

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.326.7

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-385>

Оценка возраста гряд торосов в замерзающих морях

© 2019 г. Е.У. Миронов*, В.С. Порубаев

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*mir@aari.ru

Estimation of the age of ice hummocks in the freezing seas

E.U. Mironov*, V.S. Porubaev

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*mir@aari.ru

Received August 29, 2018 / Revised January 14, 2019 / Accepted 22 March, 2019

Keywords: *Arctic seas, consolidated layer, ice-covered seas, ice regime, ice ridges.*

Summary

A method of estimating the ice ridge age proposed in the 1990s was analyzed and some disadvantages of this method were shown. Analysis of the ice thickness distribution in the ice ridges demonstrated that in many cases the average value of the thickness used in the above mentioned method did not correspond to the thickness of an ice floe of which the ice blocks were formed. The ice floe thickness is characterized by the modal value of the ice thicknesses. After the ice ridge has been formed the ice block thickness in its above-water part does not change while the thickness of the ice floe on which the ice ridge is located continues to increase. Our study has shown that the difference between thickness of the plane ice and the modal value of the ice block thickness may be used as a characteristic of the ice growth for the period of the ice ridge existence. This period can be determined by one of the calculation formulas at the known initial and final ice thickness. Calculation by formula of the ice growth thickness make possible to derive the date of ice ridge formation based on the average air temperatures. The updated method of estimating the time of ice ridge formation can be used for the ice-covered seas. Analysis of the estimated ice ridge ages showed a significant dependence of thickness of the minimal consolidated layer on the time of the ice ridge formation. A comparative analysis of (the) ages of ice ridges and the flexural strength of ice samples made it possible to determine important tendency – the increased ice strength in ice ridges of early formation. This allows us in further studies to derive a formula of relationship between an ice ridge age and a strength of its ice. In some cases the ice strength measurement in ice ridges can be replaced by a less laborious estimating of strength basing on data of the age.

Citation: Mironov E.U., Porubaev V.S. Estimation of the age of ice hummocks in the freezing seas. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 59 (3): 355–362. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-385>.

Поступила 29 августа 2018 г. / После доработки 14 января 2019 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.

Ключевые слова: *арктические моря, гряды торосов, замерзающие моря, консолидированный слой, ледовый режим.*

Предложен уточнённый способ определения возраста гряды торосов на основе сравнения модальной толщины блоков льда, слагающих её надводную часть, и толщины поля ровного льда, на котором расположена гряда в момент измерений. Возраст гряды торосов связан с толщиной консолидированного слоя. Установлена важная тенденция – для торосов раннего образования характерна повышенная прочность льда на изгиб.

Введение

В связи с активным освоением континентального шельфа в арктических и замерзающих морях в последние два десятилетия стали активно вести исследования морского льда, который представляет собой основной фактор воздействия на гидротехнические сооружения [1]. Особое внимание уделялось исследованиям мор-

фометрических характеристик ледяных образований, физико-механических свойств льда и динамики ледяного покрова [2–5]. Уже в первые годы освоения месторождений шельфовых морей стало понятно, что существующих знаний о ледовом режиме морей недостаточно. Необходимо было детализировать сведения об особенностях пространственно-временной изменчивости различных параметров ледяного покрова в локаль-

ных районах, определить и уточнить связи между различными характеристиками ледяных объектов.

При проектировании и строительстве объектов обустройства углеводородных месторождений необходимо учитывать потенциальные ледовые нагрузки, которые могут возникать от воздействия ледяных полей с мощными грядами торосов. Величина ледовой нагрузки зависит от геометрических размеров гряд торосов, прочности их льда, а также толщины консолидированного слоя. Возраст гряды тороса может быть косвенной характеристикой прочности льда гряд торосов, при этом его оценка — менее трудоёмкая процедура по сравнению с определением прочности ледяного образования. Цель настоящего исследования — разработка более детального способа определения возраста гряд торосов, что в дальнейшем позволит по этой характеристике косвенно оценивать прочность и толщину консолидированного слоя гряд торосов. Это будет способствовать более детальному изучению ледового режима локальных районов.

Впервые способ определения возраста торосов был предложен в работе С.П. Бекецкого [6] по данным наблюдений в Охотском море. В основу способа положено предположение, что толщина ледяных блоков, составляющих надводную часть гряды тороса (парус), не увеличивается с момента его образования. В этом способе возраст тороса определяется по нарастанию толщины ровного льда за период с момента образования тороса до момента проведения измерений толщины ледяных блоков. В расчёте используются средняя толщина ледяных блоков тороса и толщина ровного льда, окружающего торос в момент измерения параметров тороса. Кроме того, учитывается число градусо-дней мороза, которое определило величину нарастания ровного льда за этот период. Расчёты позволяют установить время образования гряды тороса, по которому и оценивается её возраст. Способ, предложенный С.П. Бекецким, имеет один существенный недостаток: средняя толщина ледяных блоков в большинстве случаев отличается от толщины ровного льда во время образования гряды тороса. Это объясняется тем, что вклад в среднюю толщину блоков дают сморозы отдельных льдин и блоки, образовавшиеся при повторном торосении льда замёрзшего разводья возле гряды тороса.

При расчёте возраста гряды тороса необходимо использовать модальную толщину ледяных блоков, которая указывает на толщину ледяного поля при торосообразовании, так как наибольшую повторяемость имеет градация толщины ледяных блоков, образовавшихся при деформации данного ледяного поля. Иногда распределение имеет две или три моды. В этом случае мода, соответствующая толщине ледяного поля, определяется при анализе распределения толщины ледяных блоков. Кроме того, необходимо, как указывалось ранее, определить нарастание толщины ровного льда за период существования гряды тороса. Расчёт толщины ровного льда возможен как с использованием термодинамических моделей, так и на основе эмпирических формул.

Термодинамическое моделирование ледяного покрова получило широкое развитие в 1960–70-е годы с появлением ЭВМ. Математические модели формирования ледяного покрова на протяжении предшествующих десятилетий рассматриваются во многих работах. Из работ, имеющих отношение к данной теме, можно привести статьи [7–10], где представлены модели, которые позволяют рассчитать толщину ровного льда, описать формирование гряд торосов, дают возможность оценить его консолидированный слой. В нашем случае предпочтительнее использовать полуэмпирические зависимости, так как возраст торосов необходимо оценивать в локальных районах и в полевых условиях.

Методика исследований

Распределение толщины ледяных блоков в парусе гряды тороса. Гряды торосов образуются в дрейфующем ледяном покрове, когда в движение вовлекается большая масса сплочённого льда. Неравномерность скорости дрейфа приводит к возникновению сжатий в ледяном покрове, в результате ледяные поля разрушаются и образуются гряды торосов. Они начинают формироваться в ледяном покрове главным образом, когда ледяные поля достигают возраста серо-белого льда толщиной 15–30 см. При сжатиях в ледяном покрове толщиной 10–15 см преобладают процессы наложения льда. Опыт исследования гряд торосов показал, что в арктических и замерзающих морях преобладает одномодальное распределение

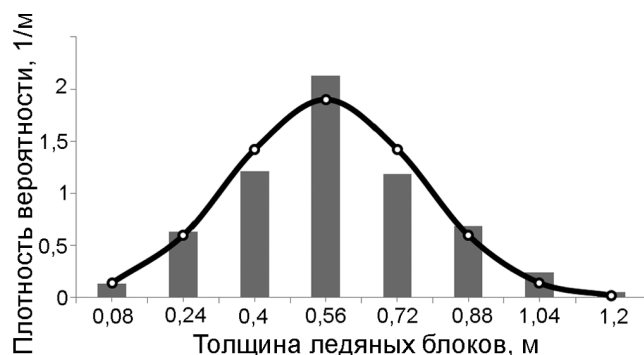


Рис. 1. Плотность вероятности толщины ледяных блоков, слагающих парус гряды тороса.

Гистограмма — эмпирические значения, кривая — теоретические значения

Fig. 1. Distribution of the thickness probability density of ice blocks, comprising the ice ridge sail.

Histogram — empirical values, curve — theoretical values

толщины ледяных блоков и именно мода определяет толщину ледяного поля во время торосения. В качестве примера на рис. 1 показан график плотности вероятности толщины ледяных блоков по данным измерений в Байдарацкой губе Карского моря весной 2010 г. [11].

Распределение рассчитано по данным, полученным на нескольких грядах торосов. Группа гряд торосов сформировалась на относительно небольшой площади ледяного покрова в одинаковых ледовых и гидрометеорологических условиях, что позволило рассматривать данные по толщине ледяных блоков как единое множество. Данное распределение хорошо описывается логнормальной функцией

$$f(x) = \frac{1}{bx\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - a)^2}{2b^2}\right).$$

Параметры a и b логнормальной функции распределения связаны с математическим ожиданием m и коэффициентом вариации C :

$$a = \ln \frac{m}{\sqrt{1+C^2}}, \quad b = \sqrt{\ln(1+C^2)}.$$

Этой же функцией хорошо описывается плотность вероятности и других характеристик ледяных образований в арктических и замерзающих морях (Каспийское, Охотское) — высоты парусов, глубины килей гряд торосов [12, 13]. Плотность вероятности толщины ледяных блоков имеет положительную асимметрию (см.

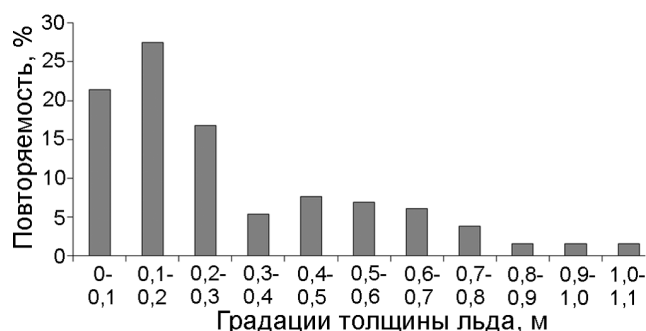


Рис. 2. Гистограмма распределения толщины ледяных блоков в парусе тороса

Fig. 2. Histogram of the thickness distribution of ice blocks in the ice ridge sail

рис. 1). Сморози ледяных блоков вносят существенный вклад в правую часть распределения, и она оказывается длиннее части распределения, расположенной левее центра группирования. Средняя толщина ледяных блоков равна 60 см, а модальная толщина составляет 56 см, что соответствует толщине ледяного поля. В данном случае отличие средней толщины ледяных блоков от модального значения незначительно, но встречаются случаи, когда среднее значение существенно отличается от моды.

На рис. 2 показана гистограмма распределения толщины ледяных блоков в парусе тороса, исследованного в Байдарацкой губе Карского моря в 2010 г. Как видно из рис. 2, распределение имеет две моды. Первая мода находится в градации 0,1–0,2 м, вторая — в градации 0,4–0,5 м. *Первая мода* толщины ледяных блоков соответствует толщине льда замёрзшего разводья возле гряды тороса. Подобные разводья нередко появляются после формирования гряды тороса, а при повторном сжатии их лёд разрушается, образуя блоки тонкого льда. Такие ледяные блоки преобладают по количеству, однако из-за небольших размеров суммарный объём их льда сравнительно невелик. *Вторая мода* распределения указывает на толщину ледяного поля спокойного термического нарастания, из которого образовалась гряда тороса. Вклад в распределение толщины вносили также и сморози льда.

Наблюдения показали, что монолитными были ледяные блоки с толщиной до 60 см. Более толстые ледяные блоки представляют собой сморози нескольких ледяных блоков. После образования гряды тороса толщина ледяных бло-

ков в парусе не изменяется, в то время как толщина ледяного поля, на котором расположена гряда, продолжает увеличиваться. Средняя толщина ледяного поля в момент исследования параметров гряды тороса определяется по данным измерений толщины ровного льда возле гряды тороса. Разность между толщиной ровного льда и модальным значением толщины ледяных блоков даёт величину нарастания льда за период существования гряды тороса.

Определение толщины льда спокойного термического нарастания. Для измерения толщины ровного льда выбирается полигон на некотором расстоянии от торосов, так как вблизи торосов ледяной покров часто деформирован. Согласно методике измерений, полигон размечается в виде треугольника со сторонами 25 м. Толщина льда измеряется в скважинах через 5 м. Выполнено 15 измерений. При необходимости иметь большее число измерений сторона треугольника увеличивается до 50 м. В этом случае толщина льда определяется с помощью специального механического измерителя, который поддерживается на тросе, погружается в скважину и прижимается своей плоскостью к нижней поверхности льда. Точность измерения — 1–2 см. Выполняется несколько измерений, а толщину ледяного поля характеризует среднее значение толщины льда на полигоне.

К моменту исследования параметров гряды тороса в Байдарацкой губе Карского моря в 2010 г. толщина полей ровного льда составляла 140 см, а при образовании рассматриваемой гряды тороса она была равна 45 см. Прирост толщины ровного льда составил 95 см. Такое нарастание обусловлено преимущественно суммой градусо-дней мороза за прошедший период. Полученные данные позволяют определить дату образования гряды тороса.

Определение даты образования гряды тороса. Толщина ледяных блоков, слагающая надводную часть тороса, — один из основных индикаторов даты образования гряды тороса. Установить время формирования гряды тороса можно с помощью архива ледовых карт. По ним определяется дата, когда ледяной покров в месте формирования тороса имел толщину, равную модальной толщине ледяных блоков гряды тороса. Для выяснения места формирования тороса необходим анализ поля фактического дрей-

фа льда. Такой способ может давать большую ошибку, так как ледовые карты показывают возраст льда, которому соответствует определённая градация толщины. По возрасту льда можно определить лишь диапазон толщины льда, что может быть источником ошибки при оценке конкретной толщины ровного льда.

Дату торосообразования можно определить также на основании расчёта периода времени от начала ледообразования до даты, когда толщина ледяного поля будет равна толщине ледяных блоков. Однако в этом случае точность определения даты начала ледообразования невелика и расчёты также могут иметь большую погрешность. Более приемлемое определение даты торосообразования — способ, основанный на расчёте периода времени от момента торосообразования до момента исследования гряды тороса. Этот период определяется при использовании модальной толщины ледяных блоков, средней толщины ледяного поля и температуры воздуха за этот период. Теплофизические характеристики льда и снега, по которым рассчитывается увеличение толщины ледяного поля, учитываются путём использования эмпирического коэффициента. Температура воздуха устанавливается по данным ближайшей гидрометеорологической станции или используются данные реанализа температуры воздуха. По продолжительности рассчитанного периода находится дата формирования гряды тороса.

При определении даты формирования гряд торосов необходимо учитывать особенности ледового режима конкретного района моря. Например, для восточного шельфа о. Сахалин характерен устойчивый однонаправленный дрейф льда с севера на юг вдоль побережья [2]. Многие гряды торосов, исследованные на восточном шельфе о. Сахалин, образовались в Охотском море к северу от района исследования и появились здесь в результате дрейфа льда.

В арктических морях преобладает ветровой дрейф льда, который в зависимости от синоптической ситуации меняет свое направление. Поэтому здесь место образования гряд торосов в пределах одного холодного сезона расположено не так далеко от места, где исследуются гряды, а температура воздуха в локальном районе будет практически одинаковой. Способ оценки возраста относится к грядам торосов, образовав-

шихся в текущем ледовом сезоне. Двухлетние гряды торосов в арктических морях встречаются редко, и для них достаточно указать, что они уже прошли один период таяния.

Нередко в расчётах для отдельных пунктов используют эмпирические зависимости толщины льда от температуры воздуха. Для расчёта толщины льда на пространствах арктических морей можно использовать формулу Н.Н. Зубова [14], в основу которой положены сумма градусо-дней мороза за период нарастания льда и начальная толщина ледяного покрова. Однако расчёт по формуле Зубова ведётся без учёта снежного покрова. Формулы Ю.П. Доронина [15] и В.А. Спичкина [16] имеют общее физическое обоснование. Толщина льда при этом определяется температурой воздуха, толщиной снега и теплофизическими характеристиками льда и снега, но в формуле Доронина не учитывается пространственно-временная изменчивость теплопроводности снега.

Хорошие результаты по расчёту толщины льда даёт формула В.А. Спичкина. Эта формула на протяжении десятилетий использовалась в практике и показала хорошие результаты расчёта толщины ровного льда. Среднее отклонение расчётных значений от фактических для максимальной толщины льда за сезон на разных морских гидрометеорологических станциях находится в диапазоне 5–10 см с разным знаком. Формула В.А. Спичкина имеет следующий вид:

$$h_{\text{л}} = -m + \sqrt{(m + h_0)^2 - 405 \sum_{i=0}^1 \overline{T_a}}. \quad (1)$$

Толщина льда $h_{\text{л}}$ рассчитывается с использованием среднемесячной температуры воздуха $\overline{T_a}$, начальной толщины льда h_0 и эмпирического коэффициента m . Коэффициент m учитывает средний сезонный ход толщины и теплопроводности снежного покрова и льда в зависимости от конкретного района моря. Формула (1) позволяет рассчитывать толщину льда на любой момент осенне-зимнего сезона в арктических морях. При начальной толщине льда спокойно-го термического нарастания равной 45 см толщина ледяного поля, на котором расположена гряда тороса, составила 140 см. Подставляем в формулу $h_{\text{л}} = 140$ см, $h_0 = 45$ см и рассчитываем сумму средних температур, при которой равенство (1) выполняется. Далее — по данным метеостанций —

переходим к дате. Расчёты показали, что гряда тороса образовалась в середине декабря 2009 г.

После образования гряды тороса ледяные блоки ниже уровня воды смерзаются, формируя консолидированный слой. К концу холодного сезона многие гряды торосов имеют разную толщину консолидированного слоя. Толщина его нарастает под воздействием отрицательных температур воздуха и зависит от продолжительности существования гряды тороса. Чем раньше образовалась гряда тороса, тем больше в ней будет толщина консолидированного слоя. Отметим, что на рост толщины консолидированного слоя влияют и другие факторы [17], поэтому гряды торосов, образовавшиеся одновременно, могут иметь разную толщину консолидированного слоя. Это также необходимо учитывать при оценке толщины консолидированного слоя гряд торосов.

Результаты исследований

Зависимость толщины консолидированного слоя гряды тороса от даты его образования.

Практически во всех случаях ледяные блоки, вмёрзшие в консолидированный слой, выходят за его поверхность. За счёт таких блоков толщина консолидированного слоя увеличивается. Такое увеличение происходит не за счёт термического фактора, а за счёт длины и толщины замороженных в слой ледяных блоков. Значение толщины консолидированного слоя по данным термобурения, когда бур проходит между блоками, соответствует толщине, сформировавшейся под действием термического фактора. В большинстве случаев это — минимальные значения толщины консолидированного слоя по данным термобурения. Чем раньше образовалась гряда тороса, тем больше в нём толщина консолидированного слоя, сформированная за счёт термического фактора. На рис. 3 показана зависимость минимальной толщины консолидированного слоя от времени образования гряды тороса по данным экспедиционных работ в Байдарацкой губе Карского моря весной 2010 г.

Анализ рис. 3 показывает, что зависимость толщины консолидированного слоя от даты образования гряды тороса хорошо аппроксимируется линейным законом. Коэффициент корреляции зависимости достаточно высокий и

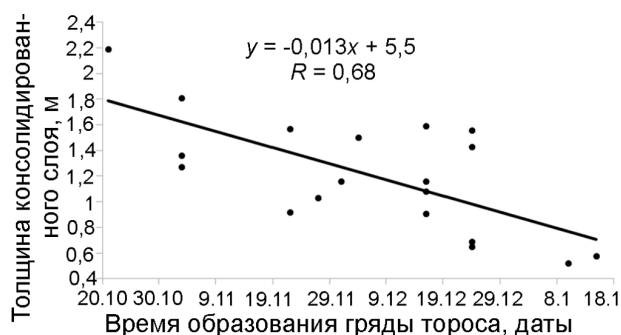


Рис. 3. Зависимость толщины консолидированного слоя от времени образования гряды тороса

Fig. 3. Dependence of the consolidated layer thickness on the time of ice ridge formation

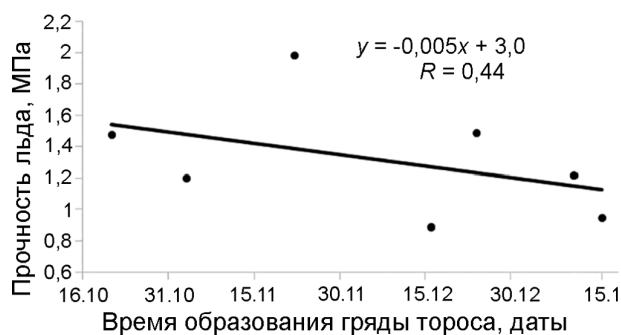


Рис. 4. Зависимость прочности на изгиб гряды тороса от времени его образования

Fig. 4. Dependence of the flexural strength of ice ridge on the time of its formation

равен 0,68. Гряды торосов, сформировавшиеся в конце холодного сезона, имеют толщину консолидированного слоя меньше, чем толщина льда спокойного термического нарастания, что вполне ожидаемо. Гряды торосов, которые образовались в начале холодного сезона, имеют толщину консолидированного слоя больше толщины ровного льда. Это объясняется тем, что консолидированный слой расположен в основном в киле гряды тороса. Из-за невысокой пористости киле объём воды в нём сравнительно невысокий. Поэтому промерзание в грядах торосов раннего образования проникает на несколько большую глубину по сравнению с промерзанием в районе ровного льда. При этом чем больше киль гряды тороса, тем на большую глубину будет распространяться промерзание в киле.

Сравнительный анализ возраста торосов и прочности льда. Прочность льда рассмотрим на примере гряд торосов, исследованных в Байдарской губе в мае 2010 г. Существуют различные характеристики прочности льда. В данном случае рассматривается прочность на изгиб образцов льда [18]. Образцы брались в последовательных слоях льда в гряде тороса от поверхности воды до глубины около 1 м. Прочность льда зависит от его структурных особенностей. В образцы попадал главным образом консолидированный слой гряд торосов, который также имеет структурную неоднородность.

Существует несколько факторов, от которых зависит прочность льда гряды тороса. Прочность образцов изменяется в широких пределах и зависит как от условий нарастания ровного льда, из которого потом образуются ледяные блоки,

так и от условий формирования консолидированного слоя гряды тороса. При торосообразовании ледяные блоки и вновь замёрзшая морская вода между блоками формируют консолидированный слой. Один из существенных факторов, от которого зависит прочность гряды тороса, — солёность льда. В ледяных блоках солёность будет меньше, так как соль с течением времени покидает лёд, а в недавно замёрзшей воде соли больше. Различное содержание соли, наряду с другими факторами, создаёт изменение прочности консолидированного слоя по пространству. Чем дольше существует гряда тороса, тем меньше будет средняя солёность его льда. При уменьшении солёности льда прочность его увеличивается. Максимальная прочность будет в тех слоях льда, где солёность наименьшая при прочих равных условиях. Поэтому следует ожидать повышенную прочность гряд торосов раннего образования. На рис. 4 показана максимальная прочность льда на изгиб в зависимости от даты образования гряды тороса.

Хотя данных мало и связь прочности льда на изгиб с датой образования гряды тороса невысокая при коэффициенте корреляции равном 0,44, но зависимость ледовой характеристики от даты торосообразования прослеживается. Для прочности льда при сжатии такую связь обнаружить не удалось. Основные причины этого — неоднородность льда, сформированная под воздействием нескольких факторов, влияющих на прочность. Кроме того, большую роль играет время определения прочности льда. В нашем случае прочность определялась в мае, когда начались процессы таяния льда и изменения текстуры льда. Образцы

льда отбирали из скважин и поднимали на поверхность. Во время определения их прочности они подвергались солнечному воздействию, что изменяло их температуру и влияло на прочность.

Выводы

Предложен уточнённый способ оценки возраста гряды тороса для определения времени формирования ледяного образования с помощью простых измерений и расчётов. На основе данных по возрасту гряд торосов с применением

эмпирического соотношения можно оценивать толщину консолидированного слоя гряды тороса. Показано, что существует возможность получить зависимость между возрастом гряды тороса и прочностью его льда; это важно при расчётах ледовых нагрузок на сооружения.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60109/18.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-05-60109/18.

Литература

1. Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П., Литонов О.Е., Мансуров М.Н., Панов В.В., Трусков П.А. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 360 с.
2. Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А. Торосы и стамухи Охотского моря. СПб.: Изд-во «Прогресс-Погода», 1997. 185 с.
3. Timco G.W., Burden R.P. An analysis of the shapes of sea ice ridges // Cold Region Science and Technology. 1997. V. 25. P. 65–77.
4. Frederking R., Timco G.W., Kamesaki K., Tada H. Review of first-year ridge geometries and properties in Sakhalin region. // Proc. of the Intern. Workshop on Rational Evaluation of Ice Forces on Structures. Mombetsu, Japan, 1999. P. 21–33.
5. Ледяные образования морей Западной Арктики / Ред. Г.К. Зубакин. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
6. Beketsky S.P. Method of hummock age determination // Proc. of the 14th Intern. symposium on ice. Ice in Surface Waters. Rotterdam: Balkema, 1998. P. 357–359.
7. Андреев О.М. Термодинамическое моделирование эволюции торосистых образований в Арктическом бассейне // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 69–74.
8. Андреев О.М., Иванов Б.В. Применение одномерной термодинамической модели для расчета толщины ровного льда и интенсивности промерзания торосов для условий Северного Каспия // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 50–56.
9. Марченко А.В. Влияние консолидации торосов на тепловые потоки из океана в атмосферу // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 150–164.
10. Hoyland K.V. Simulations of the consolidations process in first-year ice ridges // Cold Regions Science and Technology. 2002. № 34. P. 143–158.

References

1. Alexeev U.N., Afanas'ev V.H., Litonov O.E., Mansurov M.N., Panov V.V., Truskov P.A. Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniya morskikh mestorozhdeniy nefi i gaza. Ice engineering aspects of offshore oil and gas fields development. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001: 360 p. [In Russian].
2. Astaf'ev V.N., Surkov G.A., Truskov P.A. Torosy i stamukhi Okhotskogo morya. Ice ridges and stamukhas of Okhotsk Sea. Saint Petersburg: «Progress-Pogoda», 1997: 185 p. [In Russian].
3. Timco G.W., Burden R.P. An analysis of the shapes of sea ice ridges. Cold Region Science and Technology. 1997, 25: 65–77.
4. Frederking R., Timco G.W., Kamesaki K., Tada H. Review of first-year ridge geometries and properties in Sakhalin region. Proc. Intern. Workshop on Rational Evaluation of Ice Forces on Structures. Mombetsu, Japan, 1999: 21–33.
5. Ledyanye obrazovaniya morey Zapadnoy Arktiki. Ice formations in the seas of the Western Arctic. Saint Petersburg: AARI, 2006: 272 p. [In Russian].
6. Beketsky S.P. Method of hummock age determination. Proc. Intern. 14th symposium on ice. Ice in Surface Waters. Rotterdam, Balkema, 1998: 357–359.
7. Andreev O.M. Thermodynamic modeling of the evolution of hummock formations in the Arctic basin. Led i Sneg. Ice and Snow. 2011, 1 (113): 69–74. [In Russian].
8. Andreev O.M., Ivanov B.V. Application of a one-dimensional thermodynamic model for calculating the thickness of level ice and the intensity of frost penetration of ice ridges for the conditions of the Northern Caspian. Meteorologiya i Gidrologiya. Meteorology and Hydrology. 2012, 1: 50–56. [In Russian].
9. Marchenko A.V. The impact of the consolidation of hummocks on heat flows from the ocean to the atmosphere Trudy AANII. Proc. of the AARI. 2003, 446: 150–164. [In Russian].
10. Hoyland K.V. Simulations of the consolidations process in first-year ice ridges. Cold Regions Science and Technology. 2002, 34: 143–158.
11. Mironov E.U., Smirnov V.N., Turiakov A.B., Verbitskaya O.A. The study of ice formations and characteristics of plowing

11. Миронов Е.У., Смирнов В.Н., Тюряков А.Б., Вербицкая О.А. Исследование ледяных образований и параметров экзарации морского дна в Байдарацкой губе для обеспечения строительства подводного трубопровода // Тр. 10-й Междунар. конф. RAO'11. СПб. Химиздат, 2011. С. 185–190.
12. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Морфометрические параметры торосов и стамух по данным экспедиционных исследований в северо-западной части Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 68–76.
13. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Статистическая модель морфометрии гряды тороса на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Лёд и Снег. 2012. № 3 (119). С. 67–72.
14. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: изд. Главсевморпути, 1945. 360 с.
15. Доронин Ю.П. Тепловое взаимодействие атмосферы и гидросферы в Арктике. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 299 с.
16. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А. Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 348 с.
17. Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Миронов Е.У., Гузенко Р.Б., Харитонов В.В. Особенности развития консолидированного слоя гряд торосов в морях Карском и Лаптевых // Нефтяное хозяйство. 2016. № 11. С. 49–54.
18. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М., Шейкин И.Б. Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения. СПб.: АНИИ. 2011. 178 с.
- of the seabed in Baidaratskaya lip for the construction of underwater pipeline. *Trudy 10 Mezhdunarodnoy konferentsii RAO'11*. Proc. of the 10th RAO'11 intern. confe. Saint Petersburg: Khimizdat, 2011: 185–190. [In Russian].
12. Mironov E.U., Porubaev V.S. Morphometric parameters of ice ridges and stamukhas according to field research in the North-Western part of the Caspian Sea. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2011, 5: 68–76. [In Russian].
13. Mironov E.U., Porubaev V.S. A statistical model of morphometry of the ice ridges on the North East Sakhalin shelf. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 3 (119): 67–72. [In Russian].
14. Zubov N.N. *L'dy Arktiki*. The Arctic Ice. Moscow: Glavsevmorput', 1945: 360 p. [In Russian].
15. Doronin Yu.P. *Teplovoe vzaimodeystvie. atmosfery i gidrosfery v Arktike*. Thermal interaction of the atmosphere and hydrosphere in the Arctic. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1969: 299 p. [In Russian].
16. Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev E.G., Smetannikova V.A., Spichkin V.A. *Ocnovy metodiki dolgosrochnykh ledovykh prognozov dlya arkticheskikh morey*. Fundamentals of the methodology for long-term ice forecasts for the Arctic seas. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1972: 348 p. [In Russian].
17. Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov, Y. O., Mironov E.U., Guzenko, R.B., Kharitonov V.V. Features of development of the consolidated layer of ice ridges in the Kara and Laptev seas. *Neftyanoe Khozyaystvo*. Oil Industry. 2016, 11: 49–54. [In Russian].
18. Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Kovalev S.M., Sheykin I.B. *Metodicheskoe posobie po izucheniyu fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik ledyanykh obrazovaniy kak iskhodnykh dannyykh dlya rascheta ledovykh nagruzok na berega, dno i morskije sooruzheniya*. Methodical manual on the study of physical and mechanical characteristics of ice formations as initial data for the calculation of ice loads on the shore, bottom and sea structures. Saint Petersburg: AARI, 2011: 178 p. [In Russian].