

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.322:551.326

doi: 10.31857/S2076673420040059

Учёт внутренней структуры кия тороса при термодинамических расчётах эволюции консолидированного слоя

© 2020 г. О.М. Андреев

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
andoleg@aari.ru

Accounting of the internal structure of the ice hummock keel in thermodynamic calculations of the evolution of the consolidated layer

O.M. Andreev

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
andoleg@aari.ru

Received August 29, 2019 / Revised February 7, 2020 / Accepted June 10, 2020

Keywords: *Arctic regions, internal structure, hummock, porosity, ridge keels, two-dimensional thermodynamic model of ice hummock.*

Summary

Materials from long-term field observations of the internal structure of ice hummocks in the Arctic seas were analyzed. Empirical expressions describing the porosity distribution of the underwater part of a newly-formed hummock depending on the depth and width of the keel had been derived. A two-dimensional thermodynamic ice hummock model taking into account these expressions has been developed. The influence of porosity distribution on the results of thermodynamic calculations of ice hummock evolution is considered. It is shown that the porosity distribution in the ice hummock keel defines the growth of the consolidated layer to a large extent. The screening effect of the ice hummock sail on the evolution of the consolidated layer is less important. As a result, during the life-time of the ice hummock, the thickness of the consolidated layer in its central part becomes greater than at its edges. The smaller the size of the ice hummock, the faster this effect appears.

Citation: Andreev O.M. Accounting of the internal structure of the ice hummock keel in thermodynamic calculations of the evolution of the consolidated layer. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020, 60 (4): 547–556. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420040059.

Поступила 29 августа 2019 г. / После доработки 7 февраля 2020 г. / Принята к печати 10 июня 2020 г.

Ключевые слова: *Арктика, внутренняя структура, гряда торосов, двухмерная термодинамическая модель тороса, пористость, торос.*

На основании обработки данных многолетних наблюдений рассматриваются пространственная неоднородность заполнения подводной части тороса и её влияние на скорость промерзания кия тороса при термодинамическом моделировании. Учёт пространственной неоднородности заполнения кия способствует решению вопроса о распределении толщин консолидированного слоя в поперечном сечении тороса для разных этапов эволюции торосистого образования на протяжении зимнего сезона.

Введение

Одна из естественных особенностей морского ледяного покрова — торосы, представляющие собой хаотичные нагромождения обломков льдин, образующихся в результате бокового давления ледяных полей друг на друга, а также на берега и мелководные участки дна. В природных условиях возникновение торосов характерно для морских льдов небольшой толщины (молодых или однолетних), которые формиру-

ют протяжённые гряды со слабо меняющимися по их длине морфометрическими параметрами. Торосы — один из важнейших факторов, регулирующих теплообмен между океаном и атмосферой в Арктике и влияющих на природные климатические изменения [1–3]. Кроме того, именно торосы (гряды торосов) ограничивают хозяйственную деятельность и угрожают как судоходству, так и эксплуатации нефтегазодобывающих платформ и трубопроводов на шельфе арктических морей [3, 4].

Торосы имеют пористую структуру, сформированную из льда, воды и воздуха [3–5]. Часть тороса, находящаяся выше ватерлинии, называется парусом и состоит из блоков льда и воздушных пор. Количество пор характеризуется коэффициентом заполнения паруса тороса, т.е. отношением объёма, заполненного льдом, к общему объёму паруса. Часть тороса ниже ватерлинии называется килем. Киль тороса делится на две части: консолидированную, состоящую только из льда, и неуплотнённую, состоящую из блоков льда и поровых пространств, заполненных морской водой или шугой. Количество поровых пространств характеризуется коэффициентом заполнения киля тороса, т.е. отношением объёма льда к общему объёму киля тороса. В холодный сезон за счёт действия термодинамических факторов консолидированная часть в киле тороса растёт, а неуплотнённая часть эволюционирует под разрушающим термическим и динамическим влиянием окружающей водной среды.

Оценка толщины консолидированного слоя тороса и определение возможности его эволюции относятся к важнейшим задачам, решаемым в рамках современных исследований. Существуют разные подходы, основанные как на методах численного термодинамического моделирования [6–8], так и на методах математической статистики [4, 9]. Однако в полной мере вопрос об определении толщины консолидированного слоя тороса пока не решён.

Постановка проблемы

Согласно измерениям, толщина консолидированного слоя в торосах обычно распределена неравномерно в связи с особенностями заполнения внутренних частей тороса по пространству и вертикали. Усиленный рост консолидированного слоя в так называемых «ядрах консолидации», где заполнение стремится к 100%, и крайне малый рост там, где заполнение минимально, приводят к значительным отличиям толщины даже в близлежащих (метры) точках тороса. Также на рост консолидированного слоя сильно влияют морфометрические особенности надводной части тороса. Всё это создаёт определённые сложности как в интерпретации результатов натурных наблюдений, так и в разработке матема-

тических моделей. В последние годы появился ряд работ, посвящённых термодинамическому моделированию эволюции торосистых образований [6–8, 10 и др.]. Однако для всех указанных работ характерна проблема неоднозначности получаемых результатов моделирования, связанная со сложностями описания внутренней структуры тороса, в первую очередь — с определением начальной пористости (заполнения) в толще тороса по пространству. Таким образом, изначально для корректного математического моделирования и расчёта толщины консолидированного слоя необходимо провести параметризацию распределения заполнения, привязав её к известным морфометрическим параметрам тороса.

Общие морфометрические параметры торосистого образования на начальный момент времени представим в виде обобщённой идеализированной схемы (рис. 1). Связь между основными морфометрическими параметрами тороса рассматривается во многих исследованиях [11–14], где приводятся их авторские статистические зависимости друг от друга, полученные для разных морей и районов. Наиболее полный обзор подобных зависимостей дан в работе [14]. Определив таким образом морфометрические параметры тороса и оценив особенности заполнения его внутренней структуры, можно попытаться рассчитать эволюцию консолидированного слоя. Решению данного вопроса и посвящено настоящее исследование.

Как уже было отмечено, заполнение — одна из важнейших характеристик внутреннего строения торосов. В конце XX в. вопрос о закономерностях вертикальной структуры заполнения для свежих торосов (как килевой части, так и паруса), образованных из льдов разной толщины, был рассмотрен В.Д. Грищенко [15]. В указанном исследовании описана зависимость заполнения от формы и толщины блоков льда, составляющих торос. Был сформулирован вывод о том, что коэффициент заполнения на границе парус—киль максимален, уменьшаясь с высотой паруса и глубиной киля (соответственно под действием сил тяжести и плавучести). В работах Г.А. Суркова [16, 17] для свежих торосов также отмечено уменьшение заполнения киля с глубиной, причём связано это было с увеличением пространства между слагающими его блоками льда. В работе автора настоящего исследования [18] также

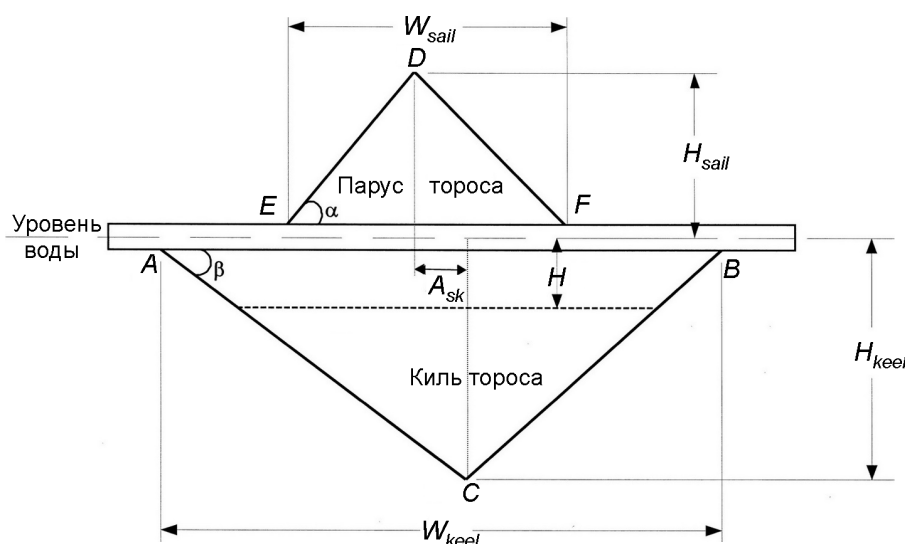


Рис. 1. Обобщённая схема тороса:

треугольник ABC – киль; EFD – парус; углы ската: α – паруса, β – киля тороса; W_{sail} – ширина паруса тороса; W_{keel} – ширина подводной части; H_{sail} – максимальная высота паруса; H_{keel} – максимальная осадка киля; A_{sk} – расстояние между точками максимальной высоты паруса и максимальной осадки киля; H – толщина консолидированного слоя тороса

Fig. 1. The typical scheme of ice hummock:

triangle ABC – a keel; EFD – a sail; slope angles: α – sails, β – keel of hummock; W_{sail} – width of the hummock sail; W_{keel} – the width of the underwater part; H_{sail} – maximum sail height; H_{keel} – maximum draft keel; A_{sk} – the distance between the points of the maximum sail height and the maximum draft of the keel; H – the thickness of the hummock consolidated layer

была изложена схожая закономерность. Из работ последних лет следует выделить исследования, выполненные для районов морей Карского и Лаптевых [19, 20]. В работе [19] на основании статистической обработки значительного объёма данных наблюдений сделан вывод о максимальном значении заполнения на уровне моря и снижении его значения с глубиной, а также описано пространственное заполнение киля тороса. Однако во всех перечисленных исследованиях не было получено обобщённой функциональной зависимости пространственного распределения заполнения от ширины и глубины киля.

Исходные данные и методика исследования

Исходными данными для проведения настоящего анализа выбраны материалы экспедиционных исследований торосистых образований, выполненных в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (лаборатория «Арктик-шельф») в юго- и северо-восточной частях Баренцева моря с 2001 по 2007 г., в южной части Карского моря (2010 г.), а также в Обской губе с 2011 по 2017 г. Обычно объектами экспе-

диционных работ становились наиболее мощные (для района выполнения исследований) однолетние торосистые образования, на которых выполняли комплекс морфометрических, физико-механических и теплофизических наблюдений.

Внутренняя структура торосистых образований исследована с помощью сквозного вертикального шнекового бурения в выбранных точках створов, разбитых на определённом расстоянии друг от друга и покрывающих торосистое образование индивидуальной сеткой с максимальным учётом всех морфометрических особенностей исследуемого тороса. В ходе буровых работ оператор фиксировал три состояния внутренней толщи торосистого образования: твёрдый лёд, провал (воздух, вода) или шуга. Запись наблюдений включала в себя глубину бурения с указанием вертикальных координат провалов. Одновременно выполняли геодезические работы с топографической привязкой каждой точки исследуемого образования.

Поскольку в отличие от работы [18] в данном исследовании сделана попытка оценить пространственное распределение заполнения киля тороса, в качестве критерия отбора точек для дальнейшего анализа было выбрано двукратное превышение глубины киля над сред-

ней толщиной блоков льда, составляющих торос. Это гарантированно обеспечивало нахождение точки в толще тороса. Следующий шаг – исключение точек наблюдений на стамухах, поскольку киль стамух в результате взаимодействия с грунтом подвержен уплотнению, которое приводит к изменению вертикальной структуры заполнения. Заключительный критерий для дальнейшего отбора точек – отсутствие ярко выраженного консолидированного слоя, равного или превышающего толщину окружающего ровного льда. Соответствие указанным критериям отбора данных позволило проанализировать 836 точек из всего используемого массива наблюдений – 3847 точек с записями.

Для каждой отобранной точки проведена процедура обезразмеривания и разбиения кия тороса на десять равных слоёв по вертикали. Далее записи анализировали исходя из двух состояний среды – лёд или провал (жидкая фаза, шуга) – и получали процентное содержание провалов (пор) в каждом выделенном слое. При суммировании всех записей получено среднее вертикальное послойное распределение поровых пространств в киле тороса. При переходе к заполнению полученную зависимость ($R^2 = 0,87$) относительно коэффициента заполнения кия γ_2 можно переписать в следующем виде:

$$\gamma_2 = 0,6 - 0,11 \ln(\xi). \quad (1)$$

Здесь ξ – безразмерная вертикальная координата в киле тороса ($0,05 < \xi < 1,0$), где за ноль принята граница раздела парус–киль.

Из выражения (1) очевидно, что заполнение в верхней части кия тороса превосходит заполнение в нижней. Данное обстоятельство, как уже отмечалось здесь, связано с действием архимедовых сил, которые позволяют небольшим блокам или их обломкам всплывать в промежутках между крупными блоками на начальном этапе формирования тороса. Подобрав горизонтальные профили (части створов с точками бурения), перпендикулярные гребню тороса, мы провели обезразмеривание ширины тороса относительно положения максимального кия (т.е. было обезразмерено расстояние от положения максимального кия до границы тороса по горизонтальной проекции каждого горизонтального профиля). По полученному массиву точек с записями (789 точек), лежащих на таких горизон-

тальных профилях, и с учётом ранее уже обезразмеренной глубины кия получена зависимость пространственного распределения коэффициента заполнения в толще тороса в следующем виде:

$$\gamma_2 = 0,63 - 0,11 \ln(\xi) - 0,2\xi\chi, \quad (2)$$

где χ – безразмерная горизонтальная координата (меняется от 0,0 в точке максимального кия до 1,0 на границе тороса).

Выражение (2) показывает не только уменьшение заполнения по мере заглубления от границы парус–киль, но и некоторое снижение заполнения по мере смещения к границам тороса от положения максимального кия. Видимо, таким образом сказывается не только работа архимедовых сил, но и сопутствующее уменьшение количества мелких обломков льда в киле по мере удаления от зоны контакта двух льдин при торошении (т.е. зоны максимального кия и паруса), что ранее уже отмечалось в исследовании [19]. Итак, согласно выражению (2), интегральное (по вертикали) заполнение уменьшается от значения 0,74 в зоне максимального кия до значения 0,64 у границ тороса, что хорошо согласуется с результатами натурных измерений, которые описаны в работах [4, 15–17, 19, 20]. Влияние учёта полученного соотношения (2) на скорость промерзания тороса или, что более наглядно, на распределение толщины консолидированного слоя вдоль поперечного сечения тороса удобнее всего проследить с помощью двумерной термодинамической модели, которая и была разработана в процессе настоящего исследования.

Модель

Итак, в двумерном представлении система уравнений для расчёта увеличения толщины консолидированного слоя торосистого образования, покрытого слоем снега, будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{c_s \rho_s} \left(\frac{\partial \lambda_s}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial I_0}{\partial z} \right) + a_s \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{c_s \rho_s} \frac{\partial \lambda_s}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y},$$

$$h_s \geq z > h, 0 \leq y \leq Y;$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (a_i \gamma_1 + a_{air}(1 - \gamma_1)) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + (a_i \gamma_1 + a_{air}(1 - \gamma_1)) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2},$$

$$h \geq z > 0, 0 \leq y \leq Y;$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{c_i \rho_i} \frac{\partial \lambda_i}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + a_i \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{c_i \rho_i} \frac{\partial \lambda_i}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y},$$

$$0 \geq z \geq H, 0 \leq y \leq Y.$$

Граничные условия имеют вид, характерный для задач такого типа:

$$z = h_s, 0 \leq y \leq Y, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \Phi;$$

$$y = 0, h_s \geq z > h, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0;$$

$$y = Y, h_s \geq z > h, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=Y} = 0;$$

$$z = h, 0 \leq y \leq Y, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h+0} = (\lambda_i \gamma_1 + \lambda_{air}(1-\gamma_1)) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h-0};$$

$$z = h, 0 \leq y \leq Y, T(t, z_{h+0}) = T(t, z_{h-0});$$

$$y = 0, h \geq z > 0, (\lambda_i \gamma_1 + \lambda_{air}(1-\gamma_1)) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0;$$

$$y = Y, h \geq z > 0, (\lambda_i \gamma_1 + \lambda_{air}(1-\gamma_1)) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=Y} = 0;$$

$$z = 0, 0 \leq y \leq Y, (\lambda_i \gamma_1 + \lambda_{air}(1-\gamma_1)) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0+} = \lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0-};$$

$$z = 0, 0 \leq y \leq Y, T(t, z_{0+}) = T(t, z_{0-});$$

$$y = 0, 0 \geq z \geq H, \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0;$$

$$y = Y, 0 \geq z \geq H, \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=Y} = 0;$$

$$z = H, 0 \leq y \leq Y, T_z(t, H) = \Theta,$$

где γ_1 — коэффициент заполнения надводной части (паруса) тороса; h_s — толщина слоя снега на поверхности тороса; h — высота паруса тороса; H — толщина консолидированного слоя; Y — ширина тороса (в модели соответствует значению W_{keel} на рис. 1); a — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности; c — коэффициент эффективной теплоёмкости; ρ — плотность соответственно: льда i , снега s и воздуха air ; t — время; T — температура; z — вертикальная координата (направлена вниз); y — горизонтальная координата (направлена вправо); Φ — суммарный поток тепла на границе снег—атмосфера, включающий в себя коротко- и длинноволновый радиа-

ционные балансы поверхности льда и вертикальные турбулентные потоки явного и скрытого тепла; I_0 — поток коротковолновой солнечной радиации, проникающей в среду (снег); Θ — температура замерзания морской воды.

Модель реализуется на двухмерной геометрически адаптивной криволинейной расчётной сетке, позволяющей отслеживать границы слоёв. Дискретизация выполняется по локально-одномерной абсолютно устойчивой неявной схеме А.А. Самарского [21] путём расщепления по пространственным координатам и решается методом прогонки. При этом изменение толщины консолидированного слоя тороса определяется по выражению следующего вида:

$$z = H, 0 \leq y \leq Y, \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{(1-\gamma_2)} \frac{1}{L \rho_i} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} - \Phi_W, \quad (3)$$

где Φ_W — поток тепла от воды; L — эффективная теплота плавления; γ_2 — коэффициент заполнения подводной части (киля) тороса.

Из условий постановки задачи следует, что ширина тороса неизменна (с теплоизолированными границами). Толщина снежного покрова на поверхности тороса и высота паруса тороса считаются величинами заданными и описывают геометрию надводной части тороса. Глубина килля в каждой точке по ширине тороса ограничивает максимально возможную глубину промерзания тороса. Фазовый переход сосредоточен на плоском фронте внутри килля тороса (условие Стефана). При достижении глубины промерзания границы килля дальнейшее увеличение толщины консолидированного слоя происходит аналогично росту толщины ровного льда. Поток тепла от воды (при его наличии) сначала действует на неконсолидированную часть килля тороса, приводя к его таянию, и только при достижении глубины промерзания границ килля поток тепла от воды участвует в расчётах эволюции консолидированного слоя по выражению (3). Также следует иметь в виду, что в данной компоновке модели процесс таяния среды (снег, лёд) пока не был предусмотрен.

В качестве входных параметров в модели используются величины стандартных метеорологических параметров: температура и относительная влажность воздуха; скорость ветра; атмосферное давление; балл облачности. При необходимости расчёта потока тепла от воды требуются также данные о гидрологии подлёдного слоя.

Результаты моделирования

С целью демонстрации возможностей и проверки адекватности работы представленной модели (включая использование выражения для пространственной неоднородности заполнения подводной части тороса) проведены тестовые расчёты эволюции толщины консолидированного слоя для двух типов торосов (условно: малый торос и большой торос). Для этого в точке, расположенной на акватории Карского моря (в его южной части), были заданы основные морфометрические параметры для двух типов торосов (таблица), а в качестве входных данных для расчётов использованы ряды метеорологического реанализа NCEP (основные метеорологические параметры с дискретностью шесть часов) за зимний период 2017/18 г. За основу определения морфометрических параметров тороса приняты соотношения из работы [14], полученные для арктического региона. При этом за условный «большой торос» в настоящем исследовании принят торос с наиболее характерными для Арктики параметрами [11, 14], а за малый – его уменьшенная (в два раза) копия.

Отметим, что для простоты дальнейшего анализа в данных торосах точки максимального килля и максимального паруса совпадали, т.е. торосы были симметричными относительно вертикальной оси. Расчёты проводили для двух случаев: при наличии слоя снега у подошвы паруса тороса, а также при его отсутствии. Толщина слоя снега выбиралась исходя из соображений, приведённых в исследованиях [1, 3, 4]; на

Основных морфометрических параметров торосов, используемых при моделировании

Характеристики	Условный тип тороса	
	малый торос	большой торос
Максимальные вертикальные размеры, м:		
высота паруса	1,0	2,0
глубина килля	4,3	8,6
Максимальная ширина, м:		
парус	5,6	11,2
киль	14,8	29,6
Угол склона, градусы:		
парус	21	21
киль	29	29

весь период расчётов она оставалась неизменной. Величина начальной толщины консолидированного слоя тороса принята равной характерной толщине блоков (0,4 м), составляющих торосы в южной части Карского моря. Начальный профиль температуры принимался линейным по вертикали. На верхней границе снега он задавался равным температуре воздуха, на нижней границе консолидированного слоя – температуре замерзания воды. Солёность толщи тороса принималась постоянной и равной 3 ‰ для паруса и 6 ‰ для консолидированного слоя тороса. Заполнение килля определялось по выражению (2); пример полученного таким образом распределения для «большого тороса» приведён на рис. 2. Расчёты начинались (т.е. задавалась условная дата образования рассматриваемых торосов) именно со времени достижения ровным льдом (рассчитанным по модели [22]) указанной тол-



Рис. 2. Пример пространственного распределения заполнения для килля тороса

Fig. 2. The example of spatial distribution of filling for ice hummock keel

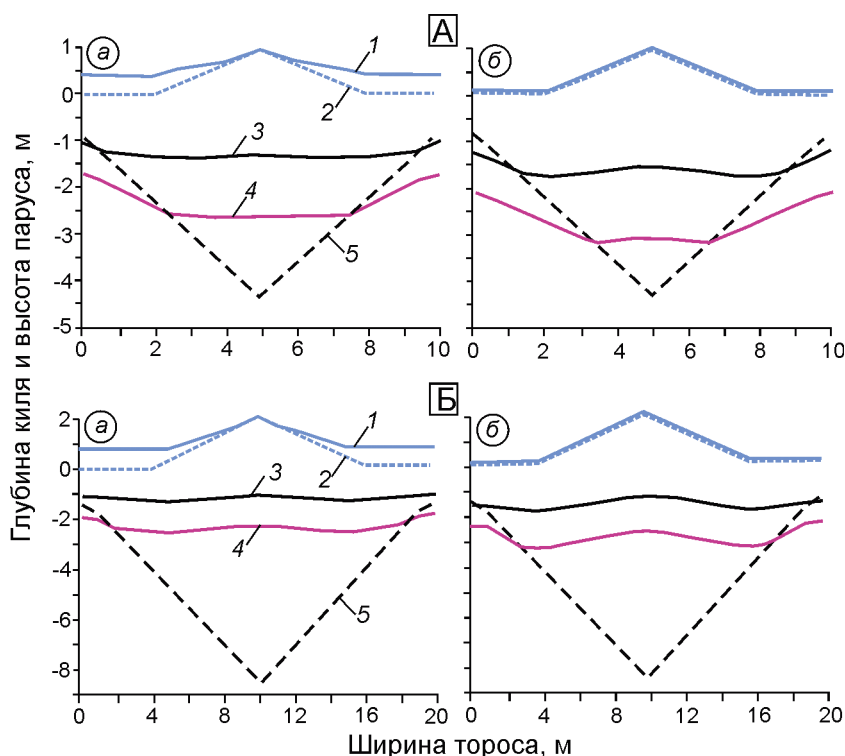


Рис. 3. Результаты расчётов толщины консолидированного слоя малого (А) и большого (Б) тороса в течение зимнего периода для района южной части Карского моря, полученные при наличии слоя снега у подошвы паруса тороса (а) и при его отсутствии (б):

1 – толщина снега; 2 – высота паруса тороса; 3 – толщина консолидированного слоя через два месяца после образования тороса; 4 – толщина консолидированного слоя на конец зимнего периода; 5 – киль тороса на момент его образования

Fig. 3. Results of calculations of a small ice (А) and a big ice (Б) hummock consolidated layer thickness during the winter period for a Kara sea southern part area, received in the presence of a snow layer at a sole of ice hummock sail (а), and also at its absence (б).

1 – snow depth; 2 – height of hummock sail; 3 – thickness of the consolidated layer in two months after hummock formation; 4 – thickness of the consolidated layer on the end of the winter period; 5 – keel a hummock at the moment of its formation

щины (0,4 м) и продолжались до момента начала таяния снега на поверхности тороса (дата окончания расчётов). Общая продолжительность расчётов составила 198 сут. (с 12 ноября по 28 мая).

Турбулентный теплообмен с атмосферой в модели вычислялся по интегральным аэродинамическим формулам [1]. Коротковолновая солнечная радиация перераспределяется в толще снега и льда в соответствии со значениями альбедо и коэффициентов пропускания и ослабления [22]. Длинноволновый радиационный баланс поверхности определяется с учётом балла общей облачности [23]. Физические свойства сред (теплоёмкость, теплопроводность, плотность, скрытая теплота плавления/кристаллизации) рассчитываются с использованием полуэмпирических зависимостей этих величин от температуры и солёности [24].

На рис. 3 представлены некоторые результаты расчётов толщины консолидированного слоя малого и большого торосов в течение зимнего периода. Из рис. 3 видно, что промерзание большого тороса (по абсолютной величине) идёт быстрее, чем малого. Это связано с используемой зависимостью вертикальной неоднородности коэффициента заполнения. При этом малый торос безусловно полностью промерзнет быстрее большого. Значения толщины консолидированного слоя, полученные как для большого тороса (3,0–3,3 м), так и для малого (2,5–3,0 м), к концу зимнего периода хорошо соотносятся с результатами наблюдений в работах [4, 13, 14, 19]. Например, в работе [14] толщина консолидированного слоя «типичного однолетнего тороса» осеннего образования (с морфометрическими параметрами, очень близ-

кими к большему из использованных в настоящем исследовании торосов) оценена как 3,1 м. Это свидетельствует об адекватности воспроизведения разработанной моделью реальных природных величин.

Дискуссия

Результаты выполненных расчётов показывают нам суть эволюционных изменений, происходящих с толщиной консолидированного слоя (определяемой вдоль поперечного сечения тороса) в течение зимнего сезона. При образовании тороса в начале зимы в первые месяцы его существования максимальная скорость промерзания (увеличение толщины консолидированного слоя) отмечается на участках киля, находящихся вне зоны паруса тороса, ближе к его границам. Однако с течением времени рост толщины консолидированного слоя на этих участках замедляется. По-видимому, это связано с ограниченностью вертикальных размеров киля на таких участках и с соответствующим снижением заполнения в нижних слоях. При достижении уровня промерзания границы киля на таких участках скорость роста толщины консолидированного слоя начинает соответствовать скорости роста ровного льда. При этом на участках, расположенных под парусом, скорость промерзания меняется незначительно. Таким образом, в определённый момент времени это может привести к выравниванию толщин консолидированного слоя под парусом и вне его, а затем толщина консолидированного слоя под парусом начнёт превосходить соответствующую толщину вне паруса. Очевидно, что при равных климатических условиях для небольших торосов рассмотренный здесь процесс выравнивания и превосходства толщины консолидированного слоя под парусом и вне его произойдёт раньше, чем для крупных.

Влияние вертикальной неоднородности заполнения наиболее значительно в начальный период, когда скорость роста консолидированного слоя может на порядок превышать скорость роста ровного льда при тех же погодных условиях. С течением времени скорость роста толщины консолидированного слоя значительно снижается. Горизонтальная неоднородность

заполнения приводит к более существенному замедлению скорости роста толщины консолидированного слоя на границах тороса по сравнению с его центральной частью. Предварительная оценка показывает, что величина этого замедления достигает 25–30%.

Настоящее исследование проводилось исходя из предположения о наличии подобия (авто-модельности) пространственного распределения коэффициента заполнения в толще подводной части сформировавшегося тороса. Полученные в ходе выполнения исследования результаты относятся к обобщённому, идеализированному торосу, встретить который (как и любой иной идеализированный объект) в реальных природных условиях вряд ли возможно. Влияние повышенного снегонакопления у подошвы паруса тороса, смещение положения максимального паруса относительно положения максимального киля, форма паруса, пространственные вариации коэффициента заполнения киля (так называемые «ядра консолидации») и паруса для условий реального тороса несомненно внесут довольно значительные корректировки в полученные результаты, но общая картина, описанная здесь, от этого сильно не изменится.

Выводы

При проведении настоящего исследования на основе имеющихся в распоряжении автора данных натурных наблюдений за внутренней структурой торосистых образований получено соотношение, обобщённо описывающее пространственное распределение коэффициента заполнения для вновь образованного арктического тороса.

Разработана двумерная термодинамическая модель тороса, позволяющая вести расчёты его эволюции с любыми вариациями как морфометрических параметров (и форм) паруса и киля тороса, так и с функционально заданными параметрами заполнения (пористости). Последним предложенная модель принципиально отличается от моделей [7, 25], основанных на вычислительных методах программного комплекса COMSOL Multiphysics. Двумерность разработанной модели даёт значительное преимущество (по сравнению с одномерными моделями) в

точности расчёта температурного поля внутри толщи торосистого образования при неоднородности задания граничных условий и неоднородности распределения заполнения, что позволяет значительно правильнее оценивать эволюцию толщины консолидированного слоя.

Рассмотрен вопрос о влиянии учёта пространственной неоднородности заполнения киля тороса на результаты термодинамических расчётов, выполненных по разработанной модели. Тестовые расчёты показали, что, несмотря на боль-

шие вертикальные размеры паруса (надводной части), соответствующее ему повышенное заполнение киля (подводной части) может приводить к усиленному промерзанию по отношению к краям тороса. Также замечено, что при равных климатических условиях толщина консолидированного слоя под парусом начинает превосходить толщину консолидированного слоя вне паруса для малого тороса раньше, чем для крупного. Все перечисленные моменты не противоречат результатам натурных наблюдений.

Литература

References

1. Морской лед. Справочное пособие / Под ред. И.Е. Фролова, В.П. Гаврило. СПб.: Гидрометеоздат, 1997. 402 с.
2. Марченко А.В. Влияние консолидации торосов на тепловые потоки из океана в атмосферу // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 150–164.
3. Ледяные образования морей западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: изд. ААНИИ, 2007. 256 с.
4. Астафьев В.Н., Сурков В.Н., Трусков П.А. Торосы и стамухи Охотского моря. СПб.: Прогресс–Погода, 1997. 184 с.
5. Hoyland K.V. Simulations of the consolidation process in first-year ice ridges // Cold Regions Science and Technology. 2002. № 34. P. 143–158.
6. Марченко А.В., Гудошников Ю.П., Зубакин Г.К., Макишас А.П. Термодинамическая консолидация торосов // Тр. ААНИИ. 2004. Т. 449. С. 64–89.
7. Shestov A.S., Marchenko A.V. Thermodynamic consolidation of ice ridge keels in water at varying freezing points // Cold Regions Science and Technology. 2016. № 121. P. 1–10.
8. Schramm J., Flato G., Curry J. Toward the modeling of enhanced basal melting in ridge keels // Journ. of Geophys. Research. 2000. V. 105. № C6. P. 14081–14092.
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 // Proc. of the 18h Intern. Conf. on POAC'05. Potsdam, USA, June 26–30, 2005. P. 425–434.
10. Андреев О.М. Термодинамическое моделирование эволюции торосистых образований в Арктическом бассейне // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 69–74.
11. Timco G.M., Burden R.P. An analysis of the shapes of sea ice ridges // Cold Regions Science and Technology. 1997. № 25. P. 65–77.
12. Lepparanta M., Lensu M., Kosloff P., Veitch B. The life story of a first-year sea ice ridge // Cold Regions Science and Technology. 1995. № 23. P. 279–290.
1. *Morskoy led. Spravochnoye posobiye*. Sea ice. Reference Guide. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1997: 402 p. [In Russian].
2. *Marchenko A.V.* Influence of hummocks consolidation to the thermal flows from the ocean to the atmosphere. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 2003, 446: 150–164. [In Russian].
3. *Ledyanye obrazovaniya morey sapadnoy Arktiki*. Ice formation in the seas of Western Arctic. Ed. G.K. Zubakin. St. Petersburg: AARI, 2007: 256 p. [In Russian].
4. *Astafiev V.N., Surkov V.N., Truskov P.A. Torosy i stamukhi Okhotskogo morya*. Ice hummocks and ground hummocks in the Okhotsk Sea. St. Petersburg: Progress–Pogoda, 1997: 184 p. [In Russian].
5. *Hoyland K.V.* Simulations of the consolidation process in first-year ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*. 2002, 34: 143–158.
6. *Marchenko A.V., Gudoshnikov Yu.P., Zubakin G.K., Maksh-tas A.P.* Thermodynamic consolidation of hummocks. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 2004, 449: 64–89. [In Russian].
7. *Shestov A.S., Marchenko A.V.* Thermodynamic consolidation of ice ridge keels in water at varying freezing points. *Cold Regions Science and Technology*. 2016, 121: 1–10.
8. *Schramm J., Flato G., Curry J.* Toward the modeling of enhanced basal melting in ridge keels. *Journ. of Geophys. Research*. 2000, 105 (C6): 14081–14092.
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. *Proc. of the 18h Intern. Conf. on POAC'05*. Potsdam, USA, June 26–30, 2005: 425–434.
10. *Andreev O.M.* Thermodynamic modeling of evolution the hummock formations in the Arctic basin. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2011, 1 (113): 69–74. [In Russian].
11. *Timco G.M., Burden R.P.* An analysis of the shapes of sea ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*. 1997, 25: 65–77.
12. *Lepparanta M., Lensu M., Kosloff P., Veitch B.* The life story of a first-year sea ice ridge. *Cold Regions Science and Technology*. 1995, 23: 279–290.

13. *Kharitonov V.V.* Internal structure of ice ridges and stamukhas based on thermal drilling data // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. № 52. P. 302–325.
14. *Strub-Klein L, Sudom D.* A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges // *Cold Regions Science and Technology*. 2012. № 22. P. 94–109.
15. *Грищенко В.Д.* Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // *Тр. ААНИИ*. 1988. Т. 401. С. 46–55.
16. *Surkov G.A.* Thickness of the consolidated layer in first-year hummocks. Proc. 16th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Ottawa, Ontario, Canada. August 12–17, 2001. P. 245–252. <http://www.poac.com/PapersOnline.html>.
17. *Surkov G.A.* Internal structure of first-year hummocks. Proc. of the 11th (2001) ISOPE. Stavanger, Norway. June 17–22, 2001. V. I. P. 796–798.
18. *Андреев О.М.* Влияние вертикальной неоднородности заполнения кия тороса на скорость его промерзания // *Лёд и Снег*. 2013. № 2 (122). С. 63–68.
19. *Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Мионов Е.У., Гузенко Р.Б., Харитонов В.В.* Особенности развития консолидированного слоя гряд торосов в морях Карском и Лаптевых // *Нефтяное хозяйство*. 2016. № 11. С. 49–54.
20. *Kharitonov V.V.* Ice ridges in landfast ice of Shokal'skogo Strait // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. № 3. P. 16–26. doi: 10.24057/2071-9388-2019-43.
21. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
22. *Андреев О.М., Иванов Б.В.* Параметризация радиационных процессов в модели ледяного покрова // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 2. С. 81–88.
23. *Makshtas A.P., Andreas E.L., Svyashchennikov P.N., Timachev V.F.* Accounting for clouds in sea ice models // *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*. 1998. V. 98-9. 39 p.
24. *Назинцев Ю.Л., Дмитраж Ж.А., Мусеев В.И.* Теплофизические свойства морского льда. Л.: изд. ЛГУ, 1988. 260 с.
25. *Marchenko A.V.* Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. V. 52. P. 278–301.
13. *Kharitonov V.V.* Internal structure of ice ridges and stamukhas based on thermal drilling data. *Cold Regions Science and Technology*. 2008, 52: 302–325.
14. *Strub-Klein L, Sudom D.* A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*. 2012, 22: 94–109.
15. *Grishenko V.D.* Morphometric characteristics of ridges keels on ices of the Arctic basin. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1988, 401: 46–55. [In Russian].
16. *Surkov G.A.* Thickness of the consolidated layer in first-year hummocks. Proc. 16th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Ottawa, Ontario, Canada. August 12–17, 2001: 245–252. <http://www.poac.com/PapersOnline.html>.
17. *Surkov G.A.* Internal Structure of First-Year Hummocks. Proc. of the 11th (2001) ISOPE. Stavanger, Norway. June 17–22, 2001, 1: 796–798.
18. *Andreev O.M.* Effect of vertical inhomogeneity of the ridge keel filling on its freezing rate. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 2 (122): 63–68. [In Russian].
19. *Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O., Mironov Ye.U., Guzenko R.B., Kharitonov V.V.* Peculiarities of the CL development of ice ridges in the Kara and Laptev Seas. *Oil Industry*. 2016, 11: 49–54.
20. *Kharitonov V.V.* Ice ridges in landfast ice of Shokal'skogo Strait. *Geography, Environment, Sustainability*. 2019, 12 (3): 16–26. doi: 10.24057/2071-9388-2019-43.
21. *Samarsky A.A.* *Teoriya raznostnykh skhem*. Theory of difference schemes. Moscow: Science, 1977: 656 p. [In Russian].
22. *Andreev O.M., Ivanov B.V.* *Parametrizatsiya radiatsionnykh protsessov v modeli ledyanogo pokrova*. Parameterization of radiation processes in the ice cover model. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2001, 2: 81–88. [In Russian].
23. *Makshtas A.P., Andreas E.L., Svyashchennikov P.N., Timachev V.F.* Accounting for clouds in sea ice models. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*. 1998, 98-9: 39 p.
24. *Nazintsev Yu.L., Dmitraz Z.A., Moiseev V.I.* *Teplofizicheskiye svoystva morskogo l'da*. Thermophysical properties of sea ice. L.: Leningrad State University Publishing House, 1988: 260 p. [In Russian].
25. *Marchenko A.V.* Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*. 2008, 52: 278–301.