

**Влияние потепления климата на прочностные характеристики льда в Обской губе**

© 2019 г. О.М. Андреев, Д.В. Драбенко\*, Р.А. Виноградов, Е.Ю. Орлова

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

\*dimmnecro@mail.ru

**Influence of climate warming on the strength characteristics of ice in the Ob Bay**

O.M. Andreev, D.V. Drabenko\*, R.A. Vinogradov, E.U. Orlova

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

\*dimmnecro@mail.ru

*Received October 30, 2018 / Revised February 6, 2019 / Accepted March 22, 2019***Keywords:** *Arctic, climate warming, gulf of Ob, ice strength characteristics, ice thickness.***Summary**

The article presents results of investigation of the climate warming effects in the northern polar region of the Earth, in particular on some characteristics of ice in the northern part of the Ob Bay (the area of the most active economic activity of the Russian Federation in the last decade). It is determined that over the past 40 years, morphometric and strength characteristics of ice have significantly changed. Estimates of ice thickness obtained using simple empirical formulas (depending on the sum of the degree-days of frost) show that the ice thickness decreased here by an average of 10–15%. The strength characteristics of ice were analyzed for two periods: the maximum strength of ice (for this area it is March) and the maximum development of ice thickness (usually it is May). It was found that the strength properties of ice (bending and compression) for both periods decreased by 10–12%. Thus, in recent decades, under the influence of climate warming in the Ob Bay, the thickness and strength of the ice cover have significantly decreased. This circumstance will be favorable for further development of the considered water area by Russian oil and gas companies.

**Citation:** Andreev O.M., Drabenko D.V., Vinogradov R.A., Orlova E.U. The influence of climate warming on the strength characteristics of ice in the Ob Bay. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (4): 539–545. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-409>.

*Поступила 30 октября 2018 г. / После доработки 6 февраля 2019 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.***Ключевые слова:** *Арктика, Обская губа, потепление климата, прочностные характеристики льда, толщина льда.*

Рассматриваются изменения прочностных и морфометрических характеристик припайного льда в Обской губе за последние 30–40 лет. Используются расчётные метеорологические характеристики, полученные по наблюдениям регулярной сети Росгидромета России. Установлено, что в Обской губе толщина припайного льда уменьшилась на 10–15%, а его прочностные характеристики снизились на 10–12%.

**Введение**

Вопросы изменения климата и его влияния на окружающую среду, условия жизни человека и его деятельность весьма актуальны в мире. Эти изменения могут иметь как отрицательный характер (с соответствующим ухудшением внешних условий), так и положительный (с улучшением условий). Всё зависит от рода хозяйственной деятельности человека и региона земного шара. В настоящее время считается доказанным, что за последние десятилетия в Арктике (как и во всём Северном полушарии) произошли серьёзные климатические изменения, вызванные так называемым «глобальным потеплением» [1–3]. Согласно оценкам работы [2], средняя температура воздуха Северного

полушария с 1971 по 2000 г. повысилась на 0,7–0,8 °С. Для Арктического региона эти изменения ещё более заметны – местами до 3,0 °С.

По существующим оценкам [4–6], в эти годы значительно уменьшалась толщина арктических морских льдов. С 1970 по 2000 г. средняя толщина арктического льда снизилась с 3,5 до 1,8 м [4, 5]. Отмечается также [7], что в последние десятилетия сезонный ледяной покров даже в Центральной Арктике начинает доминировать над многолетним. В связи с этим возникают вопросы: насколько это потепление сказывается в региональном масштабе (например, Обь-Енисейский регион) и насколько текущие изменения климата могут сыграть положительную роль при хозяйственном освоении северных территорий России.

## Постановка проблемы

Интерес к оценке изменения прочностных и морфометрических свойств припайного льда Обской губы связан в первую очередь с тем, что в последнее десятилетие здесь началась активная деятельность нефтегазовых компаний по вывозу углеводорода морским путём. Однако даже в условиях современного климата у мощных нефтегазовозов иногда возникают серьёзные проблемы с преодолением припайного льда в акватории Обской губы как при движении до порта отгрузки, так и у самих портовых сооружений. Отметим, что самая активная хозяйственная деятельность сосредоточена в северной части губы, где построен порт Сабетта; продолжается проектирование и строительство других портовых и добывающих объектов. Таким образом, в настоящее время наиболее актуальна оценка ослабления суровости условий именно для данного района — северной части Обской губы.

Устойчивое ледообразование в северной части Обской губы обычно происходит в конце сентября — октябре при средних сроках во второй декаде октября. Замерзание вдоль западного берега обычно несколько опережает аналогичные процессы у восточного берега. С развитием вдольберегового припая дрейфующий лёд отмечается только в районах губы с большими глубинами, вдали от берегов. Заканчивается период осеннего дрейфа льда установлением неподвижного (припайного) льда от берега до берега в ноябре. При этом в суровые зимы северная кромка припая устанавливается по мористой границе Обской губы или даже по ближайшим островам за её пределами. Разрушение ледяного покрова (ослабление прочности и уменьшение толщины) начинается в первой декаде июня. Взлом припая происходит в первой декаде июля. После этого плавучий лёд начинает дрейфовать и интенсивно разрушаться.

Наблюдения за ледовыми явлениями в северной части Обской губы выполнялись на пунктах стационарной сети (гидрометеорологические станции — ГМС Сеяха, Тадибеяха, Тамбей, Дровяной и др.) до начала 1990-х годов. Однако стандартные наблюдения, предусматривающие морфометрические измерения толщины льда и снега и наблюдения за ледовыми фазами, не включали в себя измерения проч-

ностных свойств льда. Сотрудники санно-тракторных поездов в пределах акватории Обской губы в 1970—80-х годах также не проводили специализированных наблюдений за прочностными характеристиками льда, ограничиваясь морфометрическими измерениями льда и торосистых образований. Эпизодические специализированные наблюдения за морфометрическими и прочностными характеристиками льда начались лишь с середины 2000-х годов по заказу приходящих в регион нефтегазовых компаний. Однако данные таких наблюдений часто разрозненны и противоречивы.

Таким образом, очевидно, что оценить возможные изменения прочностных свойств и морфометрических параметров припайного льда в северной части Обской губы по данным инструментальных наблюдений возможности нет. Однако существуют различные расчётные способы определения прочностных характеристик и толщин льда при отсутствии данных полевых исследований. Обычно такие расчёты ведут по наблюденным метеорологическим параметрам. Согласно рекомендациям ВМО (Всемирная метеорологическая организация) и требованиям нормативных документов, например [8] и др., для описания климатического режима района необходим непрерывный ряд срочных метеорологических наблюдений длиной не менее 30—40 лет. Именно поэтому мы для исследования выбрали период с 1980 по 2017 г. — период, удовлетворяющий требованиям нормативных документов и в то же время позволяющий оценить вклад глобального потепления в изменение прочностных и морфометрических свойств льда северной части Обской губы.

## Методика

Оценка изменения морфометрических свойств (толщины) припайного льда северной части Обской губы — важная часть нашего исследования. Известно, что при расчёте толщины припайного льда по уравнениям теоретического типа для конкретных условий и конкретного района необходимо знать теплофизические характеристики. Чтобы избежать затруднений, связанных с их определением, можно воспользоваться известными эмпирическими формула-



**Рис. 1.** Схема расположения гидрометеорологических станций в северной части Обской губы:

1 – гидрометеостанции; 2 – посёлки

**Fig. 1.** The layout of hydrometeorological stations in the northern part of the Ob Bay:

1 – hydrometeorological stations; 2 – villages

ми. Так, известная формула Н.Н. Зубова [9, 10] представляет собой зависимость вида:

$$H^2 + 50H = 8\sum(-T_a)$$

или

$$H = -25 + \sqrt{(25 + H_0)^2 + 8\sum(-T_a)}, \quad (1)$$

где  $H$  – расчётная толщина льда;  $H_0$  – начальная толщина льда;  $\sum(-T_a)$  – сумма градусо-дней мороза.

Сумма градусо-дней мороза – это накопленная сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха, отсчитываемая после устойчивого перехода температур воздуха через ноль в сторону отрицательных значений. В.П. Гаврило получил подобную же зависимость в следующем виде:

$$H^2 + 6,7H = 6,1\sum(-T_a). \quad (2)$$

**Таблица 1.** Гидрометеорологические станции в северной части Обской губы

Гидрометеорологические станции	Период наблюдений, годы	Координаты	
		северная широта	восточная долгота
Мыс Дровяной	1932–1963	72°39'	72°58'
Им. 60-летия ВЛКСМ	1979–1989	71°56'	74°25'
Тамбей	1936–2008, 2011–2012	71°29'	71°49'
Сеяха	1936–по наст. время	70°10'	72°31'
Тадебяха	1950–1995	70°22'	74°08'

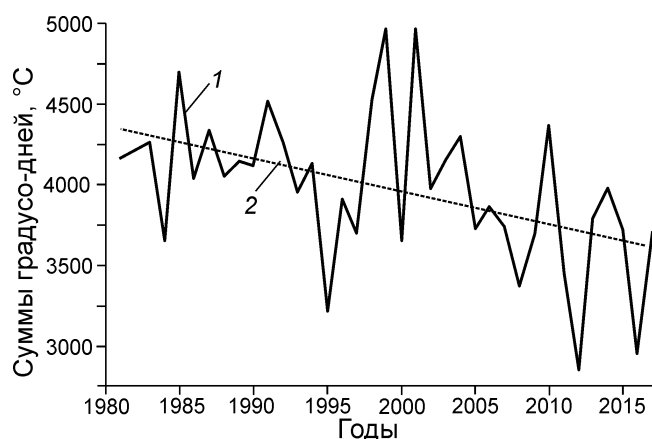
Приведём эмпирическую формулу Ю.П. Доронина [10], полученную теоретическим путём:

$$H = -7,7h + \sqrt{(7,7h + H_0)^2 + 12\sum(-T_a)}, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина слоя снега на льду.

Как видно, каждая из этих формул требует расчёта суммы градусо-дней мороза, которую можно получить в результате стандартных метеорологических наблюдений на гидрометеорологических станциях (ГМС) или метеорологических постах, расположенных непосредственно в рассматриваемом районе. Систематически изучать метеорологические условия в районе северной части Обской губы начали в период второго Международного полярного года с 1932 г. на ГМС Мыс Дровяной. В мае 1936 г. была открыта ГМС Тамбей, а в октябре того же года ГМС Сеяха. С 1950 г. на восточном побережье Обской губы начала работу ГМС Тадебяха. С 1979 по 1989 г работала ГМС имени 60-летия ВЛКСМ. Однако ГМС Мыс Дровяной, Тадебяха, Тамбей и имени 60-летия ВЛКСМ были закрыты. Сейчас в интересующем нас районе работает лишь ГМС Сеяха. Схема расположения ГМС в Обской губе приведена на рис. 1, а сведения о станциях – в табл. 1. С учётом этого расчёты необходимых сумм градусо-дней мороза для района северной части Обской губы за период с 1980 по 2017 г. вели с использованием данных метеорологических наблюдений на ГМС Сеяха. В качестве альтернативы (при выполнении работ) мы рассматривали использование данных метеорологического реанализа (например, ERA, NCEP и др.), но оно было признано лишним, так как ГМС Сеяха репрезентативна для всего рассматриваемого нами района.

На рассчитанные суммы градусо-дней мороза, полученные за полные зимние периоды с



**Рис. 2.** Сумма градусо-дней мороза на конец зимнего сезона, рассчитанная по данным ГМС Сеяха для разных лет:

1 — сумма накопленных за зимний сезон градусо-дней мороза; 2 — тренд

**Fig. 2.** The sum degree-days of frost at the end of the ice season, calculated according to the hydrometeorological station Seyakha for different years:

1 — the sum degree-days of frost accumulated during the ice season»; 2 — the trend

1980 по 2017 г., накладывался линейный тренд (рис. 2). Затем непосредственно по тренду на «конечные» годы определялись значения, условно принятые нами за величины сумм градусо-дней на 1980 и 2017 гг. Аналогичные действия мы провели для накопленных сумм градусо-дней мороза и среднемесячных температур воздуха на все месяцы за холодный период года (с октября по июнь). Таким образом, на каждый «условный» год (1980 и 2017 гг.) с использованием линейных трендов мы получили помесечный массив средних месячных температур воздуха и накопленных сумм градусо-дней мороза, которыми мы и будем оперировать далее.

Прочностные свойства припайного льда мы оценивали в два этапа. На первом этапе исследования мы воспользовались методикой, изложенной в руководящем документе СП 38 [11], т.е. методикой, обязательной к исполнению при проектировании гидротехнических объектов. На втором этапе мы применили методику расчёта прочностных свойств льда, приведённую в методическом письме В.В. Богородского [12] и работе [13]. В рамках данного исследования мы не будем вдаваться в подробности каждой из указанных здесь методик, отмечать их преимущества и недостатки, а воспользуемся

**Таблица 2.** Сравнительные расчётные характеристики, полученные для 1980 г. (числитель) и 2017 г. (знаменатель)

Характеристики	Период	
	максимальной прочности льда — март	максимального развития льда — май
Накопленная сумма градусо-дней мороза, °C	3900/3200	4350/3600
Средняя месячная температура, °C	−21,5/−17,4	−7,2/−4,4
Расчётная толщина льда, м	1,30/1,12	1,44/1,25

приведёнными в них простыми схемами расчёта прочностных свойств льда в зависимости от температуры, минерализации и структурных особенностей льда.

## Результаты расчётов

Прочностные и морфометрические характеристики льда в рамках данного исследования рассматривались для двух периодов — периода максимальной прочности льда (для акватории северной части Обской губы это март) и периода максимального развития (максимальной толщины) припайного льда (май — месяц перед началом периода таяния). Для двух указанных условных периодов (1980 и 2017 гг.) выполнено сравнение выбранных климатических характеристик (средняя месячная температура воздуха и накопленная к рассматриваемому месяцу (включительно) сумма градусо-дней мороза) для крайних зимних сезонов из выбранного нами интервала (табл. 2). Чтобы оценить изменения толщин льда в северной части Обской губы за последние 40 лет, мы воспользовались массивами сумм градусо-дней мороза на конкретные месяцы (см. табл. 2) и провели расчёты по формуле (3). При расчётах толщина слоя снега на припайном льду принималась равной 15 см (среднегодовое значение толщины слоя снега на льду в марте—мае), одинаковой для всех расчётных периодов. Полученные таким образом расчётные значения толщины припайного льда в Обской губе приведены в табл. 3.

Далее, воспользовавшись данными о температуре воздуха из табл. 2 и условием линейности профиля температуры в толще льда (характерно для растущего льда), мы разделили толщину льда на слои и определили средние температуры

Таблица 3. Расчётные значения средних по слоям температур ровного льда, полученные для периода 1980 г. (числитель) и 2017 г. (знаменатель)

Слой льда	Температура льда, °С, в период	
	максимальной прочности	максимального развития
Верхний	–18,0/–14,5	–6,0/–3,7
Средний	–10,8/–8,7	–3,6/–2,2
Нижний	–3,6/–2,9	–1,2/–0,7

для трёх слоёв льда (при этом толщина каждого слоя равна трети общей толщины льда). Отметим, что в данных расчётах мы приняли толщину снега нулевой и отождествили температуру поверхности льда с температурой воздуха. Это было сделано для минимизации экранирующего эффекта снежного покрова и чтобы в последующих расчётах прочностных характеристик можно было бы более явно установить влияние потепления на прочностные характеристики. Результаты выполненных нами расчётов температуры льда приведены в табл. 3. С помощью методики определения прочностных характеристик льда, изложенной в работе [11], и с использованием данных по температуре льда (см. табл. 3) мы провели расчёт пределов прочности при одноосном сжатии и изгибе для ровного пресного льда (призматической структуры), характерного для северной части Обской губы. Расчётные значения предела прочности приведены в табл. 4. Отметим, что по методике из СП 38 [11] прочность при изгибе рассчитывается на основании прочности при сжатии в нижнем слое ледяного покрова.

Затем при помощи методики определения прочностных характеристик льда [12], с использованием данных по температуре льда из табл. 3, по номограммам мы рассчитали пределы прочности ровного льда при одноосном сжатии и изгибе. Значения прочности были получены также для пресноводного льда призматической структуры. Доверительный интервал для послойной прочности определён по методике из работы [11]. Расчёт предела прочности льда при изгибе по методике работы [12] выполнялся без использования прочности льда при сжатии. Сначала по температуре льда послойно рассчитывалась прочность при изгибе малых балочек, по которым определялась средняя по толщине льда прочность при изгибе малых образцов (солёность льда равна 0‰). Затем прочность

Таблица 4. Расчётные значения предела прочности ровного льда при одноосном сжатии и изгибе по СП 38 13330 2012 [11] (*жирным курсивом*) и по методике В.В. Богородского [12] для периода 1980 г. (числитель) и 2017 г. (знаменатель)

Предел прочности	Слой льда	Период	
		максимальной прочности льда	максимального развития льда
Сжатие, МПа	Верхний	<b><i>5,6±0,6/5,1±0,5</i></b> 4,8±0,5/4,6±0,4	<b><i>4,0±0,4/3,8±0,4</i></b> 3,8±0,4/3,3±0,4
	Средний	<b><i>4,7±0,4/4,3±0,4</i></b> 4,3±0,4/4,1±0,4	<b><i>3,6±0,4/3,0±0,3</i></b> 3,3±0,4/2,8±0,3
	Нижний	<b><i>3,6±0,4/3,2±0,4</i></b> 3,3±0,4/3,1±0,3	<b><i>2,3±0,3/2,0±0,3</i></b> 2,2±0,3/1,7±0,2
	Вся толща	<b><i>5,20/4,70</i></b> 4,70/4,30	<b><i>3,80/3,50</i></b> 3,50/3,00
Изгиб, МПа	Вся толща	<b><i>1,60/1,44</i></b> 0,38/0,35	<b><i>1,05/0,92</i></b> 0,32/0,29

малых балочек с учётом масштабного эффекта пересчитывалась в прочность больших балок со стороной квадратного сечения, равной толщине льда. На последнем этапе прочность при изгибе больших балок пересчитывалась в прочность при изгибе консолей на плаву, выпиленных на всю толщину льда.

## Дискуссия

Остановимся на ряде моментов, которые влияют на получаемые в ходе выполнения исследований результаты проведённых расчётов, но прямо не сказываются на оценке получаемых различий для разных периодов. Итак, все три приведённые эмпирические формулы (1)–(3), связывающие толщину припайного льда с суровостью климатических условий, в своё время были получены разными исследователями для объекта морской (солёный) лёд. В нашем случае Обская губа (её северная часть) представляет собой довольно распреснённый водоём с условиями, значительно отличающимися от морских. Расчётные толщины льда, полученные нами в ходе исследования, получились несколько меньше наблюдаемых, что, по-видимому, связано с использованием нами фиксированной толщины снежного покрова на льду, а также со спецификой расчёта толщины льда по приведённым эмпирическим формулам на большую временную длительность.

С учётом всего этого вопрос о применимости указанных эмпирических формул остаётся открытым, но, поскольку наша задача — сравнение результатов расчётов толщины припайного льда для разных лет, то в этом случае для корректного сравнения гораздо важнее пользоваться единой методикой (для каждого из периодов), что и было нами сделано. Применение более совершенного метода расчёта толщины льда — термодинамического моделирования (например, [14, 15]) — в данном случае вряд ли дало бы ощутимый выигрыш в точности, но однозначно сильно усложнило бы проведение самих расчётов.

В наших исследованиях основной фактор, влияющий на прочностные характеристики льда, — температура. Поскольку у нас нет достаточных сведений о пространственно-временном распределении солёности льда и его изменениях за последние десятилетия, а также отсутствуют сведения о структурных особенностях льда северной части Обской губы, в рамках настоящего исследования мы принимаем их неизменными (стационарными) во времени за весь рассматриваемый период.

Расчётные значения пределов прочности ровного льда при сжатии в целом неплохо согласуются с результатами экспедиционных наблюдений. При этом значения, согласно расчётам с использованием методики из работы [11], несколько выше наблюдаемых. Расчётные значения пределов прочности ровного льда при изгибе,

полученные двумя разными методами, различаются между собой в 3–5 раз. При этом оценки прочности в табл. 4 оказались чрезмерно консервативными по отношению к оценкам на основе полевых (экспедиционных) исследований в данном районе. Оценки же прочности в табл. 4 существенно занижены по сравнению с оценками по данным полевых работ.

## Выводы

Установлено, что в северной части Обской губы за последние 40 лет довольно существенно изменились отдельные характеристики припайного льда. Так, оценки толщин ровного припайного льда, сделанные по простым эмпирическим формулам (в зависимости от суммы градусо-дней мороза), показывают, что в Обской губе толщина льда уменьшилась в среднем на 10–15%. Снижение прочностных характеристик льда (на изгиб и одноосное сжатие) для периода максимальной прочности льда и периода максимального развития льда достигло по выполненным расчётам 10–12%. И те, и другие приведённые оценки позволяют сделать вывод, что снижение толщины и прочности ледяного покрова, наблюдаемые в последние года на акватории северной части Обской губы, несомненно способствуют продолжению и расширению хозяйственной активности в указанном регионе.

## Литература

1. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Т. 1, 2. М.: изд. Росгидромета, 2008. 288 с.
2. Arctic climate impact assessment. ACIA Overview report. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 1020 p.
3. Miller F.L., Barry S.J. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWI-PA) // Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, Norway, 2011. 538 p.
4. Rothrock D.A., Yu Y., Maykut G.A. Thinning of the Arctic sea ice cover // Geophys. Research Letters. 1999. V. 26. № 23. P. 3469–3472.
5. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // Geophys. Research Letters. 2009. V. 36. L15501. doi: 10.1029/2009GL039035.

## References

1. *Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii*. Assessment report on climate change and its effects on the territory of the Russian Federation: T. 1, 2. M.: Rosgidromet, 2008: 288 p. [In Russian].
2. Arctic climate impact assessment. ACIA Overview report. Cambridge: Cambridge university press, 2005: 1020 p.
3. Miller F.L., Barry S.J. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWI-PA). Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, Norway, 2011: 538 p.
4. Rothrock D.A., Yu Y., Maykut G.A. Thinning of the Arctic sea ice cover. Geophys. Research Letters. 1999. 26 (23): 3469–3472.
5. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008. Geophys. Research Letters. 2009, 36: L15501. doi: 10.1029/2009GL039035.
6. Polyakov I.V., Walsh J.E., Kwok R. Recent changes of Arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes.

6. Polyakov I.V., Walsh J.E., Kwok R. Recent changes of Arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. P. 145–151. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00070.1.
7. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // Journ. of Geophys. Research. 2009. V. 114. C07005. doi: 10.1029/2009JC005312.
8. СП 11.114.2004. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. М.: ФГУП «ПНИИС», 2004. 88 с.
9. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: изд. Главсевморпути, 1945. 424 с.
10. Морской лед: Справочное пособие. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. 402 с.
11. СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04–82». М.: Минрегион России, 2012. 116 с.
12. Методическое письмо по расчету пределов прочности льда. Л.: изд. ААНИИ, 1983. 50 с.
13. Гладков М.Г., Петров И.Г., Федоров Б.А. Схема расчета предела прочности льда // Тр. ААНИИ. 1983. Т. 379. С. 75–88.
14. Андреев О.М., Иванов Б.В. Параметризация радиационных процессов в модели ледяного покрова // Метеорология и гидрология. 2001. № 2. С. 81–88.
15. Андреев О.М., Кубышкин Н.В., Виноградов Р.А., Нестеров А.В. Термодинамическое моделирование припайных льдов в устьевых участках Оби и Енисея // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны моря: Тр. VIII Междунар. науч.-практич. конф. Т. 1. М., 2014. С. 309–318.
- Bulletin of the American Meteorological Society. 2012: 145–151. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00070.1.
7. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. Journ. of Geophys. Research. 2009, 114: C07005. doi: 10.1029/2009JC005312.
8. СП 11.114.2004. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. М.: FSUE «ПНИИС» Gosstroy Russia, 2004: 88 p. [In Russian].
9. Zubov N.N. L'dy Arktiki. Ice of the Arctic. Moscow: Publisher of Glavsevmorput, 1945: 424 p. [In Russian].
10. Morskoy led. Spravochnoye posobiye. Sea ice. Reference Guide. Saint-Petersburg: Hydrometeoizdat, 1997: 402 p. [In Russian].
11. СП 38.13330.2012. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (volnovyye, ledovyye i ot sudov). Aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 2.06.04–82. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships). Updated edition COD 2.06.04–82. Moscow: Minregion of Russia, 2012: 116 p. [In Russian].
12. Metodicheskoye pis'mo po raschetu predelov prochnosti l'da. Methodical letter on the calculation of the strength of ice. Leningrad: AARI, 1983: 50 p. [In Russian].
13. Gladkov M.G., Petrov I.G., Fedorov B.A. The scheme for calculating the strength of ice. Trudy AANII. AARI works. 1983, 379: 75–88. [In Russian].
14. Andreev O.M., Ivanov B.V. Parameterization of radiation processes in the ice cover model Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and Hydrology. 2001, 2: 81–88. [In Russian].
15. Andreev O.M., Kubyshekin N.V., Vinogradov R.A., Nesterov A.V. Thermodynamic modeling of fast ice in the mouth of the Ob and Yenisei. Dinamika i termika rek, vodokhranilishch i pribrezhnoy zony morya. Trudy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: T. 1. Dynamics and thermals of rivers, reservoirs and the coastal zone of the sea: Proceedings of the VIII International Scientific Practical Conference: T. 1. Moscow, 2014: 309–318. [In Russian].