

## КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

УДК 551.326.7(268)  
DOI: 10.15372/KZ20250201  
EDN: IEUAIS

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ  
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ТОРОСОВ

**В.В. Харитонов**

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия*

*E-mail: kharitonov@aari.ru*

Основное внимание в статье уделено распределению пористости неконсолидированной части различных типов торосов как сыпучей среды. Оценка пористости получена в результате обработки записей скорости термобурения торосов. Рассмотрена изменчивость пористости торосов, обусловленная в процессе торосообразования действием силы тяжести и силы Архимеда. Выявлено, что распределение пористости в парусах однолетних дрейфующих торосов и торосов в припае примерно одинаковое, а в киле распределение у торосов в припае смещено в сторону меньших значений. Пористость паруса торосов, блоки в которых более продолговатые и тонкие, выше, чем у сложенных из более толстого льда. Тенденция к уменьшению осредненной пористости паруса и киля торосов с расстоянием от поверхности льда в глубину тороса сохраняется при увеличении возраста тороса, но становится менее выраженной.

**Ключевые слова:** *двухлетний и однолетний торосы, многолетний торос, киль, парус, припай, распределение пористости.*

**Ссылка для цитирования:** Харитонов В.В. Особенности распределения пористости различных типов торосов // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 2, с. 3–15. DOI: 10.15372/KZ20250201. EDN: IEUAIS.

SPECIFIC FEATURES OF POROSITY DISTRIBUTION  
IN VARIOUS TYPES OF PRESSURE ICE RIDGES

**V.V. Kharitonov**

*Arctic and Antarctic Research Institute,  
Beringa St. 38, St. Petersburg, 199397 Russia*

*E-mail: kharitonov@aari.ru*

The main attention of the article is focused on the porosity distribution of the unconsolidated part of various types of pressure ice ridges as a granular medium. The porosity estimate was obtained by processing records of the penetration rate of thermal drilling of ice ridges. The variability of the porosity of ice ridges caused by the action of gravity and the Archimedes force during ice ridge formation is analyzed. It is shown that the porosity distribution in the sails of first-year drifting ice ridges and ice ridges in the fast ice is approximately the same, but the keel porosity in the ice ridges of the fast ice is slightly shifted towards lower values. The porosity of the sail, the blocks of which are more elongated and thinner, is higher than the porosity of the sail composed of thicker ice blocks. The tendency to a decrease in the average porosity of the sail and keel of pressure ice ridges with the distance from the ice surface deep into the ice ridge is preserved with an increase in the age of the ice ridge, but becomes less pronounced.

**Keywords:** *second-year and first-year ice ridges, multi-year ice ridge, keel, sail, fast ice, porosity distribution.*

## ВВЕДЕНИЕ

Торосы, как крупные ледяные образования, занимают в среднем 10–40 % всей площади ледяного покрова [Бородачев и др., 1994; Астафьев и др., 1997; Leppäranta, 2011]. Обломочный материал, образующийся при торошении морского льда, относится к разновидности дискретной, сыпучей

(кусковой) среды [Грищенко, 1988]. В результате сmerzания обломков между собой образуется ледяной скелет тороса со сложным строением. По возрасту торосы можно разделить на однолетние, двухлетние (пережившие летнее таяние) и многолетние. Для исследования строения торосов в

Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ) используется технология термобурения с записью скорости [Мионов и др., 2015].

Важной характеристикой внутреннего строения торосов является их пористость. Она используется в моделях термических процессов внутри тороса, в моделях взаимодействия океана и атмосферы. Это основная характеристика неконсолидированной части киля, которая определяет его механические и прочностные свойства. Низкая пористость, т. е. более плотная упаковка блоков, способствует более интенсивному росту консолидированного слоя (КС) тороса, определяя в итоге потенциал достижения им наибольшей толщины. К. Хойланд [Hoyland, 2002] выделяет два уровня пористости: макропористость и общая пористость. Макропористость определяется как отношение объема пустот в выделенной области тороса к общему объему этой области. Пустоты могут быть заполнены снегом, воздухом, шугой или водой. Общая пористость включает также пористость ровного льда, из которого сложен торос, иными словами, учитываются также микропоры в блоках льда. Обработкой записей скорости термобурения получают положение границ пустот и их размеры. В настоящей работе под пористостью понимается величина, определяемая осреднением следующей функции:

$\Theta(x, y, z) = 0$ , если в точке с координатами  $(x, y, z)$  присутствует лед,

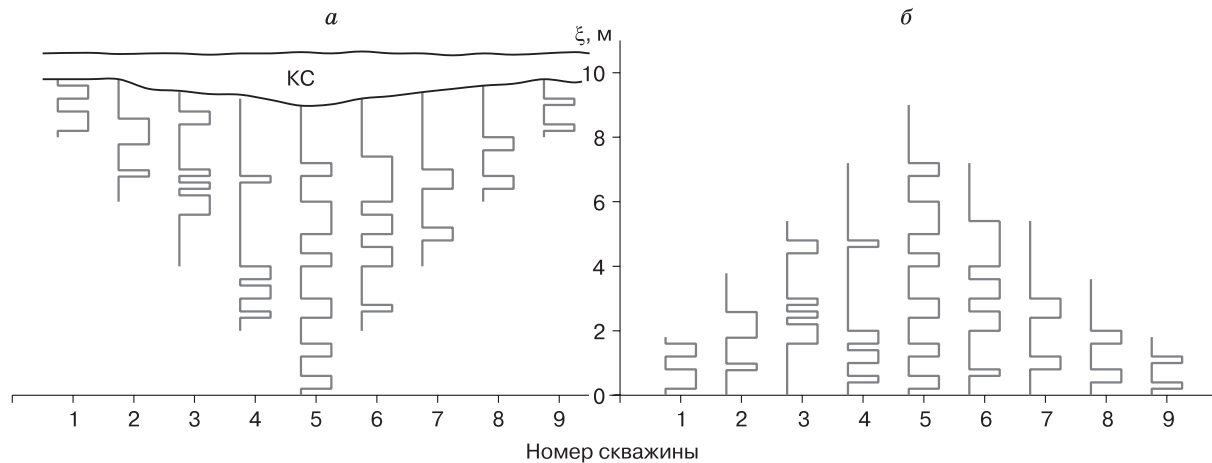
$\Theta(x, y, z) = 1$ , если лед отсутствует.

Координаты  $(x, y, z)$  ограничены внешним контуром торосистого образования. Линейная пористость находится осреднением этой функции по вертикали на заданном интервале глубины, а объемная пористость – осреднением по заданному объему. Таким образом, распределение пористости по глубине в каждой точке бурения с координатами  $(x_i, y_i)$  определяется ступенчатой функцией  $f_i(z)$ , у которой значение 0 соответствует льду, а 1 – пустоте. Пузырьки воздуха и ячейки с рассолом в блоках льда не учитываются. Определение объемной пористости тороса невозможно из-за его сложного внутреннего строения. Ее можно только оценить с помощью полученных распределений линейной пористости в разных точках. Объемная пористость равна среднему значению бесконечного количества линейных (в данном случае вертикальных) пористостей. Исследователями льдов принято осредненные значения линейной пористости считать объемной пористостью тороса [Hoyland, 2002]. Статистическая обработка индивидуальных распределений линейной пористости дает информацию об изменчивости пористости тороса по вертикали и горизонтали.

Известно, что пористость киля однолетних торосов увеличивается с глубиной [Surkov, 2001a,b], а пористость паруса – с высотой [Guzenko et al., 2020]. Сохранится ли эта тенденция у двух- и многолетних торосов? Влияет ли толщина тороса на распределение пористости? Выяснению этих вопросов посвящена данная статья. Дополнительно рассмотрено различие в вертикальном распределении пористости неконсолидированной части дрейфующих однолетних торосов и торосов в припае, а также вертикальное распределение пористости однолетнего тороса, образовавшегося на двухлетнем льду.

Для установления параметров распределения пористости осреднены индивидуальные распределения пористости во всех точках бурения для каждого тороса или группы торосов. При расчетах ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения торос часто рассматривают как частный случай сыпучей среды с широким диапазоном фракций, например, в [Алексеев и др., 2001; Болгов и др., 2007]. Он представляет собой хаотическое нагромождение блоков, находящихся в парусе под действием силы тяжести, а в киле – равнодействующей сил тяжести и Архимеда. Как известно, сыпучая среда уплотняется с глубиной. Нуль глубины соответствует поверхности среды, и далее глубина растет по направлению вниз. В рассматриваемом случае это справедливо только для паруса тороса. Поскольку киль тороса – это перевернутая сыпучая среда, глубина в этом случае будет расти вверх, а нулевая глубина – соответствовать нижней поверхности киля. Поэтому осреднение индивидуальных распределений пористости следует производить отдельно для паруса и для неконсолидированной части киля торосов.

Рассмотрим процесс осреднения на примере неконсолидированной части киля тороса. Так как нижняя поверхность киля не является плоскостью, все индивидуальные распределения пористости неконсолидированной части киля находятся в разных интервалах расстояния от ватерлинии. Следовательно, перед осреднением их необходимо выровнять по глубине. Это можно сделать, например, сдвинув распределения вниз до достижения глубины максимальной осадки киля. Схематично данный процесс проиллюстрирован на рис. 1. Серыми линиями обозначены распределения пористости неконсолидированного киля в отдельных скважинах. Высота кривых соответствует длине скважины в неконсолидированном киле. После выравнивания всех индивидуальных распределений на глубине максимальной осадки киля необходимо последовательно рассмотреть все глубины (от максимальной осадки киля до нижней границы КС) и осреднить значения ступенчатых кри-



**Рис. 1. Распределения пористости неконсолидированной части кия тороса в отдельных скважинах (а) и при сдвиге до горизонта максимальной осадки кия (б).**

КС – консолидированный слой;  $\xi$  – расстояние от нижнего края кия.

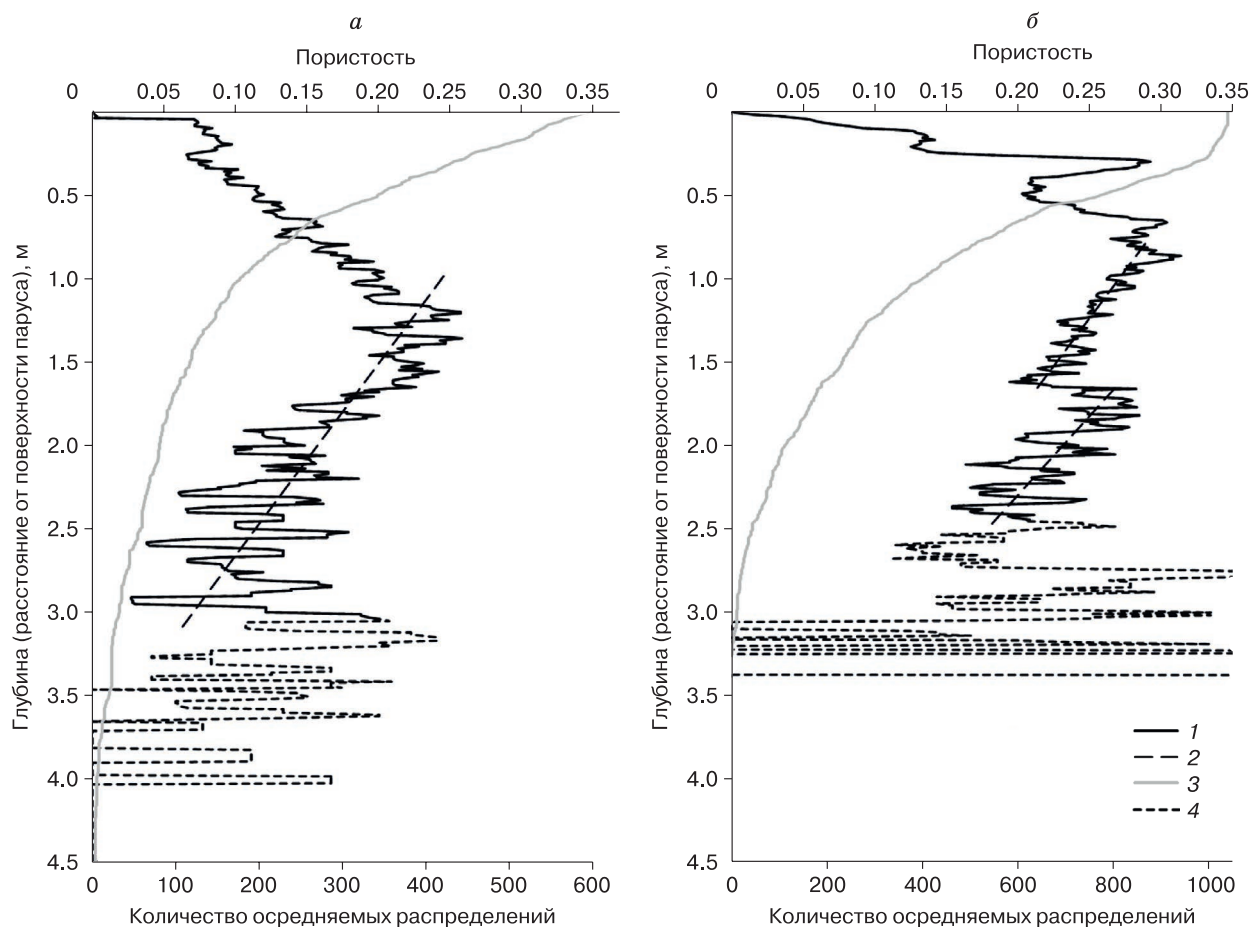
вых на выбранной глубине. Аналогичная процедура осуществляется для парусов, только сдвиг ступенчатых кривых производится вверх до максимальной высоты паруса. Воспользуемся этой методикой для оценки возможных различий в распределении пористости паруса и неконсолидированного кия различных типов торосов. Предполагается, что парус и неконсолидированная часть кия являются некой сыпучей средой с горизонтальной поверхностью в результате сдвига и выравнивания осредняемых индивидуальных распределений. Пористость этой сыпучей среды изменяется по мере удаления от поверхности. Под термином “глубина” будем понимать для паруса – расстояние от поверхности льда вниз, для неконсолидированного кия – вверх. Наравне с глубиной будем использовать термин “расстояние от края”, подразумевающий удаление от поверхности паруса (вниз) или кия (вверх).

### ДРЕЙФУЮЩИЕ ОДНОЛЕТНИЕ ТОРОСЫ ИЗ ОДНОЛЕТНЕГО ЛЬДА И ТОРОСЫ В ПРИПАЕ

На рис. 2, а приведено осредненное распределение пористости паруса тороса как сыпучей среды по глубине (расстоянию от поверхности льда) для 22 дрейфующих торосов Охотского моря, исследованных в 2006 г., и 7 торосов Байдарацкой губы, изученных в 2007 г., и на рис. 2, б – распределение для 9 торосов пролива Шокальского, исследованных в 2016–2019 гг., которые на данный момент находились в припае. Поскольку ступенчатое распределение пористости в каждой точке бурения в верхней граничной части паруса всегда начинается нулем, соответствующим льду, сред-

няя пористость здесь будет нулевой. С удалением от верхнего края паруса все чаще в отдельных скважинах будут встречаться пустоты, и средняя пористость будет повышаться. Характер изменения средней пористости на этом участке будет определяться распределением вертикального размера блоков льда на верхней границе паруса. Аппроксимация сверху ограничена глубиной, на которой пористость достигает максимума или стабилизируется, и снизу глубиной, при которой количество осредняемых значений становится меньше 5 % от общего числа значений. Кривая пористости торосов в припае аппроксимирована двумя прямыми, что представляется более подходящим. Это связано с тем, что наклон первого участка аппроксимирующей кривой для торосов в припае практически совпадает с наклоном для дрейфующих торосов, что указывает на одинаковую уплотняемость паруса обоих видов торосов.

На рис. 3 приведено осредненное распределение пористости кия дрейфующих торосов и торосов в припае по мере удаления вверх от края кия. Кривые пористости ограничены расстоянием, при котором количество осредняемых индивидуальных распределений становится меньше 5 %. Кривая пористости торосов в припае заметно смещена относительно кривой для дрейфующих торосов в сторону меньших значений. Также на рис. 3 показана разница значений осредненной пористости дрейфующих торосов и торосов в припае в наиболее информативном диапазоне. Из рис. 3 следует, что пористость неконсолидированного кия припайных торосов в среднем на 0.11 ниже, чем у дрейфующих торосов (при максимальном значении разницы 0.155).



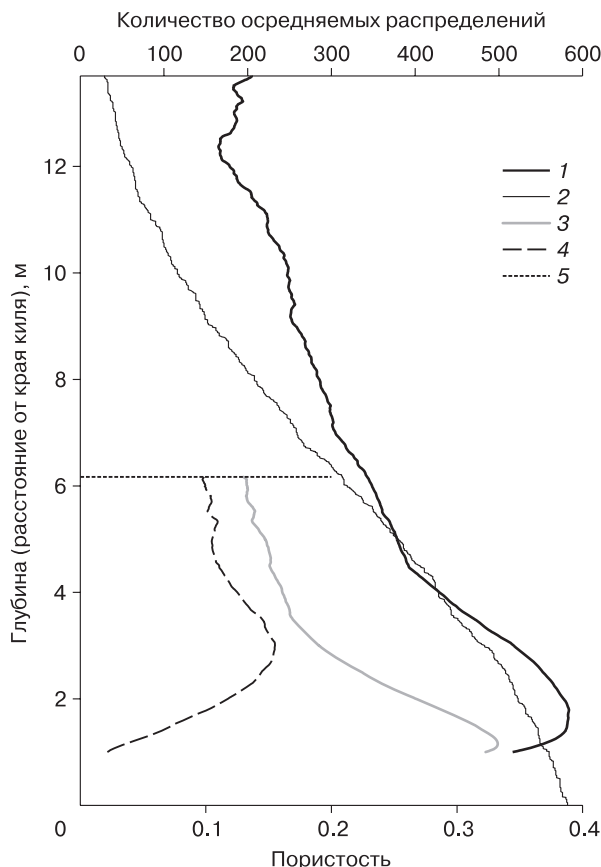
**Рис. 2. Осредненное распределение пористости паруса тороса как сыпучей среды по глубине (расстоянию от поверхности паруса).**

*a* – для дрейфующих торосов; *б* – для торосов в припае; 1 – пористость; 2 – линейная аппроксимация пористости; 3 – количество осредняемых индивидуальных распределений; 4 – участки кривой, где количество осредняемых значений меньше 5 % от общего числа.

### ОДНОЛЕТНИЙ ТОРОС ИЗ ДВУХЛЕТНЕГО ЛЬДА

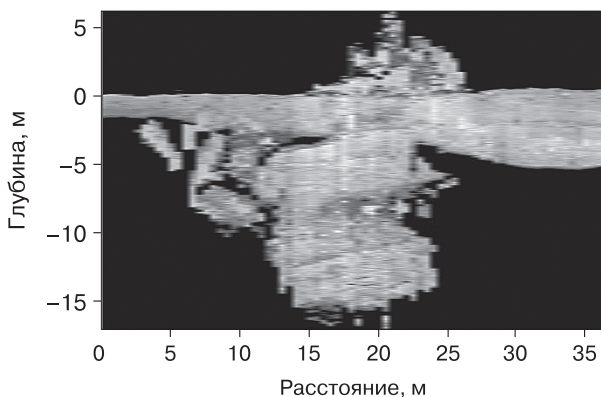
Торшение двухлетнего и многолетнего льда является весьма редким случаем, и поэтому исследование такого тороса – большая удача. Итак, однолетний торос сформировался 22.03.2011 г. на дрейфующей станции “Северный полюс – 38” в результате сжатия и торшения двухлетнего льда толщиной 1.7 м и исследовался с 16.05.2011 г. по 22.06.2011 г. На рис. 4 приведен профиль бурения тороса. Высота паруса составляла более 6 м, ширина паруса в месте бурения около 13 м. Парус тороса большей частью покрыт бесформенными кусками плотного снега, слежавшегося на подвергшемся торшению льду. По этой причине толщина блоков льда не измерялась. В правой части рис. 4 можно видеть фрагмент многолетнего тороса, на краю которого сформировался новый торос.

На первый взгляд, киль тороса представляет собой два больших ледяных образования, расположенных друг на друге и подпертых сбоку кучей отдельных блоков существенно меньших размеров. Однако между ними не просматривается сколько-нибудь заметной разделительной границы. Нижний фрагмент пересекает наклонная темная полоса, которая, по-видимому, является границей между блоками, лежащими друг на друге. Причем эта полоса практически параллельна границе раздела верхнего фрагмента и КС. Трудно сказать определенно, но, возможно, эта стопка состоит из большего числа пластин льда, чем два крупных фрагмента. На рис. 5 приведено распределение пористости паруса и неконсолидированной части киля как сыпучей среды по глубине для исследованного тороса. Генезис данного тороса неясен, однако внутреннее строение в целом

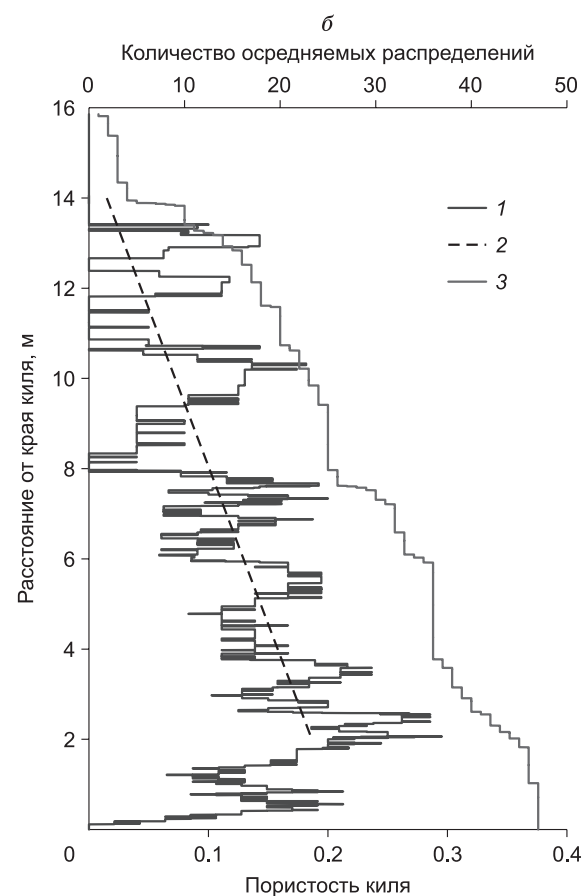
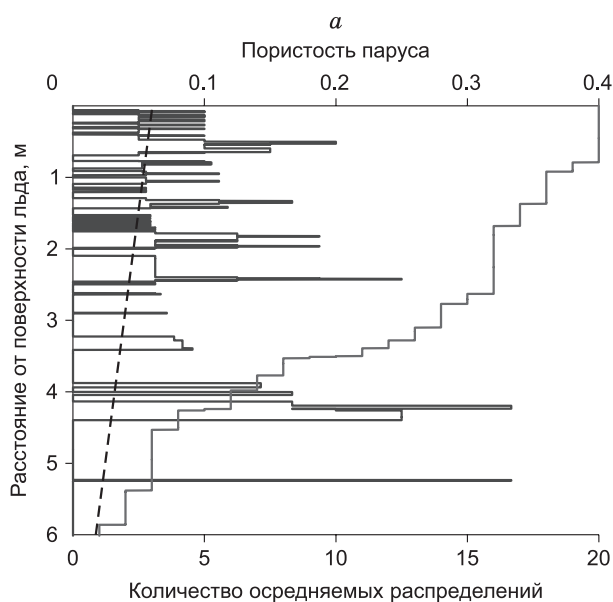


**Рис. 3.** Сглаженная осредненная пористость неконсолидированной части кила дрейфующих торосов и торосов в припае, а также относительное количество осредняемых данных.

1 – пористость кила дрейфующих торосов; 2 – количество осредняемых индивидуальных распределений пористости дрейфующих торосов; 3 – пористость кила торосов в припае; 4 – разница пористости; 5 – граничное расстояние, выше которого количество осредняемых данных торосов в припае не превышает 5 % от общего числа.

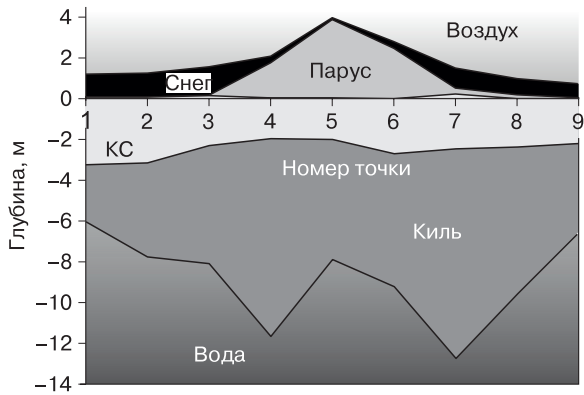


**Рис. 4.** Профиль поперечного сечения однолетнего тороса, образовавшегося на двухлетнем льду и исследованного на дрейфующей станции СП-38 в 2011 г.



**Рис. 5.** Распределение пористости однолетнего тороса, образовавшегося на двухлетнем льду, по глубине:

а – парус; б – неконсолидированная часть кила; 1 – пористость; 2 – линейная аппроксимация пористости; 3 – количество осредняемых распределений.



**Рис. 6. Профиль бурения двухлетнего тороса, исследованного 10–11 апреля 2008 г. на дрейфующей станции СП–35.**

Расстояние между точками 5 м.

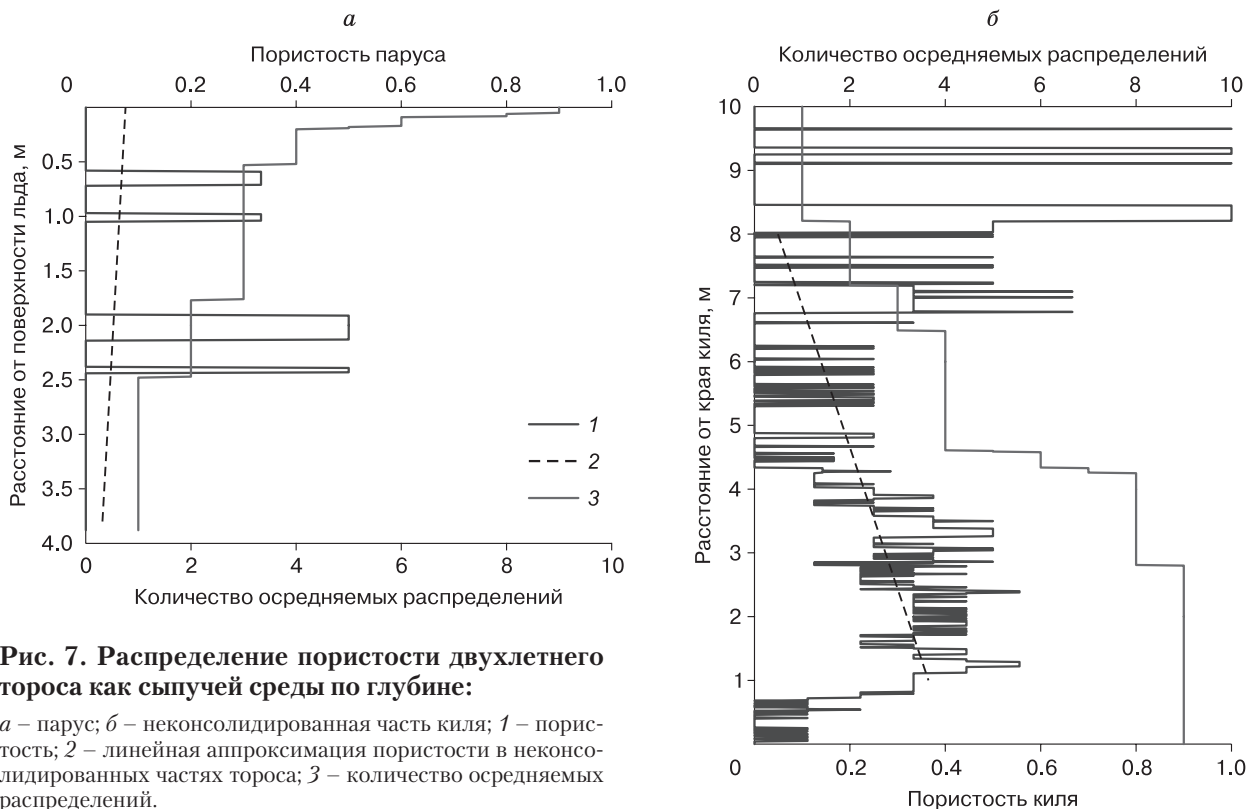
понятно, а так как данный торос является редким случаем, полезно сравнить распределение пористости этого тороса как сыпучей среды с осредненным распределением пористости других однолетних дрейфующих торосов.

### ДВУХЛЕТНИЙ ТОРОС

Двухлетний торос был исследован в 2008 г. на дрейфующей станции СП–35. На рис. 6 приведен

профиль бурения тороса. Высота паруса составила 3.88 м, осадка киль 12.74 м, средняя толщина КС – 3.05 м. Торос пережил летнее таяние, полностью занесен снегом. Возраст тороса оценен по совокупности косвенных признаков: значительная толщина КС, но при этом невысокая степень консолидации (0.24 %), низкая, но не нулевая, как у многолетних торосов, пористость паруса, выступающие фрагменты киль, в то время как у многолетних торосов наблюдается сглаженный киль. Все это указывает на вероятный возраст около двух лет. Распределение пористости неконсолидированной части тороса по глубине приведено на рис. 7.

Если у однолетних торосов за счет большого количества осредняемых индивидуальных распределений кривые пористости относительно гладкие, у двухлетнего тороса в парусе наблюдается всего несколько пустот, поэтому распределение пористости паруса представляет собой ступенчатую линию. Тем не менее, аппроксимировав ее прямой линией, можно оценить тенденцию изменения осредненной пористости паруса тороса как сыпучей среды с глубиной. В отличие от однолетних торосов, у которых осредненная пористость в верхней части паруса составляет порядка 0.30, а к глубине 3 м уменьшается до 0.15, у двухлетнего тороса, согласно линейной аппроксимации, можно наблюдать уменьшение пористости с 0.07 в верхней части до 0.04 на глубине 3 м. Причем порис-



**Рис. 7. Распределение пористости двухлетнего тороса как сыпучей среды по глубине:**

а – парус; б – неконсолидированная часть киль; 1 – пористость; 2 – линейная аппроксимация пористости в неконсолидированных частях тороса; 3 – количество осредняемых распределений.

тость в парусе нашего тороса на удалении от поверхности льда более 2.5 м – нулевая. Что касается характера изменения пористости неконсолидированного киль двухлетнего тороса как сыпучей среды, он аналогичен распределению пористости однолетних дрейфующих торосов. Это обстоятельство также косвенно подтверждает двухлетний возраст тороса. Начиная примерно с 4 м от нижней кромки киль, осредненная пористость киль двухлетнего тороса уменьшается более интенсивно, и ее распределение становится похожим на распределение пористости киль торосов в припае. К сожалению, осреднение пористости киль всего одного тороса не позволяет сделать определенные выводы о причинах такого феномена. Возможно, такое распределение является индивидуальной особенностью именно данного тороса.

### МНОГОЛЕТНИЕ ТОРОСЫ

Ниже представлены результаты исследования трех многолетних торосов, выполненного во время организации дрейфующей станции “Северный полюс – 36” в сентябре 2008 г. Торосы находились на льдине-носителе станции СП–36 с координатами 82° с.ш. и 175° в.д. На рис. 8 для примера приведен профиль бурения тороса № 3. Торосы отличались существенно сглаженными парусом и килем. Равномерная скорость бурения

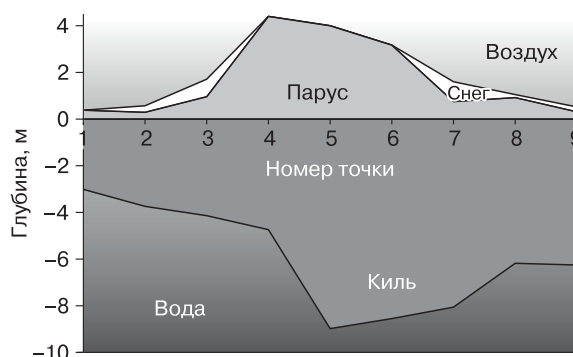


Рис. 8. Профиль термобурения, пересекающий многолетний торос № 3.

Расстояние между точками 1 и 9 составляет 38.7 м.

в большинстве скважин указывает на то, что киль торосов полностью проморожен. Соотношение парус/киль составляло 1.9–2.1, что характерно для многолетних торосов. Толщина ровного льда у торосов около 3 м.

Во время исследовательских работ в двух скважинах тороса № 2 были установлены и в заморожены две полиэтиленовые трубы с антифризом. Спустя двое суток с помощью погружного датчика были проведены измерения температуры. В сква-

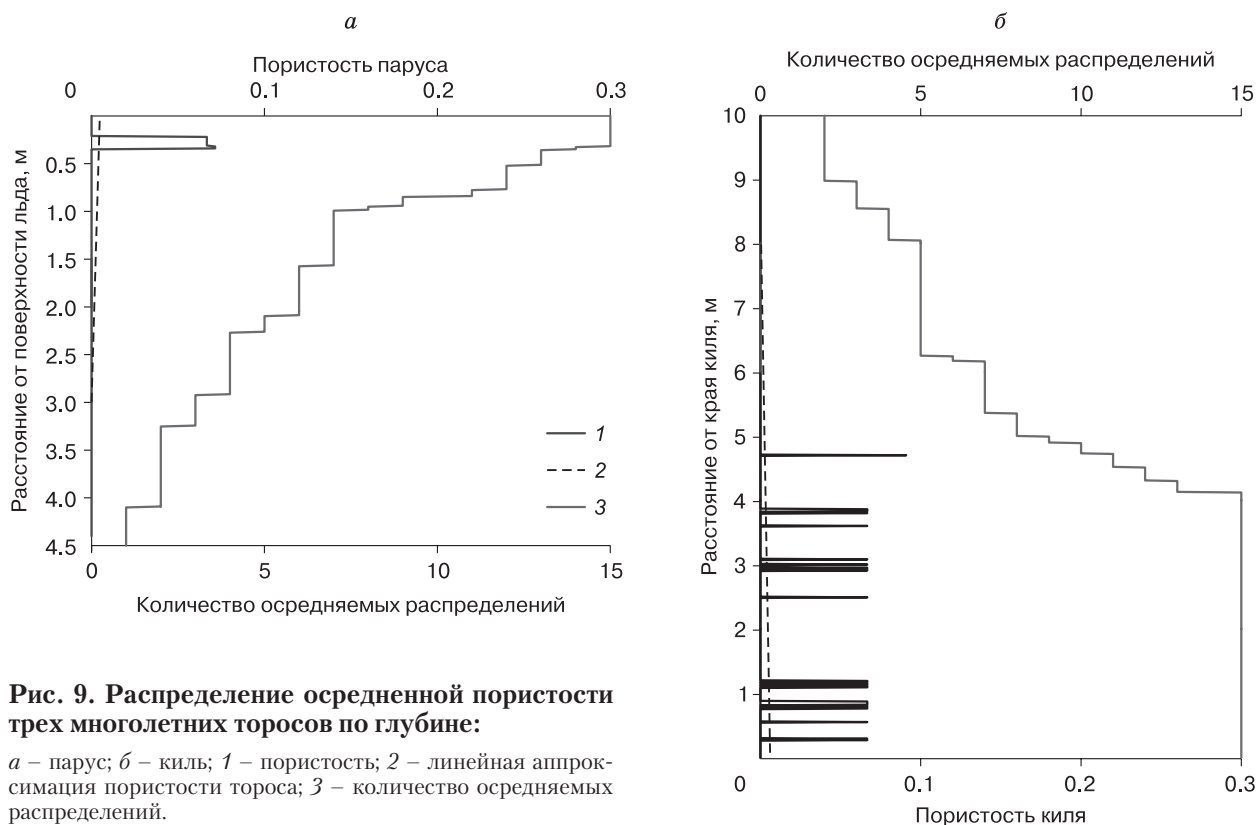


Рис. 9. Распределение осредненной пористости трех многолетних торосов по глубине:

а – парус; б – киль; 1 – пористость; 2 – линейная аппроксимация пористости тороса; 3 – количество осредняемых распределений.

жине 1 в нижней части кия тороса температура изменяется линейно и достигает температуры воды в нижней точке кия. Это указывает на то, что киль тороса в этой точке тороса полностью сморожен. В скважине 2 длина тороса была недостаточной, чтобы измерить температуру вдоль всей толщины тороса. Несмотря на это, в нижней части кия тороса изменение температуры с глубиной приобрело линейный характер, что позволило экстраполировать температуру на большую глубину. Экстраполированная температура льда кия достигает температуры воды на горизонте 8.9 м, что также указывает на большой возраст тороса. Измерений солености льда не производилось.

При бурении тороса № 1 всего в одной из скважин встретилась полость размером 0.02 м в пределах КС, заполненная рассолом. Дискретность отсчетов глубины при электротермобурении составляла 4 мм, поэтому пустоты с вертикальным размером свыше 1 см уверенно фиксировались на записи скорости бурения. В киле тороса № 2 отмечено несколько полостей, средний размер которых не превышает 0.03 м. Пористость кия тороса № 3 равна нулю. В целом можно констатировать, что общая пористость исследованных торосов практически нулевая, что характерно для многолетних торосов.

Распределение осредненной пористости трех многолетних торосов по глубине приведено на рис. 9. В осреднении участвуют 15 индивидуальных распределений пористости.

### СРАВНЕНИЕ ПОРИСТОСТИ ПАРУСА ПЛАСТИНЧАТЫХ И ГЛЫБОВЫХ ТОРОСОВ

В апреле–мае 2019 г. в проливе Шокальского (Северная Земля) были исследованы морфологические характеристики трех однолетних торосов с помощью водяного термобурения с записью ско-

рости. Скважины бурились вдоль поперечного сечения гряды с интервалом 0.25 м. На рис. 10 приведен профиль поперечного сечения одного из торосов, который имеет три гребня, сложенных из льда разного возраста с заметно различающейся толщиной. Рассмотрим средний и правый гребень. Мода толщины блоков среднего гребня составила 0.14 м, а правого гребня – 0.55 м. Среднее отношение длина/толщина блока составило в среднем 5.9 и 5.2 соответственно. Для определенности назовем торос, сложенный из тонких и продолговатых блоков, пластинчатым (такое определение иногда встречается у исследователей\*), а из толстых и коротких – глыбовым. Термин “глыбовый” предложен К.П. Тышко [2009]. Таким образом, средний гребень соответствует пластинчатому торосу, а правый – глыбовому. На рис. 11 представлена совместная диаграмма изменения осредненной пористости паруса пластинчатого и глыбового торосов на примере рассматриваемого тороса. В осреднении были задействованы 21 скважина пластинчатого гребня и 28 скважин – глыбового.

Далее рассмотрим различие в распределении пористости пластинчатых и глыбовых торосов на примере торосов, исследованных автором в разные годы в арктических морях. Для этого выделим в первую группу торосы, в парусе которых модальное значение толщины блоков меньше 0.45 м, а соотношение длина/толщина блоков больше 4. Во вторую группу поместим торосы, у которых модальное значение толщины составляет 0.50–0.85 м, а соотношение длина/толщина блоков 3 и менее. Всего в первой группе получилось 12 торосов, во второй – 19. На рис. 12 представлена совместная диаграмма изменения осредненной пористости паруса пластинчатых и глыбовых торосов. В осреднении были задействованы 160 скважин пластинчатого гребня и 295 скважин – глыбового.

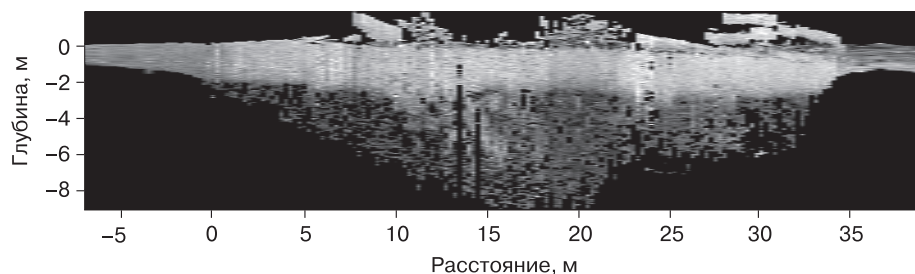
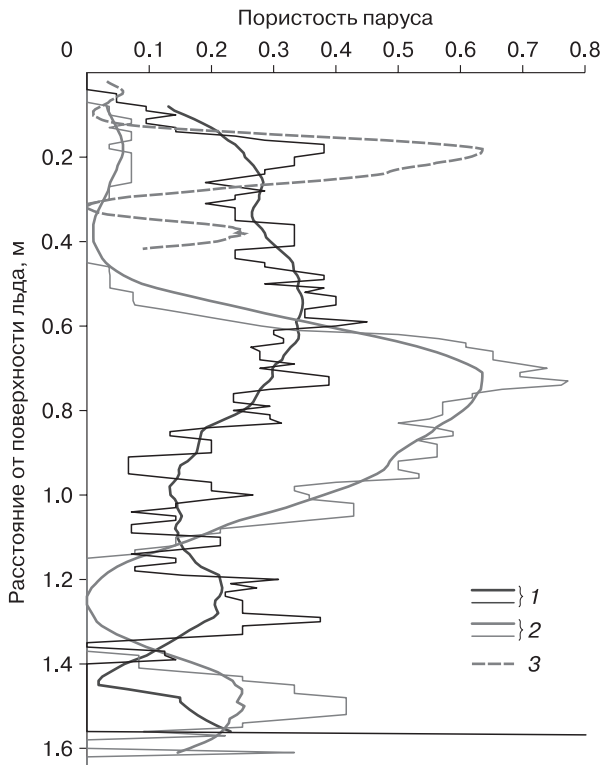


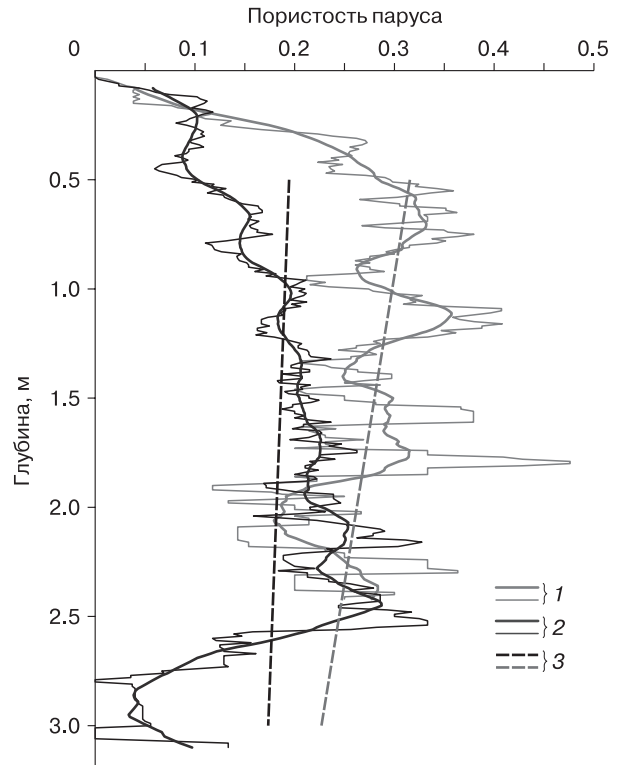
Рис. 10. Профиль поперечного сечения тороса, исследованного в 2019 г. в припае пролива Шокальского.

\* Личное сообщение Р.А. Виноградова (2024 г.).



**Рис. 11. Распределение осредненной пористости паруса пластинчатого (среднего) и глыбового (правого) гребня тороса, представленного на рис. 10.**

1 – пластинчатый; 2 – глыбовый торос. Линия 3 пояснена в тексте. Жирными линиями показаны сглаженные кривые, окно сглаживания 0.2 м.



**Рис. 12. Распределение осредненной пористости паруса пластинчатых и глыбовых торосов.**

1 – пластинчатые; 2 – глыбовые; 3 – линейные аппроксимации. Жирными линиями показаны сглаженные кривые, окно сглаживания 0.2 м. Кривые ограничены глубиной, при которой количество осредняемых индивидуальных распределений становится меньше 5 % от первоначального числа.

## АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Осредненные морфометрические характеристики рассматриваемых типов торосов приведены в таблице. На рис. 13, 14 представлены объединенные графики изменения осредненной пористости паруса и килля с удалением от поверхности льда внутрь тороса. Зависимости представлены в виде сглаженных или аппроксимирующих линий.

В.Д. Грищенко [1988] рассматривал вопрос распределения коэффициента заполнения, т. е. величины, противоположной пористости, по вертикали в свежих торосах. Он привел график коэффициента заполнения в зависимости от формы элементов сыпучей (кусовой) среды и сделал вывод о том, что коэффициент заполнения в центральной части гряды тороса (с центром на уровне моря) на 0.1–0.2 выше, чем в ее вершинной и килевой частях. В этой же работе данное явление связывается с действием сил тяжести и плавучести, способствующих концентрации и последующему уплотнению мелких обломков и тертого льда в

центральной части гряды. Г.А. Сурков также отмечал увеличение пористости килля с глубиной в однолетних торосах [Surkov, 2001a,b]. Он констатировал, что вертикальные размеры пустот между блоками льда увеличиваются с глубиной, а размеры самих блоков не меняются. Норвежские ученые исследовали строение тороса в Баренцевом море в 2002 г. [Bonnemaire et al., 2003]. По их данным, пористость в торосе изменялась с глубиной, ниже КС увеличиваясь с 0.2 до 0.5, а наибольшие по вертикальному размеру пустоты были сосредоточены в нижней части килля. Авторы отмечают, что чем ближе к уровню моря, тем более компактно сложены блоки в торосе, и связывают это также с положительной плавучестью льда.

В работе М.Н. Скачкова [Олейников, Скачков, 2011] рассмотрены вопросы уплотнения сыпучей среды под действием силы тяжести, а предложенные модели сопоставлены с экспериментальными данными по горным породам и снегу. Согласно приведенным в статье рассуждениям, происходит уменьшение пористости сыпучей среды с глуби-

## Морфометрические характеристики торосов

Характеристика	I	II	III	IV	V
Количество торосов	29	9	1	1	3
Максимальная толщина льда, м	23.8	13.3	22.95	13.42	14.02
Средняя толщина льда, м	8.6	6.9	10.56	9.86	8.50
Максимальная высота паруса, м	5.2	3.4	6.10	3.88	4.40
Средняя высота паруса, м	1.1	1.3	2.96	1.02	1.65
Средняя ширина паруса, м	21	14	13	19	24
Максимальная осадка киля, м	23.0	10.3	17.08	12.74	11.81
Средняя осадка киля, м	7.7	5.4	9.40	8.83	6.86
Средняя ширина киля, м	46	30	23	–	–
Средний угол ската паруса, град	18*	40.2	37/59**	20.1	21.7
Средний угол ската киля, град	25*	38.4	48/78**	31.9	–
Средняя толщина КС, м	1.1	2.6	1.8	3.1	6.2
Средняя толщина ровного льда вблизи тороса, м	0.7	1.5	1.7	–	3.1
Средняя пористость паруса	0.13	0.22	0.04	0.06	0
Средняя пористость неконсолидированного киля	0.30	0.21	0.12	0.22	0
Общая пористость тороса	0.24	0.14	0.09	0.18	0
Соотношение максимальный киль / максимальный парус	4.5	3.2	2.8	3.3	3.1
Соотношение средняя толщина КС / средняя толщина тороса	0.15	0.52	0.17	0.24	0.73
Соотношение средняя толщина КС / средняя толщина ровного льда	1.57	1.59	1.06	–	2.01
Средняя толщина блоков в парусе тороса, м	0.51	0.33	–	–	–

Примечание. I – дрейфующие однолетние торосы из однолетнего льда; II – однолетние торосы из однолетнего льда в припае; III – однолетний торос из двухлетнего льда; IV – двухлетний торос; V – многолетние торосы.

\* Для торосов Байдарцкой губы.

\*\* Левый и правый склон.

ной за счет повышения давления. Как уже отмечалось, торос – частный случай сыпучей среды с широким диапазоном фракций. Представленные на рисунках результаты вполне согласуются с выводами модели М.Н. Скачкова: средняя пористость неконсолидированной части тороса уменьшается по направлению к центру тороса. Уплотнение тороса происходит в основном во время его формирования и продолжается в меньшей степени в течение дальнейшего его существования. Средняя пористость в центральной части тороса меньше, чем на периферии, где нет такого сильного давления большой массы обломков льда.

У торосов в припае пористость неконсолидированной части киля в среднем ниже на 0.09, чем у дрейфующих торосов. В области киля, которая располагается на расстоянии менее 6 м от его края, эта разница в среднем составляет 0.114. Подробное обсуждение этого феномена приведено в работе [Харитонов, Андреев, 2022].

Сила тяжести в несколько раз больше, чем равнодействующая сил тяжести и Архимеда. Характер изменения пористости сыпучей среды под действием силы тяжести в парусе и равнодействующей сил тяжести и Архимеда в киле будет отличаться смещением всей кривой пористости паруса в сторону меньших значений.

К сожалению, исследован только один торос, образовавшийся на двухлетнем льду. Из рис. 13, 14 можно заключить, что распределение пористости такого тороса сходно с распределением двухлетнего тороса, а распределение пористости киля близко к распределению в припайных торосах. Однако можно предположить, что такое распределение обусловлено не консолидацией киля подледными течениями и не уплотнением паруса вследствие летних процессов термометаморфизма, а наличием крупных блоков взломанного толстого льда, которые вносят вклад в низкую пористость паруса и неконсолидированного киля.

Кили некоторых двухлетних торосов, изученных норвежскими исследователями в 2006–2008 гг., были полностью консолидированы [Hoyland et al., 2008; Strub-Klein et al., 2009]. Однако следует иметь в виду, что это были небольшие ледяные гряды, поскольку их кили составляли в среднем 3.7 м и не более 8 м. По данным работы [Strub-Klein et al., 2009], средняя общая пористость двухлетних торосов составляет 0.11. За счет наличия значительного неконсолидированного киля средняя пористость нашего двухлетнего тороса выше и составляет 0.18.

Общеизвестно, что пористость многолетних торосов практически нулевая. Несколько неболь-

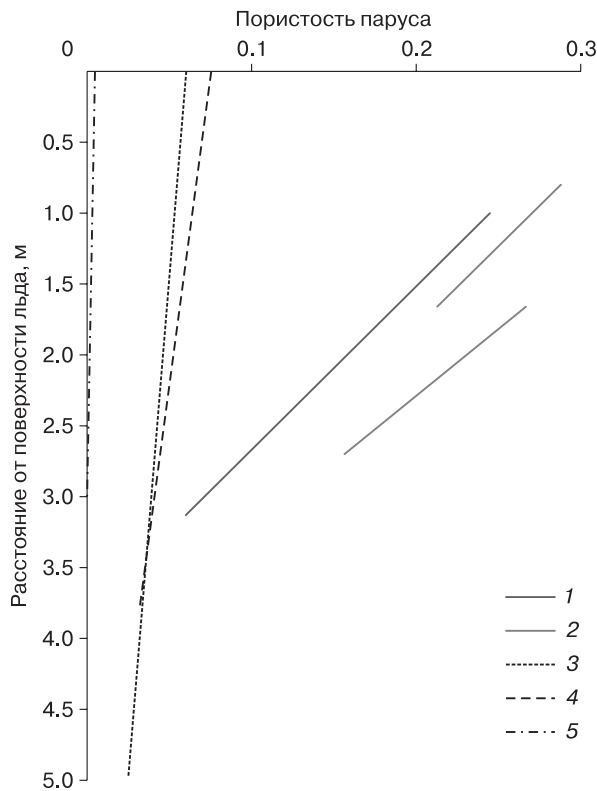


Рис. 13. Изменение осредненной пористости паруса различных типов торосов с глубиной.

1 – дрейфующие; 2 – в припае; 3 – однолетний на двухлетнем льду; 4 – двухлетний; 5 – многолетние.

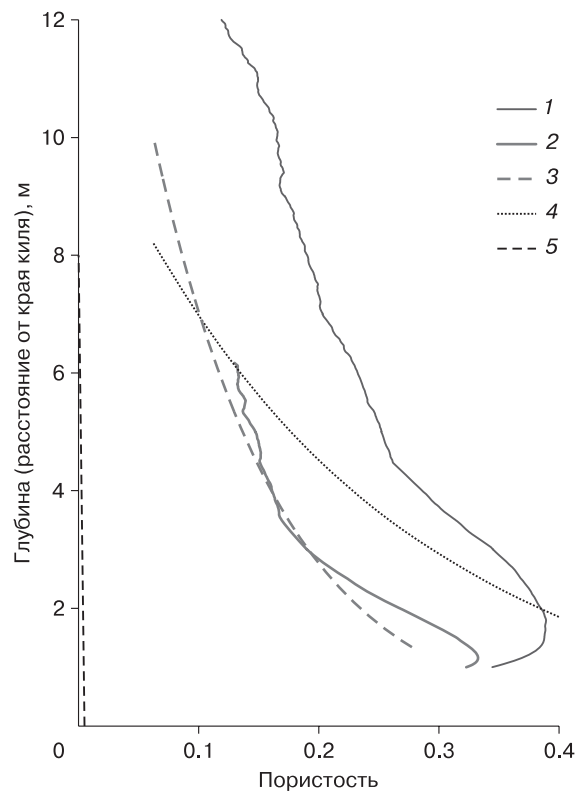


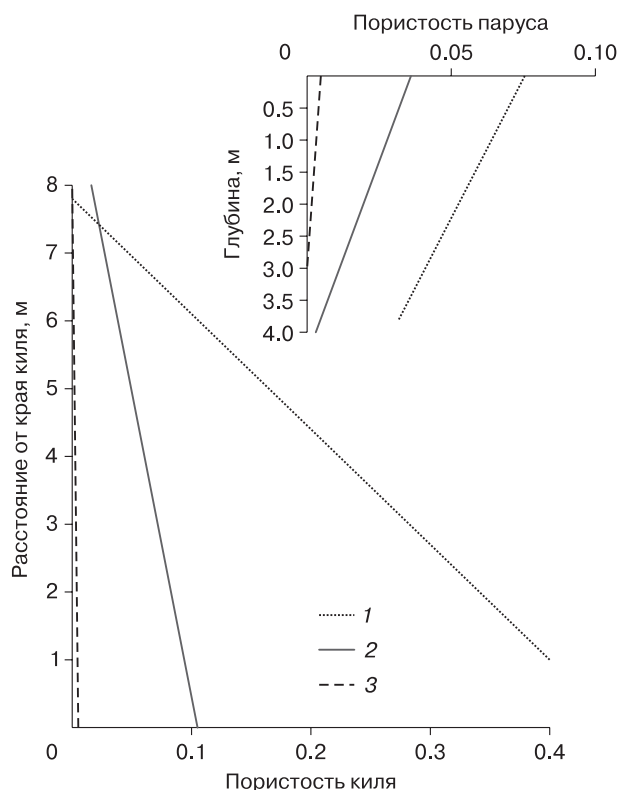
Рис. 14. Изменение осредненной пористости кия различных типов торосов с удалением от нижней поверхности кия.

1 – дрейфующие; 2 – в припае; 3 – однолетний на двухлетнем льду; 4 – двухлетний; 5 – многолетние.

ших каверн, обнаруженных при бурении, подтверждают общую тенденцию уменьшения средней пористости по мере удаления от края паруса и кия в глубь тороса. В работе [Гузенко и др., 2020] приведены результаты исследования внутреннего строения многолетнего тороса. По мнению авторов работы, возраст тороса составляет 3–4 года. На рис. 15 приведены аппроксимирующие прямые пористости паруса и кия этого тороса, построенные по данным [Гузенко и др., 2020]. Они располагаются между линиями для двух- и многолетних торосов. График подтверждает сохранение тенденции к постепенному уменьшению пористости с расстоянием от края паруса и кия тороса.

При всем видимом различии в распределении пористости пластинчатого и глыбового торосов (см. рис. 11) средняя пористость их парусов практически одинакова и составляет 0,211 и 0,216 соответственно. Пористость паруса пластинчатого тороса распределена более равномерно по глубине, при этом после небольшого увеличения пористости в районе 0,5 м с нарастанием глубины наблюдается постепенное уменьшение пористости, обусловленное уплотнением обломков льда под дей-

ствием силы тяжести. Как видно на рис. 10 (правый парус), за счет большой толщины блоков вначале пористость по мере заглубления внутрь паруса практически нулевая. При достижении глубины, сравнимой с толщиной блоков, в скважинах начинают появляться пустоты, и пористость резко повышается до максимума 0,773. При дальнейшем увеличении глубины пустоты заканчиваются, а пористость уменьшается до нуля. Затем картина повторяется, но пик пористости уже незначительный (до 0,417), что также указывает на уменьшение средней пористости из-за уплотнения обломков льда. Исходя из упомянутых выше значений мод распределений толщины блоков в рассматриваемых парусах, средняя толщина блоков в правом парусе примерно в 4 раза больше, чем в среднем парусе. Если сжать шкалу глубины распределения пористости правого гребня в 4 раза и нанести полученное распределение на график, получим кривую 3 на рис. 11. Она хорошо коррелирует с кривой 1 распределения пористости пластинчатого тороса (коэффициент корреляции 0,69). Таким образом, кажущееся различие в распределении пористости правого и среднего парус-



**Рис. 15.** Изменение осредненной пористости паруса и кия многолетних торосов.

1 – двухлетний; 2 – трех-четырёхлетний [Гузенко и др., 2020]; 3 – многолетние.

сов обусловлено масштабным эффектом. С большой долей вероятности можно заключить, что в обоих случаях наблюдается одинаковая закономерность уплотнения сыпучей среды под действием силы тяжести.

Несколько иная картина наблюдается в распределении пористости пластинчатых и глыбовых торосов арктических морей (см. рис. 12). Если распределение пористости пластинчатых торосов соответствует предлагаемой концепции уплотнения паруса торосов, то для глыбовых торосов распределение показывает довольно продолжительную тенденцию постепенного нарастания осредненной пористости (до глубины 2.4 м) и только затем – резкое уменьшение пористости. Это связано в основном с тем, что в скважинах в парусах глыбовых торосов наблюдается большое количество участков льда с вертикальными размерами до 2 м, в среднем около 1 м. Вертикальный размер пустот составляет 0.2–0.5 м. Если рассмотреть распределение длины участков «блок + пустота», то она колеблется от 0.8 до 2.7 м, в среднем 1.3–1.4 м. Наибольших значений осредненная пористость (т. е. вероятность наличия пустоты) достигает в диапазоне глубины 2.0–2.6 м. Этот диапазон глубины

примерно соответствует расположению второй по счету пустоты, если считать от поверхности паруса. При дальнейшем увеличении глубины вероятность наличия пустоты резко уменьшается, поскольку на этой глубине в большинстве скважин располагается третий блок льда. В целом линейная аппроксимация пористости на соответствующем участке глубин также показывает тенденцию к уменьшению, хотя и с меньшей интенсивностью по сравнению с пластинчатыми торосами. До глубины 2 м средняя пористость паруса пластинчатых торосов превышает пористость блоковых торосов примерно на 0.1, но с увеличением глубины средние значения пористости сравниваются. Можно заключить, что распределение пористости зависит от толщины торосающегося льда при сохранении общих тенденций. По данным автора, средняя высота паруса арктических торосов составляет около 3 м, а поперечное сечение паруса в основном имеет треугольную форму. Точки на поперечном сечении паруса, расположенные на расстоянии менее 2 м от поверхности паруса, будут образовывать массив, занимающий большую часть площади поперечного сечения. Поэтому в целом пористость паруса пластинчатых торосов, блоки в которых более продолговатые и тонкие, выше глыбовых, сложенных из более толстого льда. Бесспорно, требуется накопление экспериментальных данных для статистической обеспеченности и дальнейшее изучение этого вопроса.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрено распределение пористости неконсолидированной части торосов как некоей сыпучей среды по глубине. Основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1. Поскольку эта сыпучая среда и в парусе, и в киле на нулевой глубине всегда начинается льдом, пористость в граничной части нулевая. С удалением от верхней поверхности паруса вниз и от нижней поверхности кия вверх все чаще в отдельных скважинах будут встречаться пустоты и средняя пористость будет повышаться. Достигнув максимальных значений на некоторой глубине, средняя пористость и паруса, и кия начинает понижаться по направлению к ватерлинии.

2. Распределение пористости зависит от толщины торосающегося льда при сохранении общих тенденций. Пористость паруса пластинчатых торосов с более продолговатыми и тонкими блоками выше, чем глыбовых, которые сложены из более толстого льда.

3. Тенденция к уменьшению пористости с расстоянием от края тороса вглубь сохраняется с возрастом, но становится менее выраженной.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках плановой научной тематики ФГБУ «АНИИ» по теме 5.1.5 НИТР (2020–2024 гг.) Росгидромета.

## Литература

- Алексеев Ю.Н.** Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа / Ю.Н. Алексеев, В.П. Афанасьев, О.Е. Литонов и др. СПб., Гидрометеоздат, 2001, 360 с.
- Астафьев В.Н.** Торосы и стамухи Охотского моря / В.Н. Астафьев, Г.А. Сурков, П.А. Трусков. СПб., Пресс-Погода, 1997, 208 с.
- Болгов М.В.** Каспийское море: экстремальные гидрологические события / М.В. Болгов, Г.Ф. Красножон, А.А. Любушин. М., Наука, 2007, 381 с.
- Бородачев В.Е.** Словарь морских ледовых терминов / В.Е. Бородачев, В.П. Гаврило, М.М. Казанский. СПб., Гидрометеоздат, 1994, 128 с.
- Грищенко В.Д.** Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Тр. ААНИИ, 1988, т. 401, с. 46–55.
- Гузенко Р.Б., Миронов Е.У., Харитонов В.В. и др.** Комплексное исследование старых торосов в Северном Ледовитом океане // Лед и снег, 2020, т. 60, № 3, с. 431–444.
- Миронов Е.У., Гудосников Ю.П., Смирнов В.Н.** Современные методы ледовых исследований и изысканий на шельфе арктических морей // Проблемы Арктики и Антарктики, 2015, № 1 (103), с. 57–68.
- Олейников А.И., Скачков М.Н.** Модель уплотняемых сыпучих тел и некоторые ее приложения // Информатика и системы управления, 2011, № 4 (30), с. 48–57.
- Тышко К.П.** Формирование и консолидация торосов в одолетнем ледяном покрове арктических морей как результат лабораторных и натуральных исследований // Метеорология и гидрология, 2009, № 8, с. 71–79.
- Харитонов В.В., Андреев О.М.** К вопросу о различии дрейфующих торосов и торосов в припае // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 3, с. 43–50.
- Bonnemaire B., Høyland K.V., Liferov P., Moslet P.O.** An ice ridge in the Barents Sea, part I: morphology and physical parameters in-situ // Proc. of the 17th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (Trondheim, Norway, June 16–19, 2003). Trondheim, 2003, p. 559–568.
- Guzenko R.B., Mironov Ye.U., Kharitonov V.V. et al.** Morphometry and internal structure of ice ridges in the Kara and Laptev Seas // Int. J. Offshore and Polar Engineering, 2020, vol. 30, No. 2, p. 194–201.
- Høyland K.V.** Consolidation of first-year sea ice ridges // J. Geophys. Res., 2002, No. 107, p. 15,1–15,15.
- Høyland K.V., Barrault S., Gerland S. et al.** The consolidation in second- and multi-year sea ice ridges. Part I: Measurements in early winter // Proc. of the 19th IAHR Int. Symp. on Ice “Using new technology to understand water-ice interaction” (Vancouver, British Columbia, Canada, July 6–11, 2008). Vancouver, 2008, p. 1439–1450.
- Leppäranta M.** The drift of sea ice. 2nd ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2011, 377 p.
- Strub-Klein L., Barrault S., Goodwin H., Gerland S.** Physical properties and comparison of first- and second-year sea ice ridges // Proc. of the 20th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC) (Luleå, Sweden, June 9–12, 2009). Luleå, 2009. Paper POAC 09-117.
- Surkov G.A.** Internal structure of first-year hummocks // Proc. of the 11th ISOPE (Stavanger, Norway, June 17–22, 2001). Stavanger, 2001a, vol. I, p. 796–798.
- Surkov G.A.** Thickness of the consolidated layer in first-year hummocks // Proc. 16th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (Ottawa, Ontario, Canada, August 12–17, 2001). Ottawa, 2001b, p. 245–252.

## References

- Alekseev Yu.N., Afanas'ev V.P., Litonov O.E. et al. Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniya morskikh mestorozhdenij nefti i gaza [Ice engineering aspects of offshore oil and gas fields development]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 360 p. (in Russian).
- Astaf'ev V.N., Surkov G.A., Truskov P.A. Torosy i stamuhi Ohotskogo morya [Ice ridges and stamukas of the Sea of Okhotsk]. St. Petersburg, Press-Pogoda, 1997, 208 p. (in Russian).
- Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Liubushin A.A. Kaspijskoe more: ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiya [Caspian Sea: extreme hydrological events]. Moscow, Nauka, 2007, 381 p. (in Russian).
- Borodachev V.E., Gavrilov V.P., Kazanskij M.M. Slovar' morskikh ledovykh terminov [Glossary of Sea Ice Terms]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1994, 128 p. (in Russian).
- Grishchenko V.D. Morphometric characteristics of ice ridges in the Arctic Basin. Trudy AANII [Proc. of AARI], 1988, vol. 401, p. 46–55.
- Guzenko R.B., Mironov Ye.U., Kharitonov V.V. et al. Integrated study of old hummocks in the Arctic Ocean. Led i Sneg [Ice and Snow], 2020, vol. 60 (3), p. 431–444.
- Mironov Ye.U., Gudoshnikov Yu.P., Smirnov V.N. Current methods of ice studies and explorations on the shelf of the Arctic seas. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2015, No. 1 (103), p. 57–68.
- Oleinikov A.I., Skachkov M.N. Model of compacted bulk solids and some of its applications. Informatika i sistemy upravleniya [Computer Science and Management systems], 2011, No. 4 (30), p. 48–57. – [http://ics.khstu.ru/media/2011/N30\\_06.pdf](http://ics.khstu.ru/media/2011/N30_06.pdf)
- Tyshko K.P. Formation and consolidation of ice ridges in first-year ice cover of Arctic seas (Laboratory experiments and natural investigations). Russ. Meteorol. Hydrol., 2009, No. 8, p. 71–79.
- Kharitonov V.V., Andreev O.M. On the difference between drifting ice ridges and ice ridges in the landfast ice. Earth's Cryosphere, 2022, vol. XXVI, No. 3, p. 37–42.
- Bonnemaire B., Høyland K.V., Liferov P., Moslet P.O. An ice ridge in the Barents Sea, part I: morphology and physical parameters in-situ. In: Proc. of the 17th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway, 2003, p. 559–568.
- Guzenko R.B., Mironov Ye.U., Kharitonov V.V. et al. Morphometry and Internal Structure of Ice Ridges in the Kara and Laptev Seas. Int. J. Offshore and Polar Eng., 2020, vol. 30, No. 2, p. 194–201. – <https://doi.org/10.17736/ijope.2020.jc784>
- Høyland K.V. Consolidation of first-year sea ice ridges. J. Geophys. Res., 2002, No. 107, p. 15,1–15,15. – <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000JC000526>
- Høyland K.V., Barrault S., Gerland S. et al. The consolidation in second- and multi-year sea ice ridges. Part I: Measurements in early winter. In: Proc. of the 19th IAHR Int. Symp. on Ice “Using new technology to understand water-ice interaction”. Vancouver, British Columbia, Canada, 2008, p. 1439–1450.
- Leppäranta M. The drift of sea ice. 2nd ed. Berlin, Heidelberg Springer-Verlag, 2011, 377 p.
- Strub-Klein L., Barrault S., Goodwin H., Gerland S. Physical properties and comparison of first- and second-year sea ice ridges. In: Proc. of the 20th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Luleå, Sweden, 2009. Pap. POAC 09-117.
- Surkov G.A. Internal structure of first-year hummocks. In: Proc. of the 11th ISOPE. Stavanger, Norway, 2001a, vol. I, p. 796–798.
- Surkov G.A. Thickness of the consolidated layer in first-year hummocks. In: Proc. 16th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Ottawa, Ontario, Canada, 2001b, p. 245–252. – <http://www.poac.com/PapersOnline.html>

*Поступила в редакцию 25 сентября 2024 г.,  
после доработки – 6 декабря 2024 г.,  
принята к публикации 9 февраля 2025 г.*