западной части Карского моря, составила 0,44 м. В направлении паруса тороса

Таблица 6

Средние морфометрические параметры элементов гряды тороса

Параметр	Малая сторона основания паруса (w_1), м	Большая сторона основания паруса (w_2), м	Малая сторона верха киля (L_1), м	Большая сторона верха киля (L_2), м	Левая сторона нижней части киля (B_1), м	Правая сторона нижней части киля (B_2), м	Смещение между осями паруса и киля (d), м
Треугольная форма киля	-8	13	-23	29	-	-	6
Трапециевидная форма киля	-6	11	-23	25	-1	9	-

значение этой характеристики увеличивается, достигая величины 1,0–1,1 м. Для отдельных торосов возможны случаи горизонтальной ее поверхности. У подножья паруса иногда отмечается понижение поверхности возвышения.

Торос занимает свое положение по отношению к уровню воды не только за счет баланса своего веса и архимедовой силы, но и под воздействием окружающих ледяных полей.

Масса тороса складывается из массы льда в киле, в парусе и массы льда в возвышении:

$$M_r = M_k + M_s + M_e,$$

где M_r – масса тороса, M_k – масса льда в киле тороса, M_s – масса льда в парусе, M_e – масса льда в возвышении.

Возвышение состоит из двух частей, расположенных слева и справа от паруса. На рис. 5 эта область тороса затемнена.

Масса льда в киле, в парусе и в возвышении льда рассчитывается по формулам с учетом коэффициентов заполнения:

$$M_k = \rho_i C_k K_k,$$

$$M_s = \rho_i C_s K_s,$$

$$M_e = \rho_i C_e K_e,$$

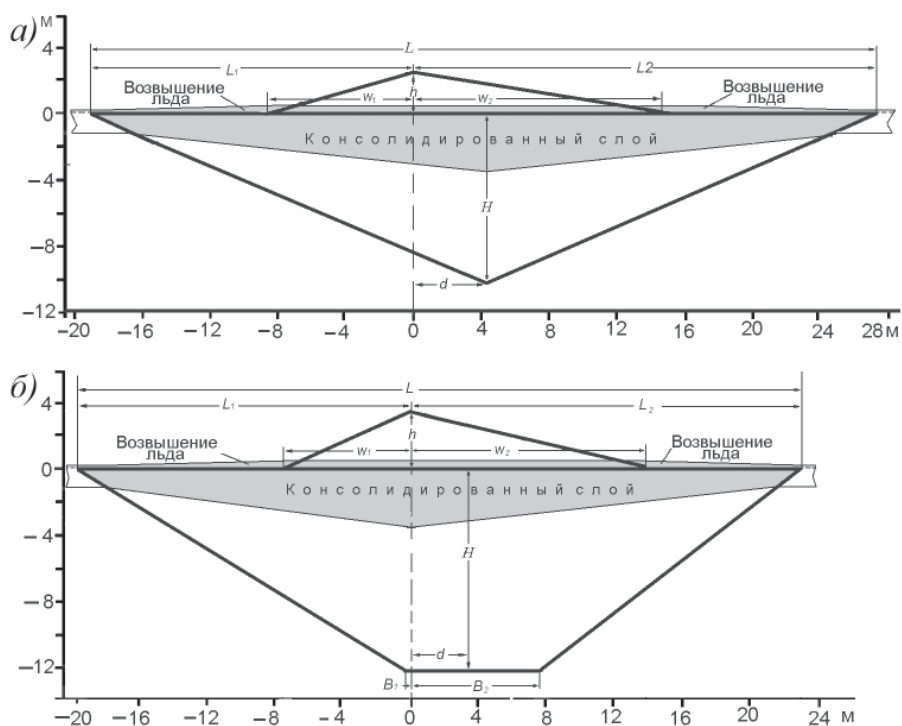


Рис. 4. Графическое представление статистических моделей торосов, построенных по средним значениям элементов для торосов с треугольной (а) и с трапециевидной (б) формой киля

где ρ_i – плотность льда, C_k, C_s, c_e – объем киля, паруса и возвышения льда, K_k, K_s, k_e – коэффициенты заполнения киля, паруса и возвышения соответственно. Коэффициент заполнения возвышения является близким к коэффициенту заполнения паруса, несколько превышая его.

На поверхности тороса, как правило, лежит снег. Масса снега рассчитывается по формуле:

$$M_{sn} = \rho_{sn} C_{sn},$$

где ρ_{sn} – плотность снега, C_{sn} – объем снега.

Теоретически можно рассмотреть случай, когда выталкивающая сила воды больше веса тороса и торос, при взломе ледяного поля, будет всплывать. Но такие случаи будут встречаться редко, так как причин для увеличения выталкивающей силы воды мало. При этом соотношение основных сил будет описываться неравенством:

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

где g – ускорение свободного падения, ρ_w – плотность воды, V_k – объем массы льда в киле тороса.

Возможен случай, когда при взломе окружающих ледяных полей гидростатическое равновесие наступит при погружении тороса на некоторую величину. Предварительные расчеты показывают, что это вполне реальный случай. Это объясняется следующим. В момент образования тороса часть паруса ложится на края ледяных полей, которые удерживают часть веса паруса. У сформировавшегося тороса консолидированный слой составляет единое целое с окружающим льдом. Торос, вмороженный в ледяное поле, поддерживается на плаву не только выталкивающей силой воды, действующей на киль, но и окружающим ледяным полем, в которое он вморожен. Накопление снега на торосе, в результате задержания его парусом, приводит к дополнительному увеличению веса тороса, что будет также способствовать погружению тороса на некоторую величину в воду при взломе окружающих ледяных полей.

Если вес тороса, с учетом массы снега, больше архимедовой силы, соотношение сил в этом случае определяется неравенством при прежних обозначениях:

$$(M_r + M_{sn})g > g\rho_w V_k.$$

Представляет интерес рассчитать величину погружения тороса при взломе окружающего его ледяного поля. Торос будет погружаться в воду до момента наступления гидростатического равновесия.

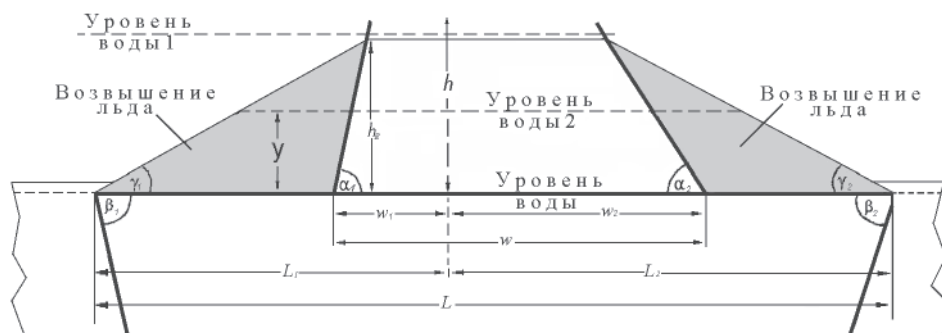


Рис. 5. Возможные погружения тороса относительно исходного уровня воды

При погружении тороса возможны два случая. В первом случае торос погрузится в воду на величину, равную максимальной толщине возвышения h_E или большую. На рис. 5 такое погружение обозначено как «уровень воды 1». В этом случае все возвышение льда окажется под водой

Для того чтобы уровень воды при погружении тороса оказался выше максимальной высоты возвышения или равен ей, необходимо выполнение условия:

$$M_r + M_{sn} \geq \rho_w (C_k K_k + C_E K_E), \quad (1)$$

где C_E – объем всего возвышения и части паруса, погружающиеся в воду, K_E – коэффициент заполнения части тороса, погружающейся в воду.

Масса снега при этом принимает несколько другое значение. В этом случае снег на возвышении льда погрузится ниже уровня воды и составит с водой единую консистенцию. При расчете равновесного состояния необходимо использовать среднюю толщину снега, лежащего только на парусе. По данным наблюдений, снег на возвышении имел среднюю толщину 20 см, на парусе 17 см.

В случае, когда торос погрузится в воду на величину y , меньшую, чем максимальная величина возвышения h_E , необходимо выполнение двух условий, при прежних обозначениях:

$$\left. \begin{aligned} M_r + M_{sn} &> \rho_w (C_k K_k) \\ M_r + M_{sn} &< \rho_w (C_k K_k + C_e K_E) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Расчеты показывают, что при средних значениях параметров тороса, полученных по данным экспедиционных наблюдений, выполняется система неравенств (2). Таким образом, среднестатистический торос после взлома окружающих полей льда погрузится в воду на некоторую величину, меньшую максимального значения возвышения льда. Новое положение уровня воды на рис. 5 обозначено как «Уровень воды 2». При этом гидростатическое равновесие будет описываться следующим выражением:

$$M_r + M_{sn} = \rho_w (C_k K_k + (L - \frac{L-a}{2h_E} y) K_E),$$

где y – величина погружения тороса, $a = w \frac{h-h_E}{h}$, L – ширина киля, w – ширина паруса, h – высота паруса, h_E – максимальная толщина возвышения.

Решение этого уравнения дает формулу для расчета величины погружения тороса:

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

С использованием значений морфометрических параметров тороса и характеристик льда и снега, полученных по данным экспедиционных исследований, была рассчитана величина погружения тороса при взломе окружающих его полей льда.

Величина погружения оказалась существенной и составила 0,29 м для торосов с треугольной формой киля и 0,38 м для торосов с трапециевидной формой киля. Отличия в величине просадки тороса во многом объясняются тем, что кили трапециевидной формы обламывались при экзарации. При уменьшении объема киля архимедова сила уменьшается на большую величину, чем вес тороса, так как плотность воды превышает плотность льда.

Кроме того, были рассчитаны углы склонов паруса, киля и возвышения льда. Обозначения углов и их положение показаны на рис. 5. Значения углов и величина погружения торосов приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Углы наклона парусов, килей, возвышения льда и величина просадки
для двух типов гряд торосов**

Характеристика	Углы наклона паруса, град.		Углы наклона киля, град.		Углы наклона возвышения, град.		Погружение тороса, м
	α_1	α_2	β_1	β_2	γ_1	γ_2	
Треугольная форма киля	18	11	23	19	4,5	3,4	0,29
Трапециевидная форма киля	30	18	28	26	3,8	4,5	0,38

Торос асимметричен, углы левого и правого его склонов различны. В ранее предложенных моделях не всегда учитывалась асимметрия тороса. Парус и киль были аппроксимированы равнобедренными треугольниками. Углы склонов как паруса, так и киля слева и справа от гребня считались одинаковыми. Для сравнения с данными других работ значения углов, приведенные в табл. 7, осреднены.

Для первого варианта модели тороса, когда торос аппроксимируется треугольником, среднее значение из двух углов паруса равно 14° , а для киля, в среднем, 22° . В работе [Алексеев и др., 2001] для торосов с треугольной формой киля углы склона в парусе равны 14° , в киле 24° , что хорошо согласуется со средними значениями углов, полученными в данной работе.

Для варианта, когда киль тороса имеет трапециевидную форму, среднее значение угла для склона киля табл. 7 практически не отличается от значения угла, приведенного в работе [Алексеев и др., 2001], составляя 26 и 27° соответственно. Углы склонов парусов торосов с трапециевидной формой киля по данным двух моделей отличаются. В работе [Алексеев и др., 2001] угол склона паруса меньше и составляет 13° , в то время как среднее значение угла, полученное в данной работе, составило 24° .

В работе [Алексеев и др., 2001] приводятся углы склона, как сказано, для застамушенного тороса, с учетом асимметрии паруса и трапециевидной формы киля. Углы склонов паруса, и в большей степени для киля, имеют отличия от значений углов, полученных в данной работе. Это объясняется тем, что в работе [Алексеев и др., 2001] в реальности рассмотрена стамуха, а не торос с обломленным килем, что делает сравнение некорректным.

В работе [Грищенко, 1988] приводятся углы склонов торосов различного возраста. С учетом того, что эти исследования были проведены в Арктическом бассейне, совпадение значений углов с оценками, полученными в данной работе, следует считать удовлетворительным.

Рассчитанные углы наклона возвышения в торосе сравнительно малы и находятся в диапазоне $3,4\text{--}4,5^\circ$. Такая же характеристика была выделена в модели тороса в работе [Wittman, Schule, 1966]. Угол наклона возвышения при этом составил $4,2^\circ$, что хорошо согласуется с результатом, полученным в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2007–2010 гг. выполнен комплекс ледовых исследований в юго-западной части Карского моря. В результате получены натурные данные по морфометрическим параметрам гряд торосов, которые использовались для создания статистической модели гряды тороса этого района. Данные были получены в период мягких и умеренных зим.

Средняя высота парусов гряд торосов составила $3,2$ м, при средней глубине килей $11,5$ м. Максимальные значения этих параметров составили $4,5$ и $15,7$ м со-

ответственно. Пористость гряд торосов была невысокой и в среднем составила для паруса 5 %, а для киля 10 %. Консолидированный слой гряд торосов был хорошо развит и составил для гряд торосов с треугольной формой киля в среднем 2,1 м, а для гряд торосов с трапециевидной формой 2,6 м.

На основе исходных данных была создана статистическая модель гряды тороса, которая учитывает реально существующую в гряде тороса асимметрию. Профили парусов и килей гряд торосов представляют собой неравносторонние треугольники. Ось паруса гряды тороса, как правило, не совпадает с осью гребня. Кроме того, были выделены гряды торосов с трапециевидной формой килей, что тоже учтено в модели. Такие кили образовались в процессе пропахивания дна, когда нижняя часть килей обламывалась.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.: Гидрометеоиздат, 2001. 360 с.
- Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А.* Торосы и стамухи Охотского моря. СПб.: Изд-во «Прогресс–Погода», 1997. 185 с.
- Бузуев А.Я., Шестериков Н.П.* Зависимость средней толщины припайного льда от торосистости // Проблемы Арктики и Антарктики. 1969. Т. 32. С. 30–36.
- Бурке А.К.* Морские льды. М.Л.: Изд-во Главсевморпути, 1940. 96 с.
- Гаврило В.П., Грищенко В.Д., Лоцилов В.С.* К вопросу о натуральных исследованиях морфологии торосов на арктических льдах и возможности моделирования процессов торосения // Тр. ААНИИ. 1974. Т. 316. С. 70–76.
- Грищенко В.Д.* Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Тр. ААНИИ. 1988. Т. 401. С. 46–54.
- Грищенко В.Д.* Некоторые особенности таяния и нарастания подводной части льдов в Арктическом бассейне // Тр. ААНИИ. 1981. Т. 372. С. 123–128.
- Гудошников Ю.П., Зубакин Г.К., Наумов А.К.* Статистические характеристики элементов торосистых образований // Ледяные образования морей Западной Арктики. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 88–99.
- Зубов Н.Н.* Льды Арктики. М.: Изд-во Главсевморпути, 1945. 360 с.
- Кириллов А.А.* Учет торосистости при определении объема льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1957. Т. 2. С. 53–58.
- Макаров С.О.* «Ермак» во льдах. СПб., 1901. 507 с.
- Миронов Е.У., Клячкин С.В., Порубаев В.С.* Морфометрические характеристики гряд торосов и стамух по данным натуральных наблюдений и модельных расчетов в северо-западной части Каспийского моря // Труды 9-й межд. конф. РАО'09, 15–18 сентября 2009. СПб., 2009. Т. 1. С. 280–286.
- 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., 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 // Труды 7-й межд. конф. РАО'05, 13–15 сентября 2005 г. СПб., 2005. С. 293–298.
- 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.
- 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. № 2 (85). 2010. С. 5–15.

- Kovacs A.* On pressured sea ice // *Sea Ice, Proc. of Int. Conf. Reykjavik, 1971.* P. 276–295.
- 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 International Conference on POAC'03, Trondheim, Norway, June 16–19. 2003.* Vol. 2. P. 623–634.
- Mironov Ye.U., 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, Helsinki, 1999.* Vol. 1. P. 60–69.
- 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 International Conference on POAC'05, Potsdam, USA, June 26–30, 2005.* Vol. 1. P. 670–679.
- Morev V., Kharitonov V.* Definition of the Internal Structure of Large Ice Features by Thermal Drilling Methods // *Proc. of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, POAC '01, Ottawa, Ontario, Canada. 2001.* Vol. 3. P. 1465–1472.
- 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.
- Parmeter R., Coon M.* Model of pressure ridge formation in sea ice // *J. Geophys. Res. 1971.* Vol. 77. № 33. P. 6565–6577.
- Poplin J.P., Ralston T.D., St. Lawrence W.* A thermal ice drill for profiling thick multiyear ice // *Cold Regions Science and Technology. 1987.* Vol. 14. P. 1–11.
- Taylor Ph. L.* A Hot Water Drill for Temperate Ice // *CRREL Special Report 84–34. 1984.* P. 105–117.
- 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.

YE.U.MIRONOV, V.S.PORUBAYEV

STATISTICAL MODEL OF ICE RIDGE MORPHOMETRY IN THE SOUTHWESTERN PART OF THE KARA SEA

The work presents the characteristics of geometry and internal structure of ice ridges in the southwestern Kara Sea. Formulas of the density of probability distribution for the ice ridge characteristics are given. A model of morphometry of mean statistical ice ridge was constructed. It is shown that an ice ridge frozen into an ice floe is in the hydrostatic equilibrium not only due to the balance of its own weight and the Archimedean force, but also due to the impact of the surrounding ice floes. The ice ridge submerging value in the case of break up of the surrounding ice floes was calculated.

Keywords: the Arctic Seas, the Kara Sea, methods of ice thermal drilling, morphometry of ice ridges.