

# ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-44-59>  
УДК 551.326.3



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ НЕКОНСОЛИДИРОВАННОЙ ЧАСТИ КИЛЯ ТОРОСОВ

*В.В. ХАРИТОНОВ\**

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия*

*\*kharitonov@aari.ru*

### Резюме

Целью настоящей работы было исследование распределения пористости в торосах, т. к. эта информация может быть востребована при проведении расчетов ледовых нагрузок от воздействия торосов на гидротехнические сооружения. Пористость торосов определяется в результате обработки записей скорости термобурения. Рассмотрена неконсолидированная часть килля тороса как сыпучая среда и ее уплотнение под действием силы Архимеда. Распределения пористости неконсолидированной части килля в точках бурения выравнены и осреднены. Отсчет расстояния производится вверх, начиная от глубины максимальной осадки килля. Выявлено, что пористость экспоненциально убывает с расстоянием от края килля, а скорость убывания определяется начальной пористостью (на нижнем краю килля) и уплотняемостью битого льда килля. С вероятностью 90 % начальная пористость лежит в интервале  $0,450 \pm 0,125$ . С ростом расстояния от края килля кривые пористости, построенные для разных исследований, сходятся к довольно узкому диапазону значений. На расстоянии 12–14 м этот диапазон составляет  $0,07 \dots 0,12$ . Обосновывается вывод, что уплотняемость килля в процессе торошения определяется прочностью торосящегося льда, которая, в свою очередь, определяется кристаллическим строением и средней температурой льда в момент торошения — чем теплее лед, тем уплотняемость выше.

**Ключевые слова:** киль, пористость, торос, уплотняемость.

**Для цитирования:** Харитонов В.В. Распределение пористости неконсолидированной части килля торосов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 1. С. 44–59. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-44-59>.

Поступила 17.09.2020

После переработки 07.12.2020

Принята 13.12.2020

## TRENDS IN POROSITY CHANGES OF THE UNCONSOLIDATED PART OF ICE RIDGE KEEL

*VICTOR V. KHARITONOV\**

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

\*kharitonov@aari.ru

### Summary

An ice ridge is a special case of granular medium with a wide range of fractions. It represents a chaotic piling-up of blocks occurring under the action of gravity in the sail and due to the Archimedes force in the keel. An important characteristic of the internal structure of ice ridges is their porosity. Scientists from different countries have been dealing with this problem. First-year ice ridges are taken into consideration in Arctic and subarctic marine structural design, and the calculation of ice loads includes ridge porosity and strength, as well as other parameters. The aim of the present work is to discern the regularities of porosity distribution in the unconsolidated part of the keel with depth. Ice ridge porosity is identified by means of processing thermodrilling records. In this paper, porosity is interpreted as a step function equal to zero if there is ice at the point  $(x, y, z)$ , and to one if there is no ice at the point  $(x, y, z)$ . The author applies the model of compaction of the bulk medium under the influence of gravity, and, particularly for the keel, due to the Archimedes force. A zero depth corresponds to the lower surface of the keel, so each individual porosity distribution of the unconsolidated part of the keel at the drilling point must be shifted down until the maximum keel draft depth is reached in the region under consideration. After alignment, the step curves are averaged. The distance is measured up, starting from the depth of the maximum keel draft. The curve of the averaged porosity can be divided into segments reflecting the characteristic features of the distribution. According to the graphs, average porosity decreases exponentially. Ice ridges of several geographical regions are considered, and in each region is divided into groups by years of research. On the whole, 17 depth-wise distributions of the average porosity are obtained for seven regions. Each distribution was approximated according to the model, taking into account the average density of water and ice in the region. For each distribution, the values of compactibility and porosity at the zero depth, i. e. at the lower edge of the keel, were obtained; the second value only has mathematical sense. It is more convenient to consider the maximum value of the average porosity, which is taken as the initial porosity. With a probability of 90 %, the initial porosity is within the range of  $0.450 \pm 0.125$ . As the distance from the keel edge increases, the porosity curves converge to a fairly narrow range of values. At a distance of 12–14 m, this range is 0.07...0.12. The second parameter characterizing the porosity distribution in the unconsolidated part of the keel is compactibility. The steepness of the exponent approximating the average porosity curve depends on it, too. Compactibility is most affected by the strength of the ridged ice as well as the ice thickness. From the literature on the physical properties of ice it is known that as the temperature of ice increases, its strength decreases, and its plasticity increases. Thus, it can be concluded that compactibility is determined by the ice crystal structure as well the ice average temperature at the time of ridging — the warmer the ice, the higher the compactibility of the ice blocks in the keel.

**Keywords:** compactibility, ice ridge, keel, porosity.

**For Citation:** Kharitonov V.V. Trends in porosity changes of the unconsolidated part of ice ridge keel *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (1): 44–59. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-44-59>.

Received 17.09.2020

Revised 07.12.2020

Accepted 13.12.2020

### ВВЕДЕНИЕ

Торосы, как крупные ледяные образования, занимают в среднем 10–40 % от всего объема ледяного покрова [1]. Внутреннее строение торосов определяется обломками льда, слагающими единый массив [2–4]. Обломки льда, смерзшиеся между собой в теле торосистого образования, имеют различные размеры и форму, кроме того, они случайным образом ориентированы в пространстве. В результате смерза-

ния обломков между собой образуется ледяной костяк торосистого образования со сложной структурой.

Важной характеристикой внутреннего строения торосов является их пористость. К. Хойланд [5] 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. Записи скорости термобурения дают границы и размеры пустот. В настоящей работе под пористостью  $\Theta$  понимается следующая величина:

$$\begin{aligned} \Theta(x, y, z) &= 0, \text{ если в точке с координатами } (x, y, z) \text{ присутствует лед, и} \\ \Theta(x, y, z) &= 1, \text{ если отсутствует.} \end{aligned} \quad (1)$$

Линейная пористость получается 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 определяется ступенчатой функцией, где 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. Среди ледоисследователей принято осредненные значения линейной пористости считать объемной пористостью тороса [5].

В.Д. Грищенко [2] 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 (кусковой) 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 [6, 7] также отмечал увеличение пористости с глубиной в однолетних торосах. 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. [8]. По их данным, пористость в торосе изменялась с глубиной, ниже консолидированного слоя (КС) увеличиваясь с 0,2 до 0,5, а наибольшие по вертикальному размеру пустоты были сосредоточены в нижней части кия. Авторы отмечают, что чем ближе к уровню моря, тем более компактно сложены блоки в торосе, и связывают это также с положительной плавучестью льда.

О.М. Андреев [9], обобщая результаты исследований торосистых образований в 2003–2007 гг. в Баренцевом море, отмечает, что в свежих торосах, в которых КС либо отсутствовал, либо только начал формироваться, пористость в верхней части кия тороса меньше, нежели в нижней части. Он также связывает это явление с действием архимедовых сил и даже предлагает квадратичную зависимость, ап-

проксимирующую распределение пористости в киле тороса по глубине. Согласно этой зависимости, пористость изменялась от 0,1 при нулевой глубине до 0,4 при максимальном киле, однако, к сожалению, О.М. Андреев не представил какого-либо физического обоснования предложенной им квадратичной аппроксимации.

Торос представляет собой хаотическое нагромождение блоков, находящихся в парусе под действием силы тяжести, а в киле — силы тяжести, силы Архимеда, а также сил реакции взаимодействия между блоками. При расчетах ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения его часто рассматривают как частный случай сыпучей среды с широким диапазоном фракций, например [10, 11]. В работе М.Н. Скачкова и А.И. Олейникова [12] 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 глубиной за счет повышения давления.

Цель данной работы — выявить закономерности распределения пористости неконсолидированной части киля торосов. Для достижения данной цели потребовалось решить следующие задачи:

- получить усредненные распределения пористости торосов по глубине для различных регионов;
- оценить характеристические параметры кривых пористости неконсолидированного киля как сыпучей среды;
- выявить связь этих параметров с другими атрибутами строения торосов.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные, на основе которых была выполнена эта работа, получены в 1998–2018 гг. в Печорском, Карском, Охотском, Каспийском, Азовском морях, в море Лаптевых и в проливе Шокальского вблизи ледового стационара «Ледовая база Мыс Баранова». Исследования проводились методом теплового бурения льда с записью скорости бурения на компьютер (логгер). Скорость бурения зависит от подаваемой на термобур тепловой мощности и пористости льда. Определение расположения пустот, плотного и рыхлого льда на отрезках скважины производится по скорости погружения бура, т. к. на участках рыхлого льда и особенно в пустотах движение термобура резко ускоряется. Необходимым условием репрезентативности данных о строении торосов является бурение скважин при постоянной тепловой мощности. Дополнительно измеряется расстояние от поверхности снежного покрова (льда) до уровня моря. Морфометрические характеристики торосов и их внутреннее строение определяются в результате обработки записей термобурения. Определяются величина надводной и подводной частей ледяного покрова, границы КС торосов, границы пустот, участки льда различной пористости.

#### МОДЕЛЬ

М.Н. Скачков [12] предлагает формулу для пористости  $\Theta$  сыпучей среды (рис. 1а):

$$\Theta = 1 / \left[ 1 + \left( \frac{1}{\Theta_0} - 1 \right) e^{k\rho_i g z} \right], \quad (2)$$

где  $\Theta_0$  — пористость при нулевой глубине,  $k$  — коэффициент, характеризующий уплотняемость сыпучей среды,  $\text{Па}^{-1}$ ;  $\rho_i$  — плотность скелета, т. е. льда,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  —

ускорение силы тяжести,  $m/s^2$ ;  $z$  — глубина, м. Ю.П. Желтов [13] предлагает такую зависимость пористости от напряжения  $\sigma$ :

$$\Theta = \Theta_0 e^{-\beta_c(\sigma - \sigma_0)},$$

где  $\beta_c$  — сжимаемость,  $Pa^{-1}$ ;  $\sigma_0$  — начальное среднее нормальное напряжение, Па. Важно, что оба автора предлагают экспоненциальную зависимость.

Применим модель М.Н. Скачкова к торосу как сыпучей среде и ограничимся для начала рассмотрением кия тороса. В этом случае область, в которой отсутствуют напряжения сдвигания и которая характеризуется начальной пористостью, будет область, граничащая с нижней поверхностью кия (рис. 1б). По мере увеличения расстояния от края кия (направление вверх на рис. 1б) пористость будет уменьшаться под давлением нагромождения блоков льда, находящихся под действием силы Архимеда. Поэтому вместо гравитационной постоянной  $g$  в формуле (2) следует использовать величину  $g_A = g(\rho_w - \rho_i)/\rho_w$ , где  $\rho_w$  — плотность морской воды,  $kg/m^3$ . Величина  $g_A$  будет зависеть от средней плотности однолетнего морского льда и воды и колебаться в зависимости от условий ледообразования.

Запись скорости бурения в каждой точке можно представить в виде ступенчатой кривой, где пустотам будет соответствовать 1, а льду — 0. Поскольку пористость КС в большинстве случаев равняется нулю, ограничимся рассмотрением неконсолидированной части кия торосов. Для установления параметров распределения пористости как сыпучей среды на основе модели М.Н. Скачкова осредним индивидуальные распределения пористости неконсолидированного кия во всех точках бурения для каждого отдельного региона. Процедура осреднения будет следующей. Поскольку в выражении (2) нулевая глубина соответствует нижней поверхности кия (рис. 1б), а каждое индивидуальное распределение пористости располагается на своем интервале глубин, для осреднения их необходимо сдвинуть вниз до достижения глубины

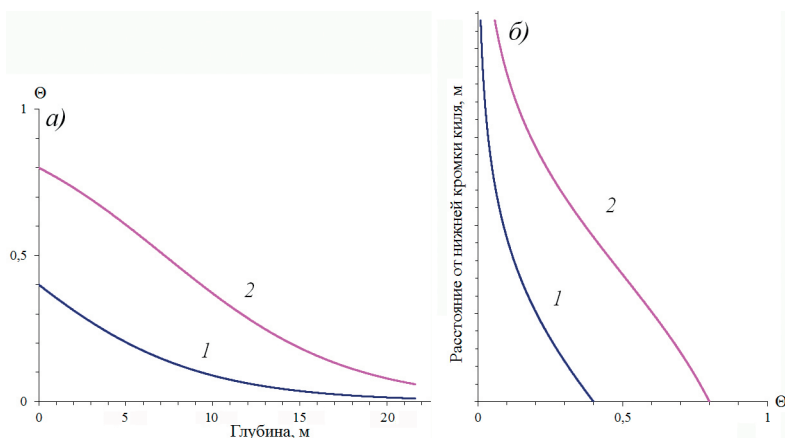


Рис. 1. Изменение пористости: а) падение пористости  $\Theta$  сыпучей среды с глубиной  $z$ : 1 — среда с низкой пористостью ( $\Theta_0 < 1/2$ ), 2 — среда с высокой пористостью ( $\Theta_0 > 1/2$ ) [12]; б) уменьшение пористости кия тороса (ноль оси ординат соответствует нижней поверхности кия)

Fig. 1. Porosity change: а) drop in the porosity  $\Theta$  with depth  $z$ : 1 — medium with low porosity ( $\Theta_0 < 1/2$ ), 2 — medium with high porosity ( $\Theta_0 > 1/2$ ) [12]; б) decrease in the porosity of ice ridge keel (zero y-axis corresponds to the lower ice ridge keel surface)

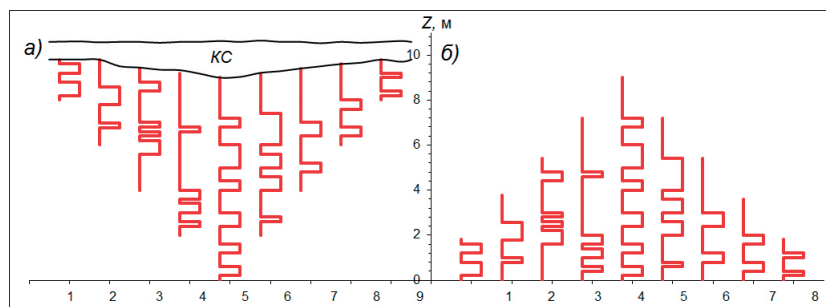


Рис. 2. Схематическое изображение кия тороса (а) и схема сдвига индивидуальных распределений пористости неконсолидированной части кия до горизонта максимальной осадки кия (б). КС — консолидированный слой. Красным цветом обозначены распределения пористости неконсолидированного кия в отдельных скважинах

Fig. 2. Schematic image of the ice ridge keel (a) and scheme for shifting individual porosity distributions of the unconsolidated part of the keel to the maximum keel draft depth (b). КС — consolidated layer. The red color indicates the porosity distributions of the unconsolidated part of the keel in individual boreholes

максимальной осадки кия. Схематично этот процесс проиллюстрирован на рис. 2. Красными 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 последовательно рассматриваются все глубины от максимальной глубины кия до нижней границы КС в точке максимального кия и осредняются ступенчатые кривые по тем скважинам, которые превышают рассматриваемый горизонт. Отсчет глубины производится вверх, начиная от глубины максимальной осадки кия.

В результате этой процедуры получены распределения пористости неконсолидированной части кия как сыпучей среды по глубине для районов проведения исследований. Сюда вошли данные о торосах Охотского моря 1998 и 2006 гг., Печорского моря 1999 г., Каспийского моря 2003, 2008 и 2013 гг., Азовского моря 2005 г., Карского моря и моря Лаптевых 2014 и 2015 гг., Хатангского залива 2017 г., Байдарецкой губы 2007 и 2010 гг., пролива Шокальского 2016–2019 гг.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение пористости сыпучей среды, которой является неконсолидированный киль, по мере удаления от края кия хорошо иллюстрирует пример на рис. 3, показывающий результаты осреднения по всем точкам бурения на торосах с дискретностью 1 см, а также количество осредняемых значений пористости на каждом горизонте. Данные получены во время исследований торосов Охотского моря на шельфе о. Сахалин в 1998 и 2006 гг.

Кривую пористости в области неконсолидированного кия можно разбить на три отрезка, соответствующих зонам, отражающим характерные особенности распределения. Поскольку ступенчатое распределение пористости в каждой точке бурения в нижней граничной части кия всегда заканчивается нулем, соответствующим льду, средняя пористость здесь будет нулевая. С удалением от нижнего края кия все чаще в отдельных скважинах будут встречаться пустоты и средняя пористость

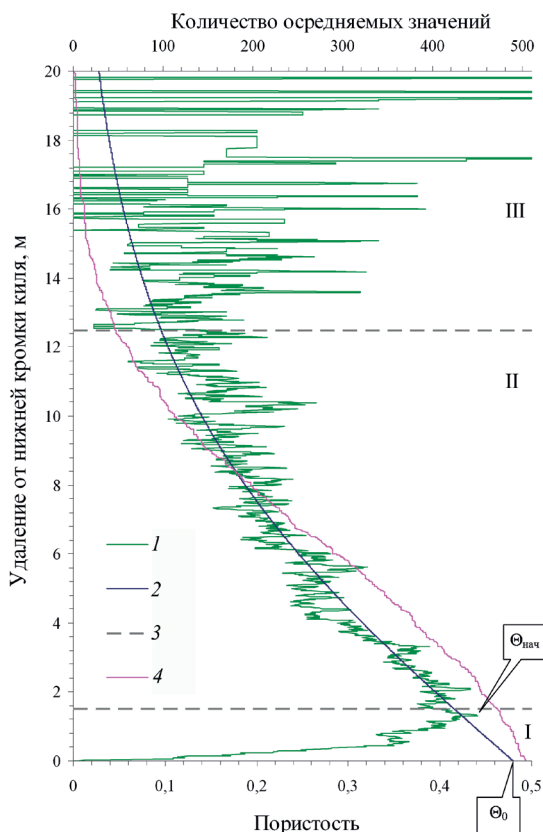


Рис. 3. Результаты осреднения пористости сыпучей среды, которой является неконсолидированный лед кила, по всем точкам бурения на торосах Охотского моря на шельфе о. Сахалин в 1998 и 2006 гг. по глубине.

1 — пористость, 2 — аппроксимирующая кривая по формуле (2), 3 — границы выделенных зон, 4 — количество усредняемых значений пористости на каждом горизонте.  $\Theta_0$  — нулевая пористость,  $\Theta_{нач}$  — начальная пористость. Римскими цифрами показаны зоны различной тенденции изменения пористости в киле. Аппроксимация выполнена в зоне II

Fig. 3. Depth-wise distribution of the averaged porosity of ice ridges investigated in 1998 and 2006 in the Sea of Okhotsk.

1 — porosity, 2 — approximating line by formula (2), 3 — boundaries of the marked zones, 4 — the number of averaged porosity values at each depth.  $\Theta_0$  — porosity at zero,  $\Theta_{нач}$  — initial porosity. The Roman numerals designate zones with different trends in porosity changes of the ice ridge keel. Approximation is performed in zone II

будет повышаться. Поэтому первая зона простирается от нижней границы кила (нулевое расстояние от края кила) до удаления, на котором средняя пористость достигает максимума. Характер изменения средней пористости на этом участке будет определяться распределением вертикального размера блоков льда на нижней границе кила. Максимальное значение средней пористости определим как начальную пористость  $\Theta_{нач}$ . Вторая зона характеризует уплотнение неконсолидированной части кила под действием силы Архимеда. Третья зона характеризуется увеличением разброса значений средней пористости с увеличением расстояния за счет уменьшения ко-



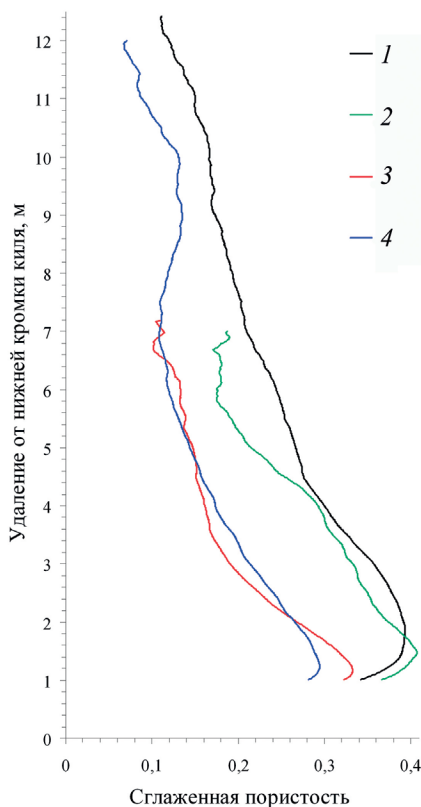


Рис. 4. Сглаженная осредненная пористость сыпучей среды, которой является неконсолидированный лед кила торосов различных регионов.

1 — Охотское море, 2 — Каспийское море, 2013 г., 3 — припай пролива Шокальского, 4 — Байдарцкая губа

Fig. 4. Depth-wise distributions of the averaged and smoothed porosity of the loose medium, a special case of which is broken keel ice.

1 — Sea of Okhotsk, 2 — Caspian Sea 2013, 3 — fast ice in the Shokal'skogo Strait, 4 — Baidaratskaya Bay of the Kara Sea

личества усредняемых данных, которое показывает кривая количества значений. При дальнейшем удалении от края кила начинают преобладать ступенчатые изменения пористости, которые обусловлены единичными усредняемыми распределениями.

Такие же зоны можно выделить и в парусе, но их протяженность будет отличаться из-за того, что блоки в парусе уплотняются под действием силы тяжести, которая существенно больше силы Архимеда. Тенденции изменения пористости с увеличением расстояния от края кила, характеризующиеся тремя выделенными зонами, присущи распределениям во всех рассматриваемых регионах. На рис. 3 приведена также аппроксимация распределения пористости в зоне II формулой (2) М.Н. Скачкова.

Для лучшего восприятия было решено сгладить распределения пористости скользящим средним с окном сглаживания два метра. На рис. 4 приведены для иллюстрации сглаженные распределения для нескольких регионов — Байдарцкой губы, Каспийского моря, шельфа о. Сахалин и пролива Шокальского.



Некоторые особенности приведенных на рис. 4 распределений требуют пояснений. Так, кривые пористости торосов Байдарацкой губы и пролива Шокальского несколько смещены в сторону меньших значений пористости. Необходимо учитывать особенности этих регионов. На осадку торосов Байдарацкой губы влияют мелководные участки, на которых при взаимодействии киля с дном происходит обламывание выступающих частей киля [14]; киль приобретает форму трапеции. Подобная трапециевидная форма киля наблюдается и у торосов в проливе Шокальского, но там торосы находятся в припае, и разрушение нижней части киля происходит под действием подледных течений. Моделирование распределения пористости с учетом этого разрушения киля показало, что в этом случае крутизна кривой, т. е. показатель экспоненты, практически не изменяется, а сама кривая смещается в сторону меньших значений пористости, что и можно наблюдать на рис. 4. К тому же кривая пористости для торосов пролива Шокальского в своей средней части сильнее выгнута в сторону меньших значений пористости. В данном случае заметно влияние эффекта, описанного в работах [15, 16] и объясняющего влияние проницаемости килей торосов для окружающей воды на уменьшение пористости неконсолидированной части киля. Этот эффект усиливается, особенно если торосы находятся в припае. Несколько несообразный вид кривой пористости торосов Каспийского моря 2013 г. определяется большим разбросом значений, т. к. по сравнению с другими кривыми объем осредняемых данных был существенно (как минимум в три раза) меньше, чем в остальных случаях.

Распределения пористости неконсолидированного киля как сыпучей среды рассмотрены для всех регионов, в которых проводились исследования, и разбиты по годам. Всего получилось 17 распределений, и каждое распределение было аппроксимировано согласно формуле (2) с учетом плотности воды в регионе и средней плотности льда. Таким образом, для каждого распределения были получены три значения — уплотняемость  $\kappa$ , нулевая и начальная пористости ( $\Theta_0$  и  $\Theta_{нач}$ ).

От чего может зависеть нулевая пористость? Проведенный анализ не выявил какой-либо значимой корреляции ее с другими параметрами строения торосов. Тем более что, как уже упоминалось, нулевая пористость зависит от условий дрейфа торосов, например мелководья. Более репрезентативна начальная пористость  $\Theta_{нач}$  (см. рис. 3). Не обнаружено также большой корреляции этой величины с другими параметрами тороса, но ее разброс существенно меньше, чем нулевой пористости  $\Theta_0$ . С вероятностью 90 % значение  $\Theta_{нач}$  лежит в интервале  $0,450 \pm 0,125$ . Другими словами, пористость в нижней части киля будет находиться в пределах  $0,32 \dots 0,58$ . В работе Г.А. Суркова [7] отмечено, что в торосах Охотского и Балтийского морей пористость части киля ниже КС растет с глубиной от 0,27 до 0,4–0,5. Согласно измерениям К. Хойланда [17], пористость в нижней части киля находится в пределах  $0,30 \dots 0,46$ . Наши данные достаточно хорошо совпадают с приведенными в этих работах величинами.

Несмотря на довольно большой разброс начальной пористости, с ростом расстояния от края киля кривые пористости сходятся к довольно узкому диапазону значений. Так, на расстоянии порядка 12–14 м этот диапазон составляет  $0,07 \dots 0,12$ .

В литературных источниках встречается информация, что пористость сыпучей среды зависит от соотношения длины и толщины отдельных элементов — чем выше это соотношение, тем пористость больше. На рис. 5 приведены результаты измерения пористости лабораторных торосов из [4], график из [2], результаты экспериментов

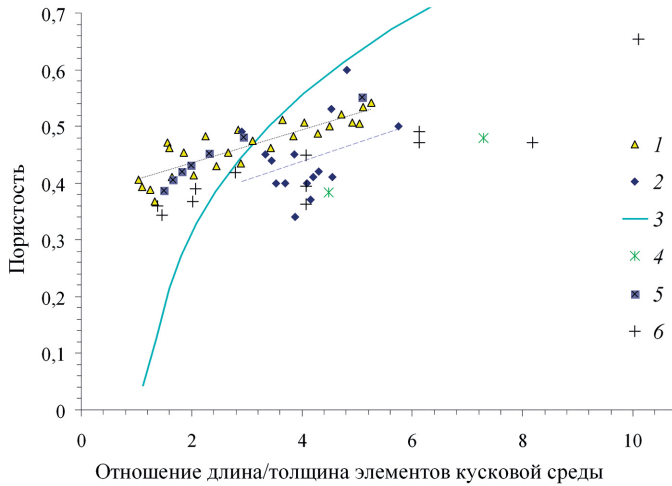


Рис. 5. Изменение пористости в зависимости от соотношения длины и толщины элементов кусковой среды.

1 — [4], 2 —  $\Theta_{нач}$ , 3 — [2], 4 — [18], 5 — [19], 6 — ЛЕГО (бруски)

Fig. 5. Change in the porosity versus “length/thickness” ratio of the lump medium elements.

1 — [4], 2 —  $\Theta_{нач}$ , 3 — [2], 4 — [18], 5 — [19], 6 — LEGO (bars)

из [18], результаты математического моделирования [19], результаты экспериментов с конструктором ЛЕГО. На диаграмме для сравнения добавлена также и начальная пористость  $\Theta_{нач}$ , хотя статистически значимая корреляционная связь между начальной пористостью и соотношением длины и толщины блоков отсутствует. Необходимо отметить, что в массиве значений опущена одна точка, соответствующая соотношению длина/толщина, равному 12,1, которому соответствует начальная пористость 0,63. Эти значения получены для торосов Азовского моря, однако ввиду крайне недостаточного количества осредняемых данных репрезентативность этой точки мала, хотя она вполне укладывается в общий тренд.

Необходимо иметь в виду, что в каждом лабораторном или модельном эксперименте [4, 18–19] все элементы были одного размера. В реальных условиях значение отношения длина/толщина — это среднее значение выборки. А также варьирует не только это значение, но и габаритные размеры блоков льда. За счет наличия в нагромождении торосистого льда целого спектра размеров и соотношений длина/толщина, пористость такой среды существенно меньше, чем в эксперименте. Тем не менее с некоторой осторожностью можно констатировать, что начальная пористость определяется неким параметром удлиненности блоков льда. Чем более вытянутые блоки льда, тем начальная пористость больше.

*Анализ уплотняемости кия*

Основной параметр, характеризующий распределение пористости в неконсолидированной части кия, — уплотняемость к. От уплотняемости зависит скорость убывания функции, аппроксимирующей кривую усредненной пористости в этой части кия (см. формулу (2)). Согласно полученным значениям уплотняемости, эта величина имеет разброс от  $1,4 \cdot 10^{-4}$  до  $6,8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}^{-1}$ , в среднем  $3,0 \cdot 10^{-4} \text{ Па}^{-1}$ .

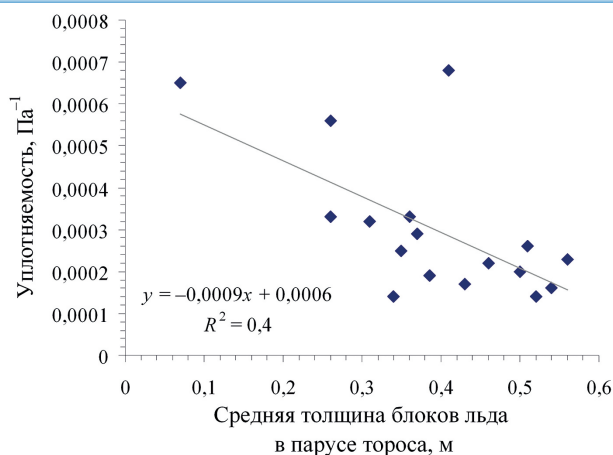


Рис. 6. Зависимость уплотняемости кила от средней толщины блоков льда в парусе торосов

Fig. 6. Dependence of the compactibility on the average thickness of ice blocks in the ice ridge sail

Рис. 6 иллюстрирует зависимость уплотняемости  $k$  от средней толщины блоков льда в парусе, которая является хорошим индикатором толщины торосающегося льда. Неожиданным является результат, из которого следует, что уплотняемость нагромождения обломков толстого льда невысока. Влияние толщины торосающегося льда на уплотняемость начинается примерно с 0,4 м и менее. Чем тоньше лед, тем уплотняемость кила выше, причем эта зависимость нелинейна.

Однако большой разброс точек, соответствующих примерно одинаковым толщинам блоков льда, показывает, что уплотняемость рассматриваемой сыпучей среды — кила — определяется, помимо толщины торосающегося льда, еще и другими его физическими свойствами.

Необходимо оговориться, что в настоящее время автору неизвестны достоверные подтверждающие исследования и вопрос может быть рассмотрен лишь гипотетически. Уплотняемость сыпучей среды, которой является битый лед кила, зависит от шероховатости внешней поверхности блоков льда, способности к обламыванию выступающих частей, разламыванию и крошению и т. п. Эти свойства определяются прочностью льда, которая напрямую зависит от его температуры в момент торосения, и кристаллическим строением.

Из механики сыпучих сред известно, что уплотняемость металлических порошков, к примеру, зависит главным образом от пластичности частиц и в меньшей степени от их размеров [20]. На уплотняемость наиболее сильно влияют свойства материала порошка: чем он пластичнее, тем лучше его уплотняемость [21]. К этому добавляется еще влияние формы их частиц. В работе [12] М.Н. Скачков приводит значение уплотняемости снега  $k_{\text{сн}} = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ Па}^{-1}$ . Уплотняемость, то есть податливость материала к уплотнению, у снега находится примерно на краю диапазона значений уплотняемости нагромождения блоков неконсолидированного льда в киле тороса. Другими словами, снег уплотняется гораздо хуже льда. Этот на первый взгляд парадоксальный результат объясним, т. к. известно, к примеру, что на уплотняемость наиболее сильно влияют свойства материала и форма сыпучих частиц: вследствие межчастичного трения грубые порошки уплотняются лучше тонких [21]. Порошки с широким спектром размеров

в области крупных частиц лучше прессуются. Аналогичный вывод при рассмотрении уплотняемости грунтов сделан в [22]. Морская вода, снижающая трение ледяных блоков в местах контактов, благоприятствует их уплотнению.

На пластичность льда оказывает влияние его температура [23, 24]. Чем выше температура льда, тем лед пластичнее. В то же время прочность льда уменьшается с повышением его температуры [24–26]. Однако следует иметь в виду, что влияние температуры льда на уплотняемость кия происходит не только посредством изменения прочности и пластичности льда, а, с большой вероятностью, за счет скорости смерзания блоков в месте контактов. Чем меньше температура льда, тем больший в нем запас холода и быстрее происходит смерзание блоков во время торошения.

Для изучения вопроса влияния на уплотняемость кия температуры торосящегося льда была выполнена оценка возраста торосов, исследованных в Байдарацкой губе в 2007 и 2010 гг., по соотношению мод распределений толщины блоков льда в парусе и толщины окружающего торосы ровного льда, а также оценка температуры воздуха в период предполагаемого торошения. Аналогичные оценки были сделаны для одного из торосов, исследованных автором в проливе Шокальского в 2016 г. Для каждого тороса Байдарацкой губы 2007 г. и тороса пролива Шокальского 2016 г. было построено распределение пористости неконсолидированного кия по вышеописанной методике и аппроксимировано формулой (2). Торосы 2010 г. были сгруппированы по предполагаемому возрасту, и для каждой группы также были построены распределения пористости и аппроксимированы формулой (2). В результате аппроксимации получены 13 значений уплотняемости  $k$  для построенных распределений. Связь уплотняемости  $k$  и предполагаемой температуры воздуха в период торошения приведена на рис. 7.

Будем исходить из того, что температура воздуха оказывает сильное влияние на среднюю температуру льда [27, 28], поэтому предполагаемая температура воздуха, приведенная на графике рис. 7, является хорошим индикатором для температуры льда.

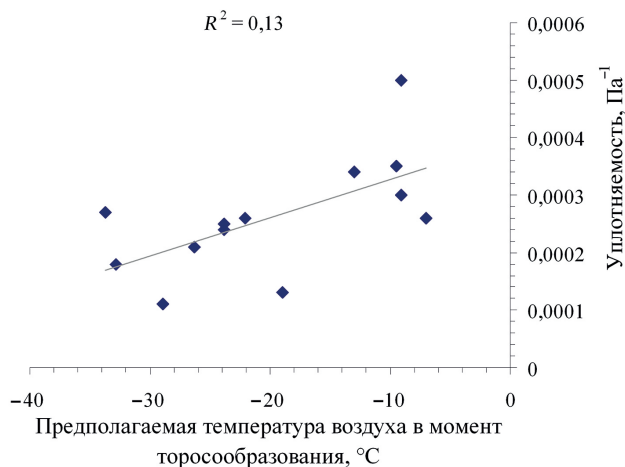


Рис. 7. Зависимость уплотняемости кия от предполагаемой температуры воздуха в момент торосообразования

Fig. 7. Dependence of the compactibility on the proposed air temperature at the moment of ice ridge formation

## ВЫВОДЫ

После выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Пористость неконсолидированной части кия торосов как сыпучей среды имеет тенденцию экспоненциально уменьшаться с глубиной.

2. Пористость неконсолидированной части кия торосов достигает максимальных значений на нижнем краю кия и находится с 90-процентной вероятностью в диапазоне  $0,450 \pm 0,125$ .

3. Чем больше соотношение длины и толщины блоков льда, образующихся при торошении, тем больше пористость нижней части кия торосов.

4. Уплотняемость неконсолидированной части кия как сыпучей среды изменяется в пределах от  $1,4 \cdot 10^{-4}$  до  $6,8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}^{-1}$ , в среднем  $3,0 \cdot 10^{-4} \text{ Па}^{-1}$ .

5. Уплотняемость кия в процессе торошения определяется прочностью торошащегося льда, которая, в свою очередь, определяется кристаллическим строением и средней температурой льда в момент торошения — чем теплее лед, тем уплотняемость выше.

**Конфликт интересов.** Автор статьи не имеет конфликта интересов.

**Финансирование.** Отсутствует.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность рецензенту данной статьи д-ру техн. наук К.Е. Сазонову за принципиальную позицию и непримиримость в отстаивании истины, которые вынудили автора признать ошибки и переработать статью.

**Competing interests.** The author has no competing interests.

**Funding.** Absent.

**Acknowledgments.** I kindly thank the reviewer of this article, Dr. K.E. Sazonov for his uncompromising stance and indefatigability in defending the truth, which led me to recognize mistakes and revise the manuscript.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leppäranta M.* The Drift of Sea Ice. 2nd ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 350 p.
2. *Гриценко В.Д.* Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Труды ААНИИ. 1988. Т. 401. С. 46–55.
3. *Бородачев В.Е., Гаврило В.П., Казанский М.М.* Словарь морских ледовых терминов. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 128 с.
4. *Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А.* Торосы и стамухи Охотского моря. СПб.: Пресс-Погода, 1997. 208 с.
5. *Høyland K.V.* Consolidation of first-year sea ice ridges // Journal of the Geophysical Research. 2002. V. 107 (C6), P. 15-1–15-15. doi: 10.1029 / 2000JC000526.
6. *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, 2001. P. 245–252.
7. *Surkov G.A.* Internal Structure of First-Year Hummocks // Proc. of the 11th (2001) ISOPE. Stavanger, Norway. June 17–22, 2001. V. 1. P. 796–798.
8. *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. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway. June 16–19, 2003. Trondheim, 2003. V. 2. P. 559–568.

9. Андреев О.М. Влияние вертикальной неоднородности заполнения кия тороса на скорость его промерзания // Лед и снег. 2013. № 53 (2). С. 63–68.
10. Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П., Литонов О.Е., Мансуров М.Н., Панов В.В., Трусков П.А. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа / Под ред. О.Е. Литонова и В.В. Панова. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 360 с.
11. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: экстремальные гидрологические события / Под ред. Хубларяна М.Г. М.: Наука, 2007. 381 с.
12. Олейников А.И., Скачков М.Н. Модель уплотняемых сыпучих тел и некоторые ее приложения // Моделирование систем. 2011. № 4 (30). С. 48–57.
13. Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений. М.: Недра, 1998. 208 с.
14. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Статистическая модель морфометрии гряды тороса в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 3 (89). С. 49–61.
15. 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. 2016. V. 122. P. 71–79.
16. Shestov A.S., Marchenko A.V. Thermodynamic consolidation of ice ridge keels in water at varying freezing points // Cold Reg. Sci. Technol. 2016. V. 121. P. 1–10.
17. Høyland K.V. Morphology and small-scale strength of ridges in the North-western Barents Sea // Cold Reg. Sci. Technol. 2007. V. 48. P. 169–187.
18. Rahli O., Tadrist L., Blanc R. Experimental analysis of the porosity of randomly packed rigid fibers // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Series IIB — Mechanics-Physics-Astronomy. 1999. V. 327 (8). P. 725–729.
19. Botton M., Azéma E., Estrada N., Radjai F., Lizcano A. Quasistatic rheology and microstructural description of sheared granular materials composed of platy particles // Physical Review E87, American Physical Society. 2013. V. 87 (3) P. 1–15.
20. Новые материалы в технике / Под ред. Тростянской Е.Б., Колачева Б.А., Сильвестровича С.И. и др. М.: Химия, 1964. 656 с.
21. Борисенко Н.И. Инструментальные твердые сплавы: Лабораторный практикум. М., 2009. 174 с.
22. Телешеев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Комаринский М.В. Производство гидротехнических работ. Ч. 1. Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы: Учебник для вузов. М.: Издательство АСВ, 2012. 488 с.
23. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед: Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
24. 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. V. 151. P. 196–207.
25. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 464 с.
26. Johnston M. A decade of probing the depths of thick multi-year ice to measure its borehole strength // Cold Reg. Sci. Technol. 2014. V. 99. P. 46–65.
27. Гайцхоки Б.Я., Спицын В.А. Некоторые результаты измерения температуры льда на дрейфующей станции «Северный полюс-13ф» // Труды ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 154–158.
28. Perovich D.K., Elder B.C. Temporal evolution of Arctic sea-ice temperature // Annals of Glaciology. 2001. V. 33. № 1. P. 207–211.

## REFERENCES

1. Leppäranta M. The Drift of Sea Ice, 2nd ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 350 p.



2. *Grishchenko V.D.* Morphometric characteristics of ice ridges in the Arctic Basin. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchnoy-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1988, 401: 46–55. [In Russian].
3. *Borodachev V.E., Gavrilov V.P., Kazansky M.M.* *Slovar morskikh ledovykh terminov*. Glossary of sea ice terms. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1994: 128 p. [In Russian].
4. *Astafyev V.N., Surkov G.A., Truskov P.A.* *Torosy i stamukhi Okhotskogo moray*. Ice ridges and stamukhas of the Sea of Okhotsk. St. Petersburg: Progress-Pogoda, 1997: 208 p. [In Russian].
5. *Høyland K.V.* Consolidation of first-year sea ice ridges. *Journal of Geophysical Research*. 2002, 107 (C6): 15-1–15-15. doi: 10.1029 / 2000JC000526.
6. *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: 245–252.
7. *Surkov G.A.* Internal structure of first-year hummocks. Proc. of the 11th (2001) ISOPE. Stavanger, Norway, June 17–22, 2001, 1: 796–798.
8. *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. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway, June 16–19, 2003. Trondheim: 2003, 2: 559–568.
9. *Andreev O.M.* Effect of vertical inhomogeneity of the ridge keel filling on its freezing rate. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (2): 63–68. [In Russian].
10. *Alekseev Iu.N., Afanas'ev V.P., Litonov O.E., Mansurov M.N., Panov V.V., Truskov P.A.* *Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniia morskikh mestorozhdenii nefi i gaza*. Ice engineering aspects of offshore oil and gas fields development. Ed.: Litonov O.E., Panov V.V. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001: 360 p. [In Russian].
11. *Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Liubushin A.A.* *Kaspiiskoe more: ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiia*. Caspian Sea: extreme hydrological events. Ed. by Khublarian M.G. Moscow: Nauka, 2007: 381 p. [In Russian].
12. *Oleinikov A.I., Skachkov M.N.* Model of compacted bulk solids and some of its applications. *Modelirovanie sistem*. System modeling. 2011, 4 (30): 48–57. [In Russian].
13. *Zheltoy Yu.P.* *Razrabotka nefiannykh mestorozhdenii*. Oil field development. Moscow: Nedra, 1998: 208 p. [In Russian].
14. *Mironov Ye.U., Porubayev V.S.* Statistical model of ice ridge morphometry in the southwestern part of the Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2011, 3 (89): 49–61. [In Russian].
15. *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.* 2016, 122: 71–79.
16. *Shestov A.S., Marchenko A.V.* Thermodynamic consolidation of ice ridge keels in water at varying freezing points. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2016, 121: 1–10.
17. *Høyland K.V.* Morphology and small-scale strength of ridges in the North-western Barents Sea. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2007, 48: 169–187.
18. *Rahli O., Tadrist L., Blanc R.* Experimental analysis of the porosity of randomly packed rigid fibers. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences — Series IIB — Mechanics-Physics-Astronomy*. 1999, 327 (8): 725–729.
19. *Boton M., Azéma E., Estrada N., Radjai F., Lizcano A.* Quasistatic rheology and microstructural description of sheared granular materials composed of platy particles. *Physical Review E87*, American Physical Society. 2013, 87: 1–15.



20. *Novye materialy v tekhnike*. New materials in technology. Ed. Trostianskaia E.B., Kolachev B.A., Sil'vestrovich S.I. et al. Moscow: *Khimiia*, 1964: 656 p. [In Russian].
21. *Borisenko N.I. Instrumental'nye tverdye splavy. Laboratornyi praktikum*. Tool hard alloys. Moscow, 2009: 174 p. [In Russian].
22. *Teleshev V.I., Vatin N.I., Marchuk A.N., Komarinskii M.V. Proizvodstvo gidrotekhnicheskikh rabot. Chast' I. Obshchie voprosy stroitel'stva. Zemlianye i betonnye raboty. Uchebnik dlia vuzov*. Production of hydraulic engineering works. Part 1. General construction issues. Earth and concrete works. Textbook for universities. Moscow: ASV, 2012: 488 p. [In Russian].
23. *Bogorodsky V.V., Gavrilov V.P. Led. Fizicheskie svoystva. Sovremennye metody glyatsiologii*. Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 384 p. [In Russian].
24. *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, 151: 196–207.
25. *Peschanskii I.S. Ledovedenie i ledotekhnika*. Ice science and ice equipment. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1967: 464 p. [In Russian].
26. *Johnston M.* A decade of probing the depths of thick multi-year ice to measure its borehole strength. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2014, 99: 46–65.
27. *Gaitskhoki B.Ia., Spitsyn V.A.* Some of the results of measuring the ice temperature at the drifting station «North Pole-13f». *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchnoy-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1970, 295: 154–158. [In Russian].
28. *Perovich D.K., Elder B.C.* Temporal evolution of Arctic sea-ice temperature. *Annals of Glaciology*. 2001, 33 (1): 207–211.