

ФОРМИРОВАНИЕ ГРЯД ТОРОСОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ И ИХ МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Миронов Е. У., Порубаев В. С.

Государственный научный центр РФ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия (199397, СПб, ул. Беринга, 38), email: mir@aari.ru; pvs@aari.ru

Рассмотрены условия формирования гряд торосов в прибрежной части Карского моря. Показано, что можно выделить две группы: торосы, подводная часть которых аппроксимируются в форме треугольника и трапеции. Приведены данные статистического анализа морфометрических характеристик гряд торосов, полученные на основе специальных экспериментальных работ. Приведены формулы плотности распределения вероятности для паруса, килья и общей толщины гряды тороса. Выполнен анализ соотношения килья/парус тороса и показано, что отношение глубины килья к высоте паруса не является константой и зависит от высоты паруса, приведено аналитическое выражение их взаимосвязи. Рассмотрены особенности внутренней структуры тороса, приведены эмпирические и теоретические распределения толщины консолидированного слоя и пористости тороса. Выполнены оценки средних значений толщины консолидированного слоя, а также пористости паруса, килья и всего тороса.

Ключевые слова: Карское море, ледяной покров, гряды торосов, морфометрия, внутренняя структура.

FORMATION OF ICE RIDGES IN THE COASTAL PART OF THE KARA SEA AND THEIR MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS

Mironov E. U., Porubayev V. S.

RF State Research Center "Arctic and Antarctic Research Institute", St. Petersburg, Russia (Bering St. 38, St. Petersburg 199397), e-mail: mir@aari.ru; pvs@aari.ru

Conditions of formation of ice ridges in the coastal part of the Kara Sea are considered. It is shown that two groups can be identified - ice ridges the underwater part of which is approximated in the form of a triangle and a trapezium. Data of statistical analysis of the morphometric characteristics of ice ridges based on special experimental studies are presented. Formulas of the probability distribution density are presented for the ice ridge sail, keel and total thickness are given. An analysis of the ice ridge keel/sail ratio was performed and it is shown that the keel depth-to-sail height ratio is not a constant and depends on the sail height. An analytical expression of their relationship is given. The peculiarities of ice ridge internal structure are considered and the empirical and theoretical distributions of the consolidated layer thickness and ice ridge porosity are presented. Estimates of the average values of the consolidated layer thickness and of porosity of sail, keel and the entire ice ridge are performed.

Key words: the Kara Sea, ice conditions, ice features, morphometry of ice ridges, ice ridge internal structure.

Введение

Активное освоение углеводородных месторождений на шельфе замерзающих морей, начатое в 1990-е годы, 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 [1, 7].

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. Во время

проходки скважин, по данным о скорости бурения, визуально определялись характеристики льда и фиксировались встречающиеся пустоты.

В конце 1990-х годов в ААНИИ была разработана, а в 2001 г. изготовлена термобуровая установка бурения льда горячей водой с записью параметров бурения на компьютер [6]. 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. Такая установка с 2002 по 2010 г. использовалась при проведении работ по исследованию торосов и стамух в северной части Каспийского моря, на шельфе острова Сахалин и в юго-западной части Карского моря [7, 8].

Целью исследования является обобщение экспериментальных (экспедиционных) работ, выполненных в прибрежной части Карского моря. В работе проанализировано 27 гряд торосов, исследованных в 2007–2010 гг. преимущественно в Байдарацкой губе.

Результаты исследований геометрии торосов

Гряды торосов являются естественной составной частью ледяного покрова. В арктических морях наибольшее распространение имеют торосы дробления, которые представляют собой нагромождения обломков тонких льдов над верхней и под нижней поверхностью ровных ледяных полей. Гряды торосов образуются из тонких льдов при их сжатии более толстыми льдами. Особенно сильные сжатия возникают при движении льдов с большой скоростью в сторону границы припая (неподвижного льда) и берегов. При этом эффект динамического воздействия тем больше, чем больше масса воздействующих льдов, которая определяется толщиной ледяного покрова и площадью вовлеченных в однонаправленное движение льдов.

Именно такие ситуации возникают в юго-западной части Карского моря. Вдоль полуострова Ямал распространяется узкая зона припая, вдоль него зона полыньи, состоящая из молодых льдов. При определенных синоптических ситуациях формируется однонаправленный дрейф льда перпендикулярно береговой линии и границе припая. Образуется напор большой массы льдов на припай, в результате которого тонкие льды полыньи выдавливаются и в виде огромных нагромождений обломков льдов формируют мощные гряды торосов. В отдельных случаях может формироваться барьер торосов, местами скрепленный с грунтом на глубинах до 15–20 м. При контакте тороса с грунтом их кили обламываются, в результате чего подводная часть тороса принимает трапецевидную форму.

Измерения морфометрических параметров торосов осуществлялись с использованием водяной термобуровой установки на профилях, направленных перпендикулярно гребню гряды тороса. При этом измерялись следующие параметры: длина и ширина гряды, глубина

киля, толщина тороса, границы льдов разной плотности и пустот, линейные размеры ледяных блоков, слагающих надводную часть тороса. На основе этих измеренных параметров определялись: высота паруса, границы консолидированного слоя и ее толщина, пористость или коэффициент заполнения, отношение киль/парус. Обобщенные значения измеренных геометрических параметров торосов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Геометрические параметры гряд торосов по данным измерений

Параметры	Длина гряды тороса	Ширина паруса, (w)	Высота паруса, (h)	Глубина киля, (H)	Ширина киля, (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

Из табл. 1 видно, что торосы, исследованные в прибрежной 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:

$$L = 0,98 * w + 26$$

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.

Расчеты показали, что среднее значение отношения киль/парус у торосов с треугольной формой киля равно 4,0, что превышает значение этой характеристики для торосов с трапециевидной формой киля, 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 киля, и, во многих случаях, когда кили торосов имеют треугольную форму, не удаётся фиксировать максимальную глубину киля. Поэтому, чтобы уточнить среднюю глубину киля тороса, при треугольной его форме, необходимо использовать соотношение киль/парус, полученное в случаях, когда глубина киля измерялась достаточно точно. Надежные данные по этому соотношению получены при стереофото съемке

надводной и подводной частей торосов [2], где соотношение киль парус равен 5,5. Наиболее подходящими для сравнения являются данные, приведенные в работе [3], когда максимум осадки килля тороса измерялся аквалангистами, в среднем эта величина составляет 4,6.

Среднее значение отношения киль парус, как уже указано выше, для торосов рассматриваемого района равно 4,6. Однако отношение глубины килля 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

$$H / h = 5.2h^{-0.35}$$

Возможно, это является одной из причин того, что отношение киль/парус у второй группы торосов меньше, чем в первой группе, так как их сравнительный анализ 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 килля связана с высотой паруса. Связь глубины килля с высотой паруса несколько отличается для торосов с треугольной и трапециевидной формой килля. Связь имеет вид:

$$H = 2,5 * h + 3,1 \text{ и } H = 2,8 * h + 2,7 \text{ соответственно.}$$

Коэффициент корреляции между глубиной килля и высотой паруса равен 0,81.

Для общего случая связь имеет вид:

$$H = 2,7 * h + 2,8.$$

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 килля торосов и других ледовых характеристик использована в работах [4, 9].

График плотности распределения вероятности этих характеристик для Байдарацкой 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 м друг от друга, и потому максимальные значения этих характеристик являются независимыми.

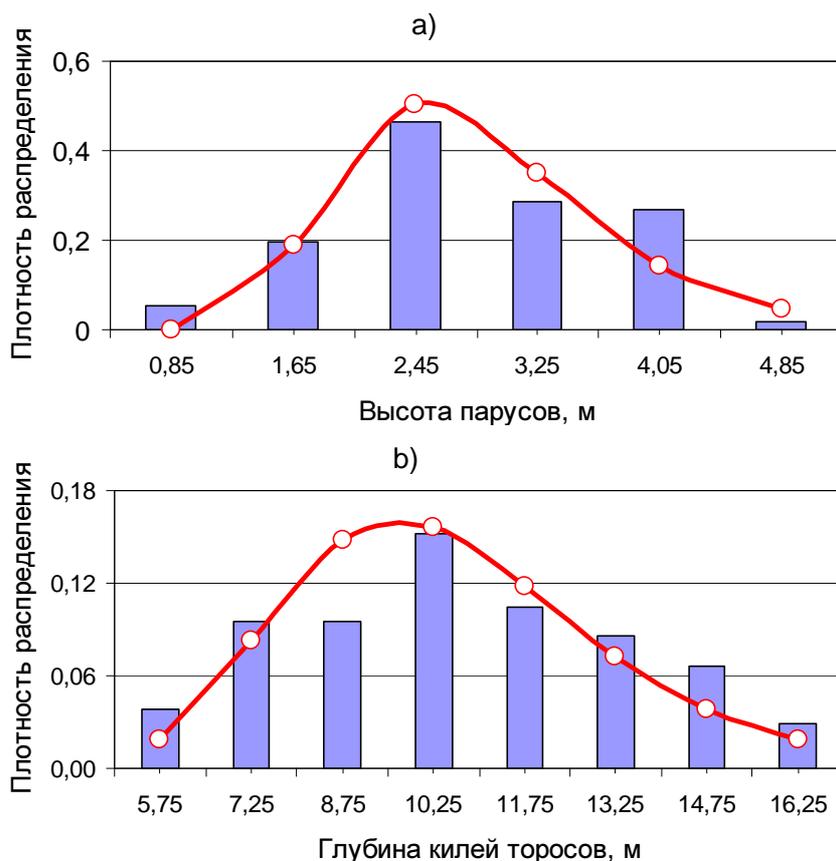


Рис. 1. Плотность распределения вероятности высоты парусов (а) и глубины килей (б) торосов (кривая – теоретические значения, гистограмма – эмпирические значения)

Результаты исследований внутренней структуры 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 работе [5]. В табл. 2 приведены значения консолидированного слоя для всего ряда наблюдений, а также для торосов с треугольной и трапециевидной формой кия.

Таблица 2. Характеристики консолидированного слоя (КС) гряд торосов с треугольной и трапециевидной формой кия

Форма кия	Треугольная			Трапециевидная			Все торосы		
	Мин. из средних	Средняя из средних	Макс. из средних	Мин. из средних	Средняя из средних	Макс. из средних	Мин. из средних	Средняя из средних	Макс. из средних
Толщина КС, м	0,98	2,06	3,32	1,77	2,63	3,63	0,98	2,52	3,63

Как видно из табл. 2, значения толщины консолидированного слоя у торосов с разной формой кия имеет 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 кии с треугольной формой кия большей частью образовались с января 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 [9]. Распределение, рассчитанное по всему ряду значений, приведено на рис. 2. При расчете плотности распределения вероятности использованы средние значения толщины консолидированного слоя по линиям.

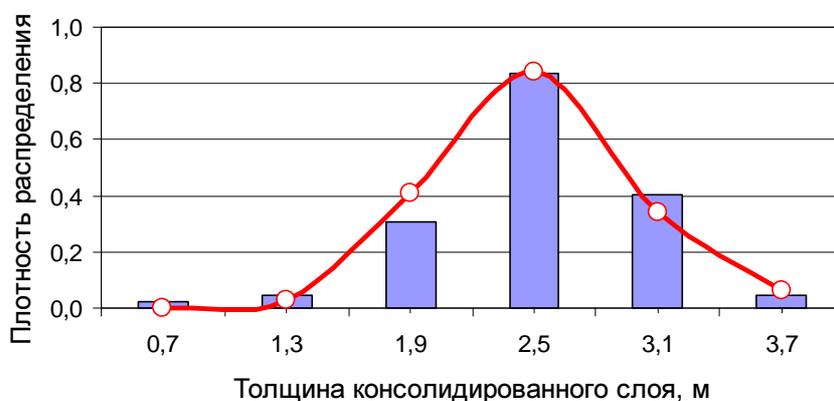


Рис. 2. Плотность распределения вероятности средней толщины консолидированного слоя гряды тороса (кривая – теоретическое распределение, гистограмма – эмпирическое распределение)

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

Пористость тороса показывает долю пустот в нём, 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 [3]. 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. 3.

Таблица 3. 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

В табл. 3 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 киле. 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 таких торосов бывает пониженной.

Выполненный анализ данных термобурения показывает, что торосы Карского моря имеют значительно большее содержание льда (меньшее количество пустот), чем представлялось ранее [3].

Заключение

В прибрежной части Карского моря наблюдаются мощные гряды торосов, образующиеся в результате выдавливания льдов заприпайной полыни под действием сильных нажимных ветров. Выполненный в 2007 – 2010 гг. комплекс ледовых исследований позволил получить новые натурные данные о морфологии гряд торосов. Выделены две группы торосов, в которых подводная часть торосов аппроксимируется треугольной и трапециевидной формой. В большинстве гряд торосов существует асимметрия положения паруса относительно киля тороса. Показано, что торосы Карского моря имеют значительно большее содержание льда (меньшее количество пустот), чем представлялось ранее.

Список литературы

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: Гидрометеоздат, 2001. – 360 с.
2. Гаврило В. П., Грищенко В. Д., Лоцилов В. С. К вопросу о натуральных исследованиях морфологии торосов на арктических льдах и возможности моделирования процессов торошения // Тр. ААНИИ. – 1974. – Т. 316. – С.70–76.
3. Грищенко В. Д. Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Тр. ААНИИ. – 1988. – Т. 401. – С.46–54.
4. 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.
5. 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.
6. Морев В. А., Морев А. В., Харитонов В. В. Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта // Патент РФ № 2153070. 2000.
7. 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.
8. 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 // Proceedings of the 17th International Conference on POAC'03. – Trondheim, Norway, June 16–19, 2003. – Vol. 2. – P. 623–634.
9. Mironov Y. U., Porubayev V. S. Structural peculiarities of ice features on the offshore of the Caspian Sea, the Sea of Okhotsk and the Pechora Sea // Proceedings of the 18th International Conference on POAC'05. – Potsdam, USA, June 26–30, 2005. – P. 425–434.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по государственному контракту № 16.515.11.5074.

Рецензенты:

Алексеев Г. В., д.геогр.н., профессор, зав.отделом взаимодействия океана и атмосферы в ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» Росгидромета, г. Санкт-Петербург.

Александров В. Ю., д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Международного центра по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена (Фонд Нансен-Центр), г. Санкт-Петербург.