

КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

УДК 551.326.7 (268.52+268.53)

DOI: 10.15372/KZ20220305

К ВОПРОСУ О РАЗЛИЧИИ ДРЕЙФУЮЩИХ ТОРОСОВ
И ТОРОСОВ В ПРИПАЕ

В.В. Харитонов, О.М. Андреев

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия; kharitonov@aari.ru, and_oleg@rambler.ru*

Проведен анализ различий в строении дрейфующих торосов и торосов в припае на основе информации, полученной во время исследовательских работ, проводимых Арктическим и антарктическим НИИ в 2007–2019 гг. на акваториях Карского моря и моря Лаптевых. Исследования проводились с помощью водяного бурения с записью скорости бурения на логгер. Основное внимание уделялось распределению пористости торосов и толщины консолидированного слоя. Рассмотрена неконсолидированная часть килля тороса и ее уплотнение в процессе торосообразования под действием силы Архимеда. Выявлено, что торосы в припае отличаются от дрейфующих торосов несколько меньшими геометрическими размерами, но более крутыми склонами паруса и килля, а также иным соотношением киль/парус (3.1 против 3.6). У торосов в припае пористость неконсолидированной части килля ниже, чем у дрейфующих торосов (в среднем на 6 %). Подтверждено, что постепенное уменьшение пористости неконсолидированной части килля торосов в припае связано с подледными течениями.

Ключевые слова: торос, дрейфующий лед, припай, термобурение, парус, киль, консолидированный слой, пористость.

ON THE DIFFERENCE BETWEEN DRIFTING ICE RIDGES AND ICE RIDGES
IN THE LANDFAST ICE

V.V. Kharitonov, O.M. Andreev

*Arctic and Antarctic Research Institute,
Beringa str. 38, St. Petersburg, 199397, Russia; kharitonov@aari.ru*

The analysis of differences in the structure of drifting ice ridges and ice ridges in the landfast ice was carried out on the basis of information obtained during research work done by the Arctic and Antarctic Research Institute in 2007–2019 in the Kara and Laptev Seas. The studies were carried out using thermal water drilling with logger recording of the penetration rate. The main attention was focused on the distribution of ice ridge porosity and the thickness of the consolidated layer. The unconsolidated part of the ice ridge keel and its compaction in the process of ice ridge formation under the action of the Archimedes force were considered. It was revealed that the ice ridges in the landfast ice differed from drifting ice ridges in their somewhat smaller geometric dimensions, but in steeper sail and keel slopes, as well as in a different keel/sail ratio (3.1 versus 3.6). In the landfast ice ridges the porosity of the unconsolidated part of the keel was lower than in drifting ice ridges (by 6 % on average). It was confirmed that the gradual decrease in the porosity of the unconsolidated part of the keel of the ice ridges in the landfast ice was caused by the under-ice currents.

Key words: ice ridge, drifting ice, landfast ice, thermal drilling, sail, keel, consolidated layer, porosity.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно номенклатуре Всемирной метеорологической организации [WMO..., 1970–2017], припай – это морской лед, который образуется и остается неподвижным вдоль побережья, где он прикреплен к берегу, к ледяной стене и ледяному барьеру, между отмелями или севшими на отмели айсбергами. Он может образоваться естественным образом из соленой воды или в результате примерзания к берегу или уже существующему при-

паю плавучего льда любой возрастной категории. Он может простираться на расстояние всего в несколько метров или на несколько сотен километров от берега. “Дрейфующий” лед – термин, употребляющийся в широком смысле и включающий любой вид льда, за исключением неподвижного припая.

Торос представляет собой хаотическое нагромождение блоков льда, находящихся в парусе под

действием силы тяжести, а в киле – силы Архимеда. Торосы являются неотъемлемой частью ледяного покрова полярных районов Земли и подразделяются на дрейфующие и неподвижные (припайные). По условиям образования дрейфующие торосы и торосы в припае практически не различаются, так как в том и другом случае это результат нагромождения обломков льда при сжатии ледяных полей. На начальном этапе образования торосов формируется нагромождение обломков льда, в котором большая часть блоков льда оказывается погруженной в воду. Это приводит к сильным локальным тепловым градиентам между кусками холодного льда и окружающей водой. Таким образом, в начальный момент времени вертикальное распределение температуры в киле тороса будет иметь вид пилообразной линии с неравными по высоте и форме “зубцами”. По мере нарастания консолидированного слоя (КС)* эта пилообразная линия будет трансформироваться в кусочно-линейную, а затем она сглаживается и в верхней части киля отклоняется в сторону низких температур. Окончание начальной фазы формирования тороса можно определить как момент, когда неконсолидированный киль становится изотермическим и приходит в состояние локального термодинамического равновесия. Начальная фаза жизни тороса довольно непродолжительная (16–96 ч [Hoyland, Liferov, 2005]) и протекает одинаково как для дрейфующих торосов, так и для торосов в припае. Затем начинается основная фаза, и точка излома на температурном профиле, находящаяся между наклонным участком в КС и изотермическим (в неконсолидированном киле), определяет положение нижней границы КС [Hoyland, 2002].

Консолидированный слой изолирует лежащий под ним неконсолидированный киль от холодного воздуха, из-за чего происходит непрерывная деградация неконсолидированного киля, ведущая к превращению тороса в торос второго года жизни или к плавлению/распаду тороса. На этом этапе условия жизни торосов уже различаются, так как на киль торосов в припае активно воздействуют подледные течения. Дрейфующие торосы перемещаются (в отсутствие ветровой нагрузки) непосредственно под действием течений, поэтому относительное перемещение водяных масс и килей дрейфующих торосов крайне незначительно или вообще отсутствует.

Целью настоящей работы является обсуждение результатов сравнительного анализа основных морфометрических характеристик и внутреннего строения дрейфующих торосов и торосов в припае. Исследование проводилось на основе

информации, полученной во время работ, проводимых Арктическим и антарктическим НИИ (ААНИИ) в 2007–2019 гг. на акваториях Карского моря и моря Лаптевых.

Из недавних работ, посвященных подобной тематике для этого района, можно отметить [Guzenko et al., 2021]. В работах [Strub-Klein, Hoyland, 2011; Sand et al., 2013] были рассмотрены результаты исследования морфометрии торосов во фьордах Шпицбергена, а также в центральной части Баренцева моря и в проливе Фрама. Большое внимание было уделено рассмотрению влияния океанических течений на эрозию киля. Отмечено, что маленькие торосы в припае будут сильнее подвергаться эрозии киля, чем крупные торосы. Общепринятая теория течения через уплотненные слои показывает, что до 20 % падающего на киль пограничного потока может просачиваться через него [Amundrud et al., 2006]. В работе [Shestov, Marchenko, 2014] приводятся крайне интересные, но неподтвержденные пока другими исследователями результаты, показывающие, что внутри неконсолидированной части киля скорость течений морской воды в полостях может быть до 3 раз выше, чем скорость течения под ровным льдом, окружающим торос. В последующих работах [Shestov, Marchenko, 2016a,b] обосновывается происходящее со временем нарастание льда и уменьшение макропористости неконсолидированного киля за счет его проницаемости для морской воды и изменения ее солёности.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРОСОВ

Исследование строения торосов проводилось с помощью водяного бурения с записью скорости проходки на логгер. Описание, схема и технические характеристики используемой установки приведены в [Mironov et al., 2003]. Бурение, как правило, производилось вдоль профилей, проложенных поперек гребня торосов, и в каждой точке бурения дополнительно измерялось расстояние от поверхности снежного покрова (льда) до уровня моря. В результате последующей обработки записей скорости термобура [Снособ..., 2000] определялись морфометрические характеристики торосов и их внутреннее строение. Поскольку скорость проходки зависит от подаваемой на термобур тепловой мощности, а также от пористости льда и (в небольшой степени) от его температуры, определение расположения пустот, плотного и рыхлого льда на отрезках скважины осуществлялось непосредственно по скорости погружения бура. На участках рыхлого льда (особенно в пустотах, заполненных снегом, шугой, водой или воздухом)

* Консолидированный слой торосистого образования – это слой плотного (твердого) льда с верхней границей в районе ватерлинии, образовавшийся в результате воздействия холода и замерзания воды в промежутках между блоками встарошенного льда и включающий в себя эти блоки, с прочностью, близкой к прочности ровного льда.

движение термобура резко ускоряется. Необходимым условием валидности определения пустот является бурение скважин при постоянной тепловой мощности (при непостоянной тепловой мощности требуется точный учет изменения мощности во время бурения). При последующей камеральной обработке полученных данных термобурения были определены величины надводной и подводной частей ледяного покрова, границы КС торосов, границы пустот, участки льда различной пористости.

Важной характеристикой внутреннего строения торосов является их пористость. К. Хойланд [Hoyland, 2002] выделяет два уровня этого показателя: макропористость и общая пористость. Макропористость определяется как отношение объема пустот в выделенной области тороса к общему объему этой области. Общая пористость включает также пористость ровного льда, из которого сложен торос. Иными словами, в общей пористости учитываются также микропоры, находящиеся непосредственно в блоках льда. По записи скорости термобурения фиксируются границы и размеры пустот. В настоящей работе под пористостью θ понимается следующая величина:

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

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

Линейная пористость получается осреднением этой функции по вертикали на заданном интервале глубины, а объемная пористость – осреднением по заданному объему. Распределение пористости по глубине в каждой точке бурения определяется ступенчатой функцией, где нуль соответствует льду, единица – пустоте. Пузырьки воздуха и ячейки с рассолом в блоках льда не учитываются. Точное определение объемной пористости методом точечного бурения невозможно из-за сложного внутреннего строения тороса, но ее можно оценить с помощью полученных распределений линейной пористости в разных точках. Считается, что объемная пористость равна среднему значению бесконечного количества линейных (в данном случае вертикальных) пористостей. В настоящее время принято считать объемной пористостью тороса именно осредненные значения линейной пористости [Hoyland, 2002].

При расчетах ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения торос часто рассматривают как частный случай сыпучей среды с широким диапазоном фракций (см., например, [Алексеев и др., 2001; Болгов и др., 2007]). При этом в работе [Олейников, Скачков, 2011] рассмотрены вопросы уплотнения сыпучей среды под действием силы тяжести, а предложенные в ней модели сопостав-

лены с экспериментальными данными по горным породам и снегу. Согласно модели [Олейников, Скачков, 2011], уменьшение пористости сыпучей среды с глубиной происходит за счет повышения давления. Авторы считают, что аналогичный процесс может быть довольно важным на начальном этапе образования торосов, поэтому его возможные проявления рассмотрены более подробно.

По мнению авторов, киль тороса также можно рассматривать как перевернутую грудку ледяных блоков, которая во время действия процесса торосообразования может быть подвержена процессу уплотнения, но уже под действием не только силы тяжести, но и силы Архимеда. В этом случае областью, в которой отсутствуют напряжения сдвига, будет область, непосредственно граничащая с нижней поверхностью кия. По мере удаления вверх от нижнего края кия пористость будет уменьшаться под давлением нагромождений блоков льда. Поскольку пористость КС в большинстве случаев равняется нулю, ограничимся рассмотрением неконсолидированной части кия торосов. Для установления характера распределения ее пористости осредним индивидуальные распределения пористости неконсолидированного кия во всех точках бурения торосов, сгруппировав их по регионам. Процедура осреднения будет следующей. В модели М.Н. Скачкова сыпучая среда уплотняется с глубиной. Нулевая глубина соответствует поверхности среды, далее она растет по направлению вниз. Поскольку в нашем случае киль тороса – это перевернутая сыпучая среда, глубина будет расти вверх, а нулевая глубина теперь соответствует нижней поверхности кия. Так как нижняя поверхность кия не является плоскостью, а все индивидуальные распределения пористости находятся в разных интервалах глубин, то перед осреднением их необходимо выровнять по глубине. Это можно сделать, например, сдвинув распределения вниз до достижения глубины максимальной осадки кия.

Схематично данный процесс показан на рис. 1. Линиями обозначены распределения пористости неконсолидированного кия в отдельных скважинах. Высота кривых соответствует длине скважины в неконсолидированном киле. После выравнивания всех индивидуальных распределений на глубине максимальной осадки кия необходимо последовательно рассмотреть все глубины (от максимальной глубины кия до нижней границы КС) и осреднить ступенчатые кривые по тем скважинам, которые превышают рассматриваемый горизонт. Воспользуемся данной методикой для оценки возможных различий в распределении пористости неконсолидированного кия для торосов, сформированных на дрейфующем льду и в припае.



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

КС – консолидированный слой; z – расстояние от нижнего края киля.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные, на основе которых была выполнена эта работа, получены в 1998–2019 гг. в Охотском, Карском морях и море Лаптевых. Дрейфующие торосы, исследованные в этих морях, были объединены в одну группу. Во вторую группу попали торосы Байдарацкой губы Карского моря, Хатангского залива моря Лаптевых и торосы пролива Шокальского, которые на момент исследования находились в припае. Всего было рассмотрено 134 дрейфующих тороса и 56 торосов в припае. В таблице приведены значения основных характеристик торосов из первой и второй групп.

В результате выполнения работы было определено, что по своим морфометрическим параметрам (размерам) торосы в припае в среднем несколько меньше дрейфующих торосов. При этом у

них более крутые склоны паруса и киля, существенно толще КС, а также в 2 раза больше отношение толщины КС к средней толщине блоков льда в парусе. Последний показатель является косвенным признаком более значительного возраста торосов в припае, и подтверждение этого можно найти в работе [Guzenko et al., 2021]. Несколько меньшее значение отношения киль/парус у торосов в припае (3.1 против 3.6 у дрейфующих торосов) получается, по-видимому, за счет более интенсивного таяния и последующего разрушения ледяных перемычек, скрепляющих блоки на нижнем краю киля.

В работе [Naumov et al., 2019] рассмотрены морфометрические параметры торосов Байдарацкой губы, которые в момент исследования находились в припае, и обобщены результаты исследова-

Средние характеристики дрейфующих торосов и торосов в припае

Характеристика	Торосы	
	дрейфующие	в припае
Количество торосов	134	56
Средняя высота паруса, м	3.1	2.5
Средняя осадка киля, м	11.0	7.6
Отношение киль/парус	3.6	3.1
Средняя толщина КС, м	1.9	2.5
Средняя пористость неконсолидированной части паруса	0.20	0.22
Средняя пористость неконсолидированной части киля	0.27	0.21
Средний вертикальный размер пустот в парусе, м	0.24	0.14
Средний вертикальный размер пустот в киле, м	0.39	0.20
Среднее отношение толщины КС к общей толщине льда в торосе	0.32	0.54
Средняя толщина блоков льда в парусе тороса, м	0.50	0.35
Средняя толщина ровного льда у тороса, м	1.2	1.7
Среднее отношение толщины КС к толщине блоков в парусе тороса	4.4	8.4
Средний угол ската паруса, град	26	33
Средний угол ската киля, град	25	29

ний за период 2005–2017 г. По этим данным, средняя высота паруса в разные годы составила 0.9–2.7 м, осадка кия 4.4–8.0 м. Эти значения хорошо согласуются с данными из таблицы: 2.5 м по высоте паруса и 7.6 м по осадке кия для торосов в припае. Что касается толщины КС, то данные из статьи не демонстрируют явной повышенной толщины КС для торосов в припае. Исследования проводились в течение 10 лет, и диапазон значений средней толщины КС (1.5–2.4) достаточно равномерно распределен по годам исследований. Пористость неконсолидированной части кия также изменяется в широком диапазоне – от 0.13 до 0.44, но наиболее частые значения пористости сводятся к диапазону 0.32–0.36, что также существенно превышает значения из таблицы. Значение пористости 0.74 для 2013 г., приведенное в [Naumov et al., 2019] и рассматриваемое нами как выбор или опечатка, несколько снижает репрезентативность и доверие к представленным данным.

Формула К. Хойланда [Hoyland, 2002] дает прямое соответствие между пористостью неконсолидированной части кия, толщиной окружающего торос льда и толщиной КС. В предположении, что в момент торосообразования КС отсутствует и его толщина равняется нулю, формула приобретает вид

$$H_{CL} = \sqrt{\frac{H_{LI}^2 - H_{LI0}^2}{\theta_{cp}}},$$

где H_{CL} – толщина КС, м; H_{LI0} , H_{LI} – толщина льда в момент торошения и толщина окружающего торос льда, м; θ_{cp} – средняя пористость неконсолидированной части кия.

Приняв в качестве толщины льда в момент торошения среднюю толщину блоков льда в парусе торосов и используя данные из таблицы, можно рассчитать ожидаемую толщину КС дрейфующих торосов. Она оказывается равной 2.01 м, что достаточно близко к средней толщине КС 1.90 м из таблицы. В то же время для торосов в припае подобный расчет дает существенно завышенную толщину КС, равную 3.65 м. Значение 2.4 м (см. таблицу) получается, только если принять в качестве пористости неконсолидированного кия значение 0.45. Такая пористость для свежих торосов в припае маловероятна, особенно учитывая то, что результирующая пористость парусов торосов в обеих группах практически одинакова – 0.20 и 0.22 (см. таблицу). Отсюда следует, что пористость кия свежих торосов также должна быть в диапазоне 0.24–0.30. В таком случае, теоретически должен существовать некий фактор, ограничивающий рост КС. По мнению авторов [Naumov et al., 2019], наиболее вероятным фактором, влияющим на толщину КС, является наличие значительного

снежного покрова. Для рассматриваемых в настоящей статье торосов в припае средняя толщина снежного покрова в Хатангском заливе была около 0.3 м, в проливе Шокальского – в пределах 0.2–0.8 (хотя в некоторых точках достигала 2.3 м). Таким образом, роль снежного покрова в особенностях нарастания КС для разных видов торосов представляется нам не такой уж однозначной. В качестве альтернативы можно предположить, что на замедление консолидации припайных торосов влияет повышенный геотермальный поток.

На рис. 2 для дрейфующих торосов и торосов в припае приведены сглаженные распределения пористости неконсолидированного кия, полученные по описанной выше процедуре осреднения. Также на рис. 2 приведено относительное количество осредняемых при этом данных. Сглаживание произведено скользящим средним с окном сглаживания 2 м. Нуль оси ординат соответствует нулевому расстоянию от нижнего края кия. Линией 5 показано граничное расстояние, свыше которого количество осредняемых данных не превышает 5 % от общего числа. Видно, что кривая 1

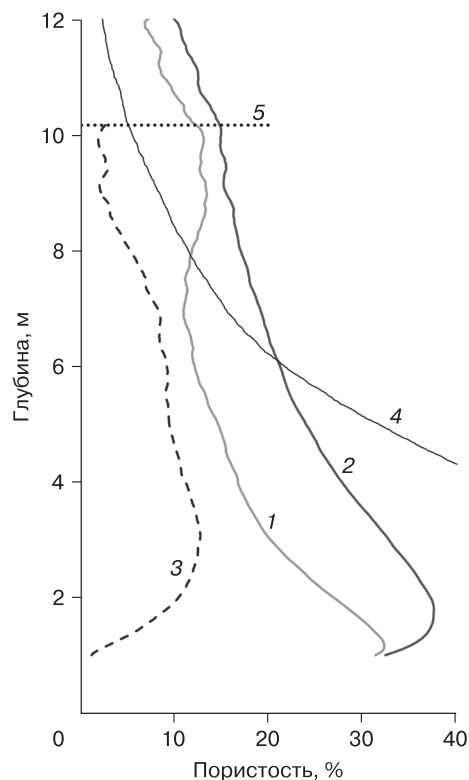


Рис. 2. Сглаженная осредненная пористость неконсолидированной части кия дрейфующих торосов и торосов в припае и относительное количество осредняемых данных.

1 – припай; 2 – дрейфующий лед; 3 – разница значений; 4 – относительное количество осредняемых значений; 5 – глубина, выше которой количество осредняемых данных не превышает 5 % от общего числа.

пористости торосов в припае на расстоянии примерно до 9 м смещена относительно дрейфующих торосов (кривая 2) в сторону меньших значений. На рис. 2 показана также разница значений осредненной пористости дрейфующих торосов и торосов в припае (кривая 3) в наиболее информативном диапазоне. Отсюда следует, что пористость неконсолидированного килья припайных торосов в среднем на 8.5 % ниже, чем у дрейфующих торосов (при максимальной разнице 12.7 %). Средняя пористость неконсолидированного килья припайных торосов на 6 % ниже, чем у дрейфующих (см. таблицу). Следует учесть, что средние значения пористости приведены для всей толщины неконсолидированной части килья, а указанное выше значение 8.5 % получено только для расстояний (от нижнего края килья) в диапазоне 2–8 м.

Полученная разница может быть связана с размерами блоков льда, слагающих торосы. Скорость фильтрации воды через пористую среду зависит от размеров пор, в нашем случае от полостей неконсолидированного килья. Размер полостей зависит от размера блоков льда, слагающих киль. Это было показано, например, в работе [Amundrud et al., 2006]. Полости в припайных торосах меньше (см. таблицу), поэтому при воздействии течения на неконсолидированный килья такого тороса получается, что подледная вода внутрь килья почти не проникает, а приводит к таянию килья с его внешней границы (в основном снизу тороса, где течение усиливается [Schramm et al., 2000]). Таким образом, макропористость θ_{cp} неконсолидированной части килья торосов в припае падает, так как наиболее пористая нижняя часть килья тает или разрушается вследствие эрозии.

Для проверки данного предположения дополнительно было проведено компьютерное моделирование разрушения нижних частей килья под действием течений. У 16 неконсолидированных кильей осадкой по 15 м было смоделировано распределение пористости согласно [Олейников, Скачков, 2011]. Затем случайным образом были удалены нижние части кильей размером от 0.3 до 4.5 м. Оставшиеся фрагменты распределений пористости были сдвинуты и осреднены по описанной выше процедуре. В результате осредненная кривая пористости оказалась сдвинутой в сторону меньших значений примерно на 10 % в максимальном значении, что вполне соответствует разнице на рис. 2.

Согласно данным натурных наблюдений, в проливе Шокальского (непосредственно в районе проведения исследований припайных торосов) существуют суточные приливные течения со средней по модулю скоростью 0.04 м/с на глубине 10 м при максимальной скорости 0.23 м/с [Kharitonov, Borodkin, 2020]. Именно данные этих измерений

косвенно указывают на то, что основной причиной пониженной пористости кильей торосов в припае является воздействие подледных течений.

В работах [Shestov, Marchenko, 2016a,b] рассмотрены результаты математического и лабораторного моделирования, а также результаты опытов *in situ*, подтверждающие влияние проникающей внутрь кильей торосов морской воды на уменьшение пористости неконсолидированной части килья. Обобщенные графики пористости на рис. 2 и сравнение средних вертикальных размеров пустот в парусе и киле для торосов обеих групп (см. таблицу) явно свидетельствуют в пользу такого эффекта.

Авторы работы [Ervik et al., 2018] отмечают, что у тороса, длительное время пребывавшего в условиях переноса тепла из океана в атмосферу, наблюдалось уменьшение макропористости килья. Это может быть связано с двойным воздействием на неконсолидированную часть килья от описанного выше эффекта влияния подледного течения и от роста толщины КС ввиду его термодинамической эволюции. Это подтверждается данными натурных измерений (см. таблицу), согласно которым торосы в припае в среднем были образованы раньше, чем торосы на дрейфующем льду. На это указывают толщина КС и размеры блоков льда (т. е. меньшая толщина ровного льда, из которого были образованы торосы).

Таким образом, торосы в припае на момент проведения измерений (апрель–май) в среднем должны обладать несколько меньшими размерами (за счет таяния нижней части килья) и меньшей пористостью неконсолидированной части килья, чем торосы на дрейфующих льдах.

ВЫВОДЫ

После выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

- торосы в припае отличались от дрейфующих торосов несколько меньшими геометрическими размерами и соотношением килья/парус (3.1 против 3.6), но более крутыми склонами паруса и килья;
- толщина КС исследованных дрейфующих торосов в среднем составила 1.9 м, а у торосов в припае 2.5 м;
- средняя степень консолидации исследованных торосов, т. е. отношение толщины КС к общей толщине льда в торосе, составила для дрейфующих торосов 32 %, для торосов в припае 54 %;
- у торосов в припае пористость неконсолидированной части килья была ниже в среднем на 6 %, чем у дрейфующих торосов; в области килья, которая располагается на расстоянии менее 8 м от края килья, эта разница в среднем составляет 8.5 %;
- подтверждено сделанное ранее другими исследователями заключение, что уменьшение ма-

кропористости неконсолидированной части кия торосов происходит постепенно и связано с подледными течениями.

Работа выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ 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.

Болгов М.В. Каспийское море: экстремальные гидрологические события / М.В. Болгов, Г.Ф. Красножон, А.А. Любушин. М., Наука, 2007, 381 с.

Олейников А.И., Скачков М.Н. Модель уплотняемых сыпучих тел и некоторые ее приложения // Моделирование систем, 2011, № 4 (30), с. 48–57.

Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта: пат. RU 2153070 С1. Рос. Федерация: МПК E21C 39/00 (2000.01), G01N 9/00 (2000.01) / Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В.; патентообладатели – авторы. – № 2153070; заявл. 19.11.1998; опубл. 20.07.2000, Бюл. № 20.

Amundrud T.L., Melling H., Ingram R.G., Allen S.E. The effect of structural porosity on the ablation of sea ice ridges // J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, p. C06004.

Ervik Å., Høyland K.V., Shestov A., Nord T.S. On the decay of first-year ice ridges: Measurements and evolution of rubble macroporosity, ridge drilling resistance and consolidated layer strength // Cold Reg. Sci. Technol., 2018, vol. 151, p. 196–207.

Guzenko R.B., Mironov Ye.U., May R.I. et al. Relationship between the consolidated layer thickness and other morphometric characteristics of one-years ice ridges // Proc. of the 26th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (Moscow, Russia, June 15–18, 2021). Moscow, 2021.

Høyland K.V. Consolidation of first-year sea ice ridges // J. Geophys. Res., 2002, vol. 107, p. 15,1–15,15.

Høyland K.V., Liferov P. On the initial phase of consolidation // Cold Reg. Sci. Technol., 2005, vol. 41 (1), p. 49–59.

Kharitonov V.V., Borodkin V.A. On the results of studying ice ridges in the Shokals'kogo Strait, part I: Morphology and physical parameters in-situ // Cold Reg. Sci. Technol., 2020, vol. 174, p. 103041.

Mironov Ye.U., Morev V.A., Porubaev V.S., Kharitonov V.V. Study of geometry and internal structure of ice ridges and stamukhas using thermal water drilling // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (Trondheim, Norway, June 16–19, 2003). Trondheim, 2003, p. 623–634.

Naumov A.K., Skutina E.A., Golovin N.V. et al. Peculiarities of morphometric features and inner structures of the ridged formations in the Ob' Bay // Proc. of the 29th Intern. Ocean and Polar Eng. Conf. ISOPE'19 (Honolulu, June 16–21, 2019). Hawaii, USA, 2019, p. 684–690.

Sand B., Petrich C., Sudom D. Morphologies of ridges surveyed off Svalbard and in Fram Strait, 2011 and 2012 field expeditions // Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC) (Espoo, Finland, June 9–13, 2013). Espoo, 2013.

Schramm J., Flato G., Curry J. Toward the modeling of enhanced basal melting in ridge keels // J. Geophys. Res., 2000, vol. 105, No. C6, p. 14081–14092.

Shestov A.S., Marchenko A.V. Properties of ice ridge keels and sea currents in their vicinity in the Barents Sea // Proc. of the 22th IAHR Intern. Symp. on Ice (Singapore, August 11–15, 2014). Singapore, 2014.

Shestov A.S., Marchenko A.V. The consolidation of saline ice blocks in water of varying freezing points: Laboratory experiments and computer simulations // Cold Reg. Sci. Technol., 2016a, vol. 122, p. 71–79.

Shestov A.S., Marchenko A.V. Thermodynamic consolidation of ice ridge keels in water at varying freezing points // Cold Reg. Sci. Technol., 2016b, vol. 121, p. 1–10.

Strub-Klein L., Høyland K. One season of a 1st year sea ice ridge investigation – Winter 2009 // Proc. of the 21st Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (Montréal, Canada, July 10–14, 2011). Montreal, 2011.

WMO Sea Ice Nomenclature: Terminology, codes and illustrated glossary. Word Meteorological Organization, WMO No. 259, 1970–2017.

References

Alekseev Yu.N., Afanas'ev V.P., Litonov O.E. et al. Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniia morskikh mestorozhdenii nefi i gaza [Ice engineering aspects of offshore oil and gas fields development]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 360 p. (in Russian).

Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Liubushin A.A. Kaspiiskoe more: ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiia [Caspian Sea: extreme hydrological events]. Moscow, Nauka, 2007, 381 p. (in Russian).

Oleinikov A.I., Skachkov M.N. Model of compacted bulk solids and some of its applications. Modelirovanie sistem [System Modeling], 2011, No. 4 (30), p. 48–57. – http://ics.khstu.ru/media/2011/N30_06.pdf

Patent RU 2153070 C1. Sposob opredeleniya struktury torosov i stamukh, svoistv l'da i granitsy l'da i grunta [Method of determination of ice ridge and stamukha structure, ice features and boundaries of ice and ground]. Morev V.A., Morev A.V., Kharitonov V.V. Russian Federation: MPK E21C 39/00 (2000.01), G01N 9/00 (2000.01). Patent Holders: authors. – No. 2153070. Claimed 19.11.1998. Published 20.07.2000, Bull. No. 20 (in Russian).

Amundrud T.L., Melling H., Ingram R.G., Allen S.E. The effect of structural porosity on the ablation of sea ice ridges. J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, p. C06004.

Ervik Å., Høyland K.V., Shestov A., Nord T.S. On the decay of first-year ice ridges: Measurements and evolution of rubble macroporosity, ridge drilling resistance and consolidated layer strength. Cold Reg. Sci. Technol., 2018, vol. 151, p. 196–207.

Guzenko R.B., Mironov Ye.U., May R.I. et al. Relationship between the consolidated layer thickness and other morphometric characteristics of one-years ice ridges. In: Proc. of the 26th Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (Moscow, Russia, June 15–18, 2021). Moscow, 2021.

Høyland K.V. Consolidation of first-year sea ice ridges. J. Geophys. Res., 2002, vol. 107, p. 15,1–15,15.

Høyland K.V., Liferov P. On the initial phase of consolidation. Cold Reg. Sci. Technol., 2005, vol. 41(1), p. 49–59.

Kharitonov V.V., Borodkin V.A. On the results of studying ice ridges in the Shokals'kogo Strait, part I: Morphology and physical parameters in-situ. Cold Reg. Sci. Technol., 2020, vol. 174, p. 103041.

Mironov Ye.U., Morev V.A., Porubaev V.S., Kharitonov V.V. Study of geometry and internal structure of ice ridges and stamukhas using thermal water drilling. In: Proc. of the 17th

Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (Trondheim, Norway, June 16–19, 2003). Trondheim, 2003, p. 623–634.

Naumov A.K., Skutina E.A., Golovin N.V. et al. Peculiarities of morphometric features and inner structures of the ridged formations in the Ob' Bay. In: Proc. of the 29th Intern. Ocean and Polar Eng. Conf. ISOPE'19 (Honolulu, June 16–21, 2019). Hawaii, USA, 2019, p. 684–690.

Sand B., Petrich C., Sudom D. Morphologies of ridges surveyed off Svalbard and in Fram Strait, 2011 and 2012 field expeditions. In: Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC) (Espoo, Finland, June 9–13, 2013). Espoo, 2013.

Schramm J., Flato G., Curry J. Toward the modeling of enhanced basal melting in ridge keels. *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, No. C6, p. 14081–14092.

Shestov A.S., Marchenko A.V. Properties of Ice Ridge Keels and Sea Currents in their Vicinity in the Barents Sea. In: Proc. of

the 22th IAHR Intern. Symp. on Ice (Singapore, August 11–15, 2014). Singapore, 2014.

Shestov A.S., Marchenko A.V. The consolidation of saline ice blocks in water of varying freezing points: Laboratory experiments and computer simulations. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2016a, vol. 122, p. 71–79. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.11.008>

Shestov A.S., Marchenko A.V. Thermodynamic consolidation of ice ridge keels in water at varying freezing points. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2016b, vol. 121, p. 1–10. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.015>

Strub-Klein L., Hoyland K. One season of a 1st year sea ice ridge investigation – Winter 2009. In: Proc. of the 21st Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (Montréal, Canada, July 10–14, 2011). Montreal, 2011.

WMO Sea Ice Nomenclature: Terminology, codes and illustrated glossary. World Meteorological Organization, WMO No. 259, 1970–2017.

*Поступила в редакцию 4 мая 2021 г.,
после доработки – 13 марта 2022 г.,
принята к публикации 14 апреля 2022 г.*