

## Расчёт экстремальных толщин и прочностных характеристик однолетнего ледяного покрова Карского моря с помощью термодинамической модели

© 2021 г. О.М. Андреев\*, Д.В. Драбенко

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

\*andoleg@aari.ru

## Calculating of extreme thicknesses and strength characteristics of the first-year ice cover of the Kara Sea using a thermodynamic model

O.M. Andreev\*, D.V. Drabenko

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

\*andoleg@aari.ru

Received October 13, 2020 / Revised March 22, 2021 / Accepted October 4, 2021

**Keywords:** *compressive strength, flexural strength, freezing degree-days, ice thickness, thermodynamic model.*

### Summary

Using the example of the Kara Sea, the possibility to calculate values of the thickness and strength characteristics of ice of rare occurrence for areas of marine waters with seasonal ice cover, where field observations are absent, is considered. A method for obtaining climatic characteristics of meteorological elements for conditions of different occurrence (extreme values) has been developed. It is based on the selection of a statistical distribution law for the «freezing degree-days» (FDD). On the basis of the obtained sums of the degree-days, the restoration of daily values of the air temperature is carried out. This technique can be applied to areas of the Arctic seas with seasonal ice cover. The obtained climatic characteristics allow us to estimate the strength properties and thickness of sea ice using a thermodynamic model. The proposed method makes it possible to calculate values of the thickness and strength characteristics of ice for the entire water area of the Kara Sea. For average climatic conditions, the calculated estimates of the periods of stable ice formation, thickness and strength characteristics of ice are in good agreement with the results of field observations. It is established that the moment of maximum ice strength does not coincide with the time when the ice reaches its maximum thickness. The characteristics of the ice cover calculated for conditions of rare occurrence also do not contradict the values observed in nature. The differences in the duration of the ice season in the south-western part of the sea from the north-eastern part, obtained under climatic conditions of different occurrence, are shown.

**Citation:** Andreev O.M., Drabenko D.V. Calculation of extreme thicknesses and strength characteristics of the first-year ice cover of the Kara Sea using a thermodynamic model. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2021, 61 (4): 547–560. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421040107.

Поступила 13 октября 2020 г. / После доработки 22 марта 2021 г. / Принята к печати 4 октября 2021 г.

**Ключевые слова:** *прочность на сжатие, прочность на изгиб, сумма градусодней мороза, термодинамическая модель, толщина льда.*

Для оценки прочностных свойств и толщины морского льда использована методика получения климатических данных при условии разной повторяемости, которая может применяться для арктических морей с сезонным ледяным покровом. Проведены расчёты толщины и прочностных характеристик льда Карского моря для разных климатических условий. Полученные расчётные значения сроков устойчивого ледообразования, а также толщины и прочностных характеристик льда хорошо совпадают с результатами натурных наблюдений.

### Введение

В настоящее время регион Российской Арктики — важнейший полигон для добычи полезных ископаемых (включая шельфовые разработки) и гидротехнического строительства. Из всех арктических морей именно Карское море не только богато на шельфовые месторождения углеводородов, но и характеризуется наиболее подходящими для их добычи гидрографическими условиями. Карское море — важная транспортная

артерия (участок Северного морского пути), по которому не только планируется, но и уже идёт вывоз добываемого сырья. Однако акватория моря большую часть года покрыта льдом. Именно поэтому к ключевым параметрам, определяющим возможность хозяйственного освоения акватории Карского моря, относятся морфометрические и прочностные характеристики ледяного покрова.

Проектирование и эксплуатация гидротехнических сооружений требует наличия обоснованных оценок подобных природных характеристик,

но относительно редкая сеть прибрежного гидрометеорологического мониторинга в данном регионе часто приводит к их отсутствию в конкретных локальных районах. Кроме того, результаты исследований последних лет показывают сокращение продолжительности ледового сезона как в Арктике в целом [1, 2], так и непосредственно в Карском море [3–6], что требует пересмотра полученных ранее климатических констант с учётом потепления. Ещё бóльшая неопределённость возникает, когда обоснованные оценки параметров ледяного покрова необходимо получить для локальных районов открытого моря.

Согласно действующим нормативам, приоритетными для обоснованной оценки морфометрических и прочностных свойств морского льда считаются экспериментальные данные, полученные непосредственно на месте. Если данные прямых натурных наблюдений отсутствуют, то для оценки характеристик ледяного покрова обычно применяют методы математического моделирования [7, 8] с использованием метеорологических данных реанализа (NCEP, ERA и др.) в качестве входных параметров [9, 10]. В соответствии с действующими российскими и международными нормативными документами [11, 12] к определяющим параметрам при проектировании и строительстве относятся характеристики льда редкой повторяемости. Однако на практике часто возникает необходимость оценки и годового хода (эволюции) таких характеристик. При наличии многолетних круглогодичных натурных наблюдений эта задача решается методами математической статистики. Для методов математического термодинамического моделирования обоснованная оценка эволюции необходимых характеристик ледяного покрова редкой повторяемости возможна лишь при решении вопроса об определении входных климатических (метеорологических) характеристик разной степени повторяемости (суровости климата). Одному из способов решения данной задачи и посвящена настоящая статья.

### Постановка задачи

Для расчёта толщины ровного морского льда воспользуемся одномерной нестационарной термодинамической моделью, разработанной в ААНИИ [13]. Модель представляет собой тер-

модинамическую систему из двух взаимодействующих между собой сред – снега и морского льда – с граничными условиями, учитывающими их взаимосвязь с атмосферой и океаном. Физические свойства сред в модели (теплоёмкость, теплопроводность, плотность, эффективная теплота плавления/кристаллизации) рассчитываются с помощью полуэмпирических зависимостей этих величин от температуры и солёности (для льда) [14] и температуры (для снега) [8]. Интегральная солёность льда определяется в зависимости от его толщины [7, 12, 15]. Турбулентный тепломассообмен с атмосферой находится по интегральным аэродинамическим формулам [7]. Коротковолновая солнечная радиация перераспределяется в толще среды в соответствии со значениями альбедо, а также коэффициентов пропускания и ослабления [13]. Длинноволновый радиационный баланс определяется с учётом балла общей облачности [16].

Специальный блок модели позволяет рассчитывать прочностные характеристики льда в зависимости от средней по толщине температуры и солёности по методике G. Timco и R. Frederking [17] из Международного нормативного документа ISO [12]. Так, интегральный для всей толщи льда (средний) предел прочности на одноосное сжатие рассчитывается по формуле

$$\sigma_c(T, S) = a\varepsilon^{0,22}[1 - (v_T/b)^{0,5}], \quad (1)$$

где  $T$  – температура льда;  $S$  – солёность льда;  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от структуры льда и направления воздействия;  $\varepsilon$  – скорость деформирования;  $v_T$  – относительный свободный объём в толще льда (рассол и воздух).

Предел прочности льда на изгиб (для всей толщи) находится по формуле [12, 18]

$$\sigma_f(T, S) = 1,76 \exp(-5,88(v_b)^{0,5}), \quad (2)$$

где  $v_b$  – относительный объём рассола в толще льда.

Итак, выходные параметры модели – расчётные значения толщины, а также прочностные характеристики ровного морского льда. Начало расчётов по модели определяется датой устойчивого ледообразования, которая служит для модели внешним (задаваемым) параметром. К стандартным входным параметрам модели относятся и среднесуточные значения основных метеорологических элементов: температуры и

относительной влажности воздуха; атмосферного давления; скорости приземного ветра; балла общей облачности. Толщина снежного покрова на поверхности льда может быть как внешним, так и внутренним параметром модели. Как было показано в работе [19], для рассматриваемой модели вариации только двух из указанных выше элементов (температура воздуха и толщина снега) уже определяют до 95% изменчивости величины расчётной толщины ровного морского льда. Остальные метеорологические параметры при моделировании можно принимать в виде средних климатических значений. Таким образом, определив значения только двух указанных элементов для климата разной степени повторяемости (суровости), с помощью термодинамической модели мы можем получить искомые оценки толщины и прочностных характеристик льда.

#### Метод расчёта характеристик редкой повторяемости

Согласно описанной в работе [20] теории, существует относительно простой метод вычисления значений редкой повторяемости интересующего параметра непосредственно из его статистического теоретического распределения. Сущность метода состоит в том, что вероятность превышения искомой нами величиной  $x$  какого-либо определённого значения  $P$  выбирается как функция числа лет  $N$ , за которое данное превышение произойдет:

$$P = (mN)^{-1},$$

где  $m$  – число указанных событий в течение года.

Исходя из распределения величины  $x$ , по требуемому значению вероятности  $P$  можно обратным пересчётом вычислить величину интересующего нас параметра  $y$  по соотношению следующего вида:

$$\int_y^{\infty} f(x)dx = P, \quad (3)$$

где  $f(x)$  – плотность распределения (вероятностей) искомой величины  $x$ .

В приведённом выражении (3) нижний предел  $y$  и представляет собой искомое нами значение, которое величина  $x$  может превышать с вероятностью  $P$ . Известно, что толщина льда –

показатель интегрального температурного воздействия, т.е. воздействия накопленных сумм температур воздуха за определённый период времени [7]. В гидрометеорологии данный параметр носит название «сумма градусодней мороза». Таким образом, первый этап решения задачи об определении климатических (метеорологических) характеристик разной степени суровости, по нашему мнению, сводится к расчёту значений соответствующих сумм градусодней мороза редкой повторяемости за холодный сезон. Это можно сделать, например, с использованием ряда сумм градусодней мороза, полученных для точки акватории моря за период продолжительностью 30 лет и рекомендуемых Всемирной метеорологической организацией (ВМО) для климатических расчётов [21].

Дальше переходим к оценке необходимых для термодинамической модели среднесуточных температур воздуха. С этой целью годовой ход температуры воздуха (за указанный 30-летний период) для выбранной нами точки на акватории моря аппроксимируется синусоидой вида

$$T = A \sin(2\pi Bk + C) + D;$$

где  $T$  – температура;  $A$  – амплитуда колебаний температуры воздуха;  $k$  – порядковый номер дня в году;  $B$  и  $C$  – коэффициенты, отвечающие за форму и смещение синусоиды по оси абсцисс;  $D$  – значение среднегодовой температуры воздуха.

Очевидно, что площадь, ограниченная нулевой ординатой сверху и синусоидой снизу (при суточном представлении оси абсцисс), представляет собой сумму градусодней мороза. Смещая полученную синусоиду по оси ординат, получаем разные значения сумм градусодней мороза. Отметим, что при этом меняются и значения абсцисс, соответствующих переходу температуры через нулевую ординату. Следовательно, с использованием определённых нами ранее значений сумм градусодней мороза для точки на акватории моря путём смещения соответствующей синусоиды можно определить как даты перехода температуры воздуха через ноль (или любую иную ординату), так и сами температуры воздуха на каждый календарный день для искомого нами климата разной степени суровости.

Толщина слоя снега на льду характеризуется крайне большой изменчивостью даже в пределах небольших локальных участков. При этом счи-

тается, что снежный покров на припайных льдах несколько толще, чем на дрейфующих [7, 22]. Известно также [7], что в климатически мягкие зимние сезоны толщина снежного покрова на льду больше, чем в холодные. Поэтому задача определения толщины снежного покрова на льду в зависимости от суровости климатических условий имеет весьма нетривиальный характер. В настоящем исследовании нам по имеющимся данным натурных наблюдений на прибрежных гидрометеорологических станциях (ГМС) Карского моря удалось составить ряды из соотношения «толщина льда/толщина снега на льду» на конец периода нарастания льда. Считая это соотношение единственным за год и определив соответствующий вид его распределения (используя полученные соотношения за несколько лет), по выражению (3) можно оценить его в терминах редкой повторяемости (аналогично нахождению сумм градусодней мороза). Для получения более обобщённой картины соотношения редкой повторяемости для конкретных точек (ГМС) были усреднены. Осреднённое значение соотношения для каждого периода редкой повторяемости принималось нами единым для всей акватории моря. Данное соотношение принималось также постоянным (неизменным) в течение всего периода роста льда (т.е. до начала периода таяния снега).

### Результаты расчётов

Для тестовых расчётов мы выбрали несколько точек, равномерно расположенных по всей акватории Карского моря и совпадающих с узлами метеорологического реанализа (ERA Interim). Точки расположены как непосредственно на акватории открытого моря, так и около побережья, вблизи действующих ГМС. Ряды данных из реанализа (1 января 1979 г. – 31 декабря 2010 г.) подбирали в соответствии с рекомендациями ВМО по длине ряда и его периоду для расчёта климатических норм [21]. Для каждой выбранной точки акватории моря рассчитывали суммы градусодней мороза, накопленные за каждый ледовый сезон (30 сезонов). В результате анализа грааций сумм градусодней мороза получено, что гамма-распределение наилучшим образом описывает по-

вторяемость полученных нами сумм. Общий вид гамма-распределения таков:

$$f(x) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x},$$

где  $\Gamma(\alpha)$  – гамма-функция;  $\lambda$  – параметр масштаба;  $\alpha$  – параметр формы.

По приведённому закону распределения были рассчитаны значения сумм градусодней мороза разной степени повторяемости для каждой из выбранных точек на акватории Карского моря. Для дальнейших расчётов мы выделили наиболее часто используемые в проектировании [11, 12] параметры редкой повторяемости, а именно: повторяемость один раз в 2–3 года (соответствует среднему значению); повторяемость один раз в 25 лет; повторяемость один раз в 100 лет; повторяемость один раз в 1000 лет. В таблице приведены соответствующие расчётные суммы градусодней мороза для каждой из выбранных нами точек на акватории моря. По полученным суммам и с использованием аппроксимационной синусоиды годового хода для каждой точки были получены ряды температур воздуха климата разной степени повторяемости.

Вода Карского моря – солёная, поэтому для начала ледообразования необходимо выполнить условие достижения температурой поверхности моря значения температуры замерзания. Более того, период времени от момента перехода температуры поверхности моря через значение температуры замерзания до момента, когда начинается устойчивое ледообразование, может достигать нескольких дней (или недель). С учётом данных натурных наблюдений на ГМС, за дату устойчивого ледообразования принята дата достижения температурой воздуха значения температуры замерзания морской воды плюс 10 суток (время, затрачиваемое на исчерпание теплозапаса водной толщи). Данное условие – единое для всех выбранных нами точек. Полученные даты устойчивого ледообразования (разной степени повторяемости) на всей акватории Карского моря приведены на рис. 1. Эти даты и представляли собой входные параметры термодинамической модели. Из рис. 1 следует, что лёд начинает образовываться в северо-восточной части моря, а затем в течение месяца достигает его крайней юго-западной части. Данный факт характерен для всех рассмотренных повторяемостей климатических условий.

Расчётные величины «сумм градусоидней мороза» редкой повторяемости, полученные для выбранных точек на акватории Карского моря, °С

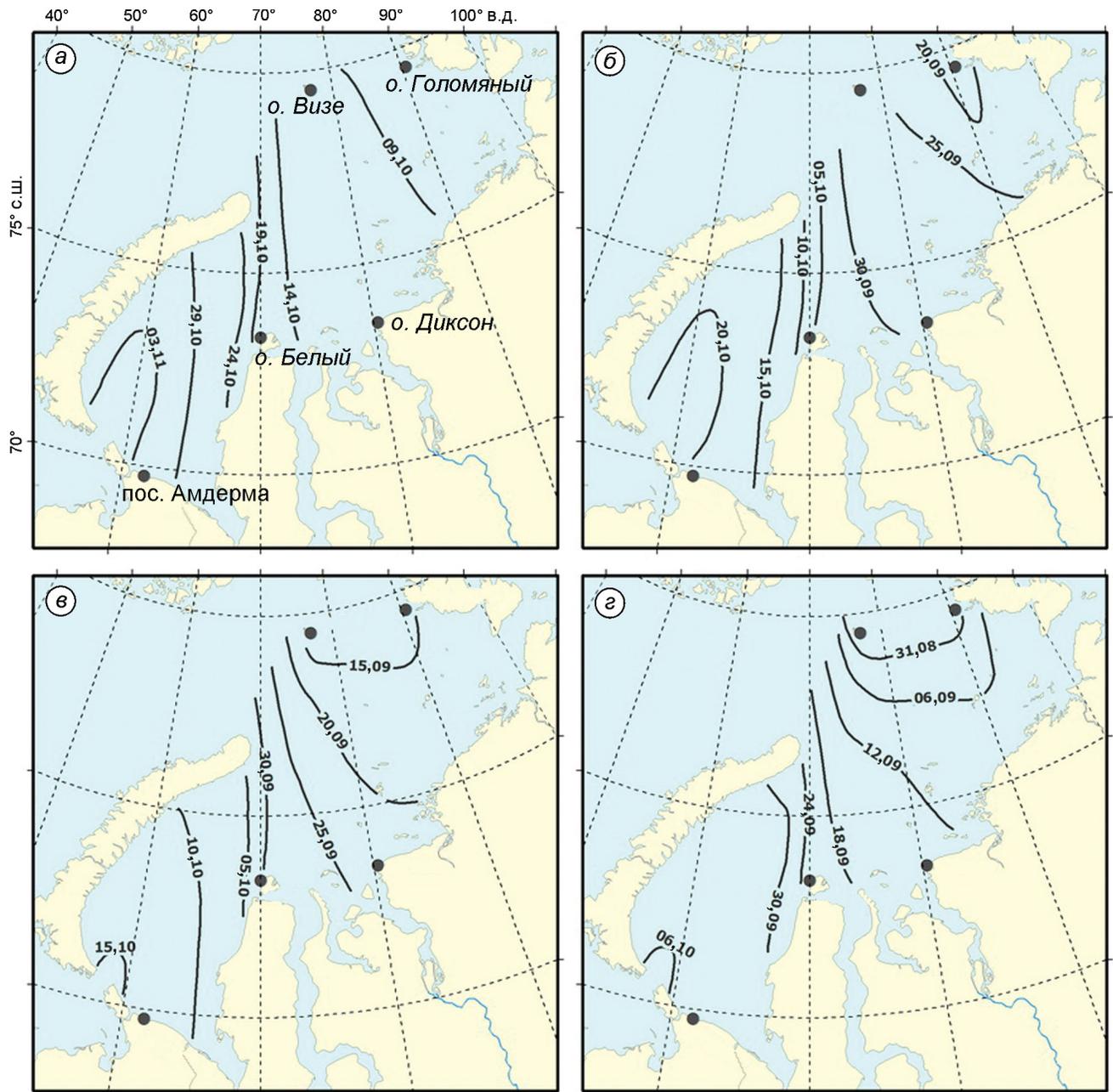
Точка акватории	Координаты точки		Суммы, повторяемостью один раз в $N$ лет			
	широта, с.ш.°	долгота, в.д.°	$N = 2 \div 3$	$N = 25$	$N = 100$	$N = 1000$
1	71,75	56,63	2705	3345	3655	4090
2	75,13	65,00	3639	4289	4599	5024
3	71,88	61,50	2998	3698	4033	4508
4	74,50	68,38	3750	4430	4755	5200
5	77,75	76,75	4469	5324	5729	6299
6	75,63	79,75	4346	5096	5446	5936
7	78,13	89,00	4903	5738	6128	6678
8	77,13	96,38	4706	5431	5766	6236
Порт Амдерма	69,75	61,63	2908	3563	3878	4323
О. Белый	73,38	70,00	4255	4950	5325	5812
О. Диксон	73,50	80,38	4660	5425	5780	6280
О. Голомяный	79,50	90,63	5001	5805	6185	6705
О. Визе	79,50	77,00	4773	5713	6158	6783

Толщина слоя снега на льду при наших расчётах по термодинамической модели – внутренний параметр, который определялся из соотношения толщина льда/толщина снега, полученного для всей акватории Карского моря и соответствующих климатических условий редкой повторяемости. Так, для периода повторяемости климатических условий один раз в 2–3 года (средние условия) указанное соотношение по приведённой здесь методике получено в размере 7,5, для повторяемости один раз в 25 лет – 15, а для повторяемости один раз в 100 лет и один раз в 1000 лет – 20 и 30 соответственно. При моделировании динамика снегонакопления (в годы средней и экстремальной толщины ровного морского льда) принималась исходя из этих соотношений. Плотность снега в период снегонакопления считалась равной 280 кг/м<sup>3</sup>, плотность таящего снега – 380 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты расчётов эволюции толщины ровного морского льда и его термической структуры (распределение температур в толще льда) для района порта Амдерма, полученные при использовании параметров снега и климатических условий разной повторяемости, приведены на рис. 2. Виден значительный рост толщины льда и продолжительности его существования с увеличением суровости зимних условий, однако при этом снегонакопление на поверхности льда снижается. Из рис. 2 также заметен нелинейный характер вертикального профиля температуры льда в начале периода его таяния продолжительностью до нескольких суток. Результаты расчётов максимальной

толщины ровного морского льда для всей акватории Карского моря при климатических условиях разной повторяемости приведены на рис. 3. Видно, что наиболее толстые льды находятся в северо-восточной части моря, а наиболее тонкие – в юго-западной. При этом для средних климатических условий разница в толщине для этих районов составляет 25–30%, а с ростом суровости погодных условий она снижается до 15–20%.

На рис. 4 и 5 представлены результаты расчётов интегральных по толщине максимальных за год пределов прочности морского льда на одноосное сжатие и изгиб соответственно. Они получены по приведённым ранее формулам (1) и (2) для всей акватории Карского моря при использовании климатических условий разной повторяемости. Прочностные характеристики льда рассчитывались в соответствии с требованиями российского нормативного документа СП 38 [11], т.е. предел прочности на одноосное сжатие получен для условия приложения силы параллельно поверхности ледяного покрова, а предел прочности на изгиб соответствует изгибу консолей на плаву [23]. Из рис. 4 и 5 видно, что прочность льда в северо-восточной части моря превосходит прочность льда в юго-западной части. Превышение составляет 10–15% как для прочностей на сжатие, так и на изгиб. Рост прочностей льда при рассматриваемых климатических условиях редкой повторяемости, как видно из сопоставления рис. 4 и 5, также невелик. Например, он достигает превышения 20–30% своего среднего значения только к повторяемости 1 раз в 1000 лет.



**Рис. 1.** Средние и экстремальные расчётные даты устойчивого ледообразования на акватории Карского моря: *a* – 1 раз в 2–3 года (средние); *б* – 1 раз в 25 лет; *в* – 1 раз в 100 лет; *г* – 1 раз в 1000 лет

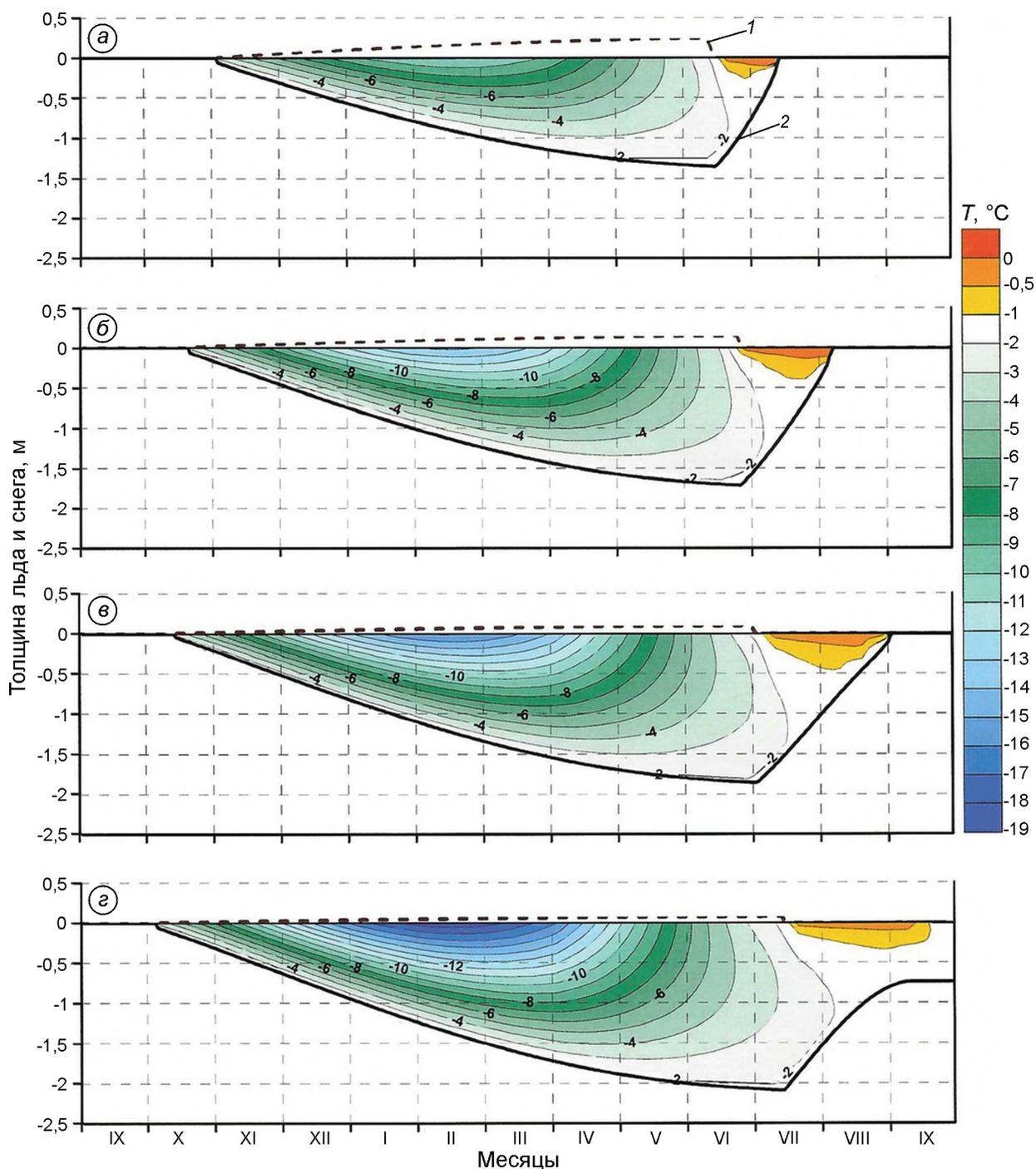
**Fig. 1.** Average and extreme estimated dates of steady ice formation in the Kara Sea.

*a* – once every 2–3 years (average); *б* – once every 25 years; *в* – 1 time in 100 years; *г* – 1 time in 1000 years

### Дискуссия

В результате многолетних наблюдений установлено, что в период таяния ледяного покрова арктических морей сплочённые льды (8–10 баллов) обычно скапливаются в определённых областях акватории. Эти скопления, получившие название ледяных массивов, для Карского моря

локализуются как в юго-западной части моря (Новоземельский массив), так и в северо-восточной части моря (Карский северный и Северо-земельский массивы). Новоземельский ледяной массив представляет собой обширное скопление толстого однолетнего льда, находящегося между архипелагом Новая Земля и полуостровом Ямал, обычно полностью исчезающего к се-



**Рис. 2.** Результаты расчётов эволюции средней и экстремальной толщины, м, снега (1) и ровного морского льда (2), а также термической структуры льда, °C, для района порта Амдерма.

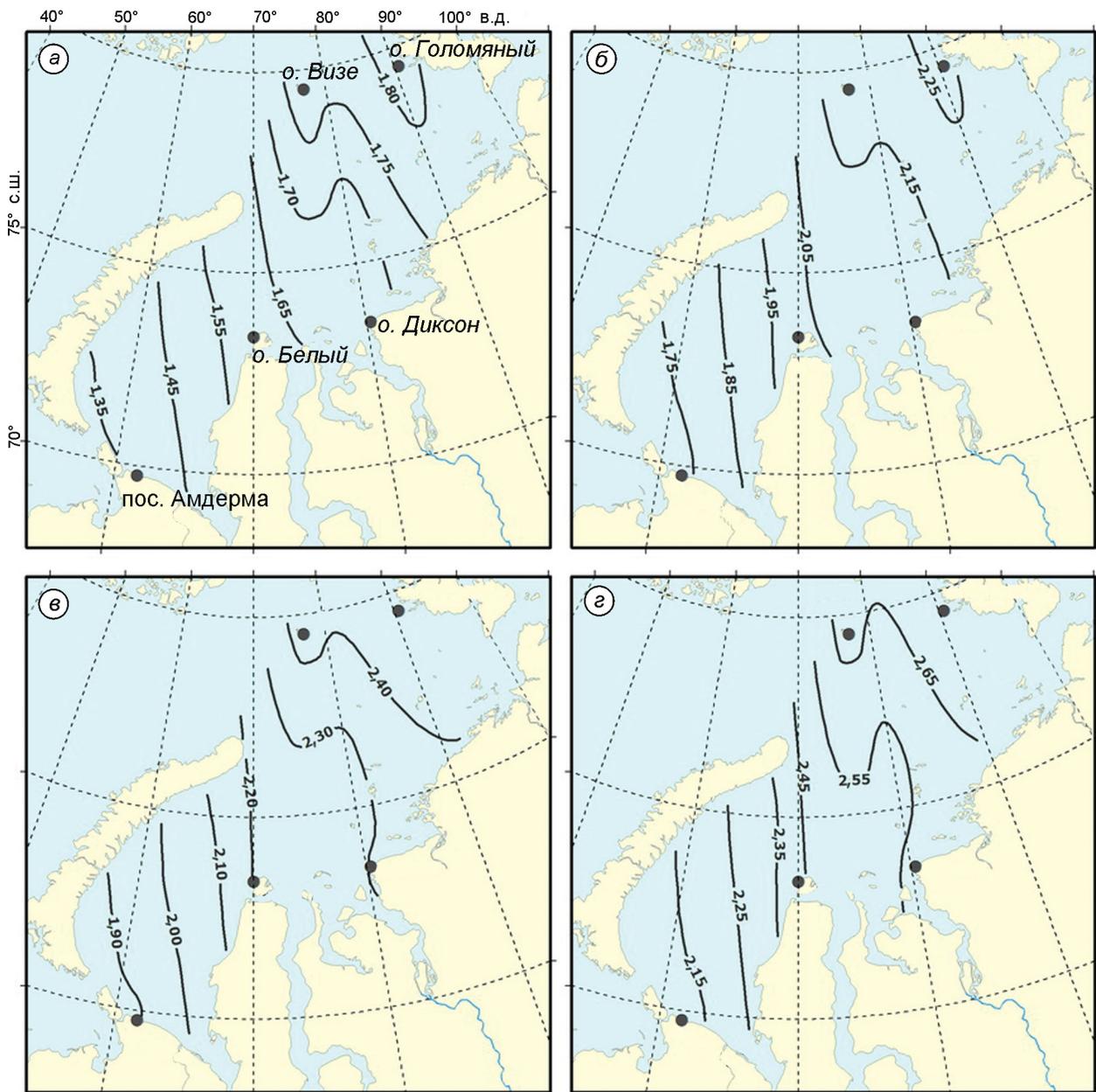
a–г – см. рис. 1

**Fig. 2.** The results of calculations of the evolution of the average and extreme thickness, m, of snow (1) and smooth sea ice (2), as well as thermal structure of ice, °C, for point of Amderma.

a–g – see Fig. 1

редине сентября. Ледяной массив Карский северный – отрог ледяного массива Центрального арктического бассейна – расположен в север-

ной части моря. Североземельский ледяной массив состоит из местных однолетних льдов района архипелага Северная Земля. Известно, что оба

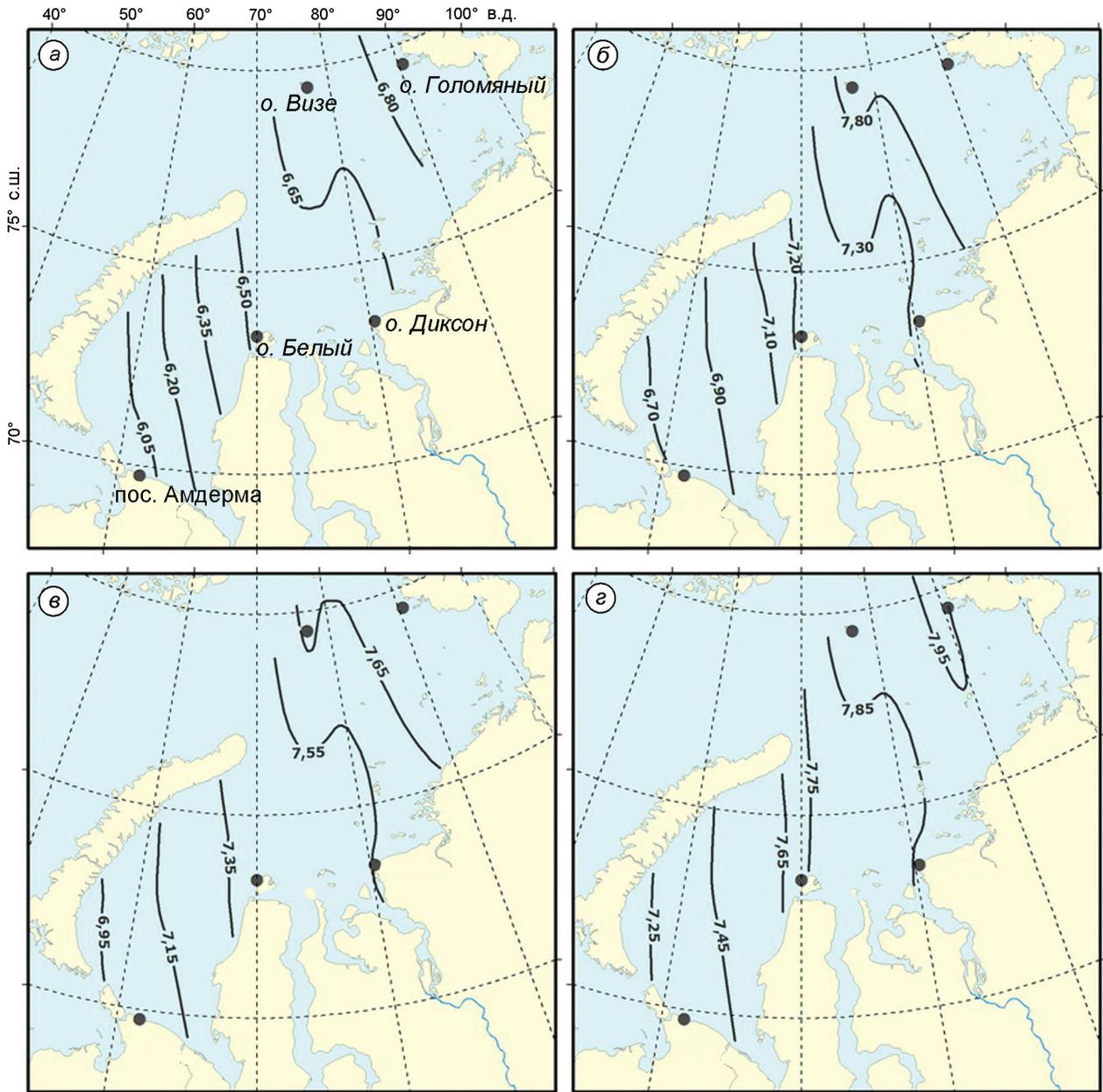


**Рис. 3.** Средние и экстремальные расчётные значения максимальной толщины морского льда, м.  
а–г – см. рис. 1

**Fig. 3.** Average and extreme calculated values of the maximum thickness of sea ice, m:  
а–г – see Fig. 1

эти массива могут пережить период летнего таяния. Однако в результате потепления климата в последние годы Карское море к концу периода таяния часто представляет собой водоём с ярко выраженным сезонным ледяным покровом, т.е. ледяные массивы к началу периода замерзания отсутствуют на всей акватории моря. Таким образом, мы, рассматривая вопрос об определении сроков ледообразования даже для сурового кли-

мата, считали акваторию Карского моря изначально полностью свободной от ледяного покрова. Для дальнейшего анализа важно понимать, что использование нами данных метеорологического реанализа, сглаживающего наиболее сильные колебания метеорологических параметров (характерных для натуральных измерений на ГМС), приводит к снижению их дисперсии. Это может несколько занижать получаемые результаты рас-



**Рис. 4.** Средние и экстремальные расчётные значения прочности морского льда на сжатие, МПа.

a–г – см. рис. 1

**Fig. 4.** Average and extreme calculated values of compressive strength of sea ice, MPa.

a–г – see Fig. 1

чётов для рассматриваемых нами параметров среды редкой повторяемости.

Сравнивая полученные нами даты устойчивого ледообразования на акватории Карского моря (см. рис. 1) с материалами работ [24–27], полученными в результате обработки данных натуральных наблюдений, отметим хорошее совпадение ( $\pm$ сутки практически для всей акватории моря) пространственно-временного распределения

для условий климатически среднего года (повторяемость один раз в 2–3 года). Это также подтверждает и аналогичное совпадение расчётных сроков с результатами многолетних наблюдений прибрежных ГМС. Ранние сроки устойчивого ледообразования на акватории Карского моря, приведённые в работах [26, 27], также свидетельствуют о хорошем соответствии ( $\pm 1 \div 3$  суток) полученных нами результатов для суровых клима-

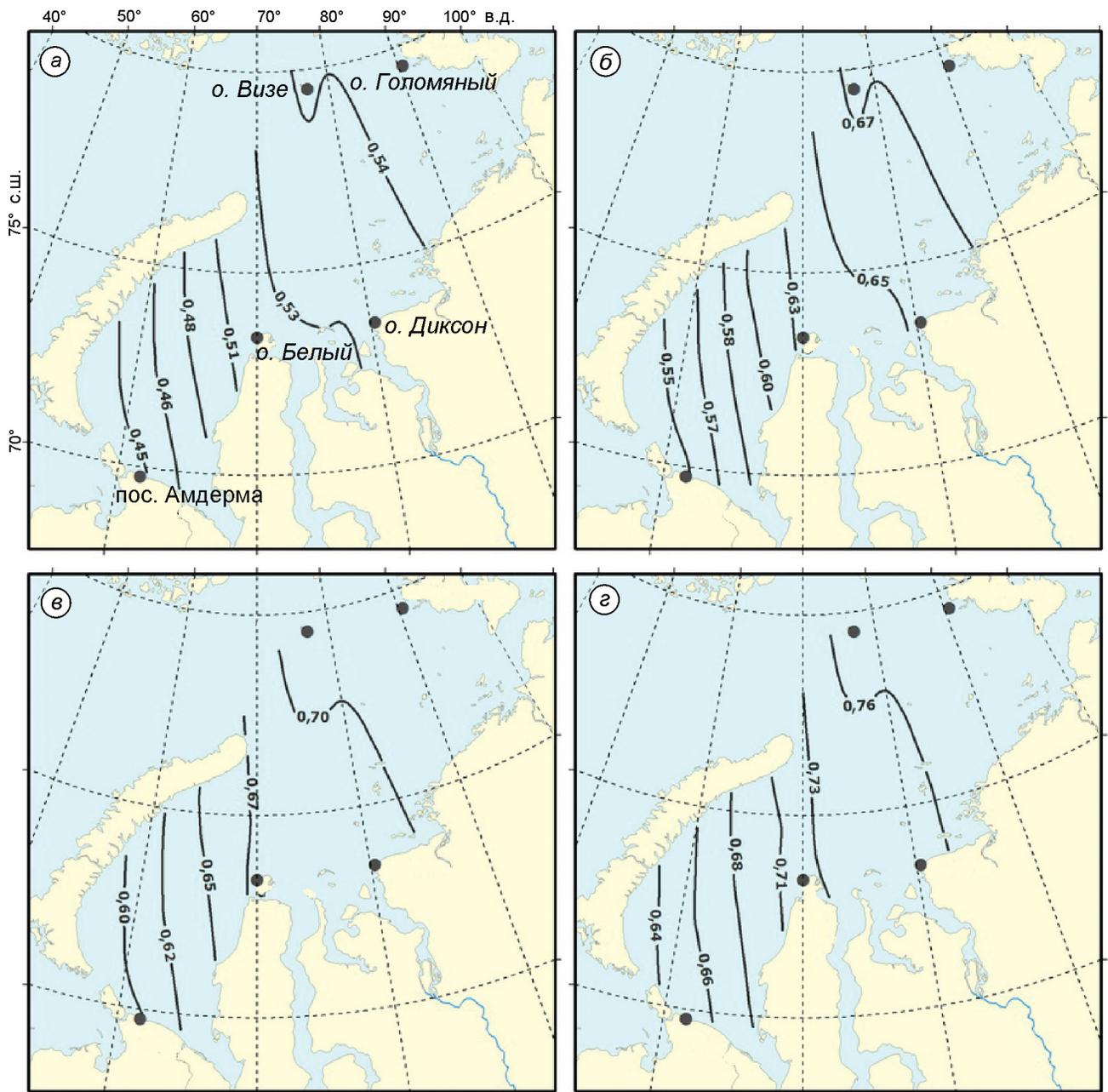


Рис. 5. Средние и экстремальные расчётные значения прочности морского льда на изгиб, МПа.

а–г – см. рис. 1

Fig. 5. Average and extreme calculated values of sea ice flexural strength, MPa.

а–г – see Fig. 1

тических условий (повторяемость 1 раз в 25 лет). К сожалению, сравнить расчётные даты устойчивого ледообразования для более редкой повторяемости с соответствующими натурными измерениями пока невозможно.

Наиболее адекватно сравнить полученные расчётные толщины льда (см. рис. 3) можно лишь с результатами многолетних наблюдений

на ГМС (за период наблюдений, близкий к использованному нами периоду расчётов 1980–2010 гг.), так как для корректного сопоставления расчётных толщин с результатами экспедиционных наблюдений в центральных частях моря недостаточно соответствующей информации. По имеющимся в нашем распоряжении данным, среднее значение толщины льда по многолет-

ним натурным наблюдениям для ГМС Амдерма составляет 1,31 м, для ГМС Марресале – 1,42 м, для ГМС о. Белый – 1,56 м, для ГМС о. Диксон – 1,67 м, а для ГМС о. Визе – 1,73 м. Видно, что совпадение с полученными нами расчётными значениями толщины льда (см. рис. 3) очень хорошее (разница между наблюдаемыми и расчётными значениями толщины льда составляет  $\pm 1 \div 3$  см). Максимальное измеренное значение толщины льда, зафиксированное на ГМС Амдерма, равно 1,75 м, на ГМС Марресале – 1,95 м; на ГМС о. Белый – 1,98 м, на ГМС о. Диксон – 2,13 м, что также свидетельствует о хорошем (разница составляет  $\pm 1 \div 5$  см) соответствии с ними полученных нами результатов расчёта толщины ровного льда редкой повторяемости. Заметим, что с учётом сокращения времени прогрева моря в его центральной части (при ледообразовании редкой повторяемости и соответствующем сокращении теплозапаса водной толщи) качество воспроизведения толщины в прибрежной и открытой частях моря должно быть, по нашему мнению, примерно одинаковым.

В экстремально суровые зимние сезоны (повторяемостью раз в 100 лет) ледяной покров северо-восточной части моря не успевает полностью растаять. Граница между районами моря, где таяние всё-таки происходит, и нерастаявшими льдами проходит примерно по линии мыс Желания – о. Диксон. Результаты расчётов, выполненных для экстремально суровых зим (повторяемостью 1 раз в 1000 лет), показали, что морской ледяной покров в тёплый период года не успевает растаять на всей акватории моря. Причём в районах северной и северо-восточной границ моря (районы Карского северного и Североземельского ледяных массивов) период таяния льда вообще не наступает. Данные результаты нуждаются в некотором пояснении. В наших расчётах мы принимали все периоды повторяемости климатических условий постоянными в течение не только холодного, но и тёплого периода года. Однако в природных условиях возможно и иное сочетание, т.е. за экстремально холодной зимой может следовать очень тёплое лето. Тогда и соответствующие результаты относительно процессов таяния на акватории моря могут быть несколько иными.

Многолетних непрерывных наблюдений прочностных характеристик льда Карского моря

на сети прибрежных ГМС не велось. Доступны лишь разрозненные результаты экспедиционных наблюдений. Сравнивая полученные нами результаты расчётов прочностных характеристик льда для акватории Карского моря с материалами, приведёнными в работах [22, 28], отметим вполне хорошее их соответствие для средних климатических условий. Так, для климатически среднего года на акватории Карского моря в весенние месяцы (апрель–май) прочность льда на одноосное сжатие (приведённое ко всей толщине льда) по данным натурных наблюдений составляет 1,9–4,3 МПа, а по данным наших расчётов – 2,7–5,1 МПа. Приведённый диапазон изменений включает в себя как пространственную (от точки к точке), так и временную (эволюция прочностных характеристик) составляющую. Прочности льда на изгиб, по данным экспедиционных наблюдений в апреле–мае, оцениваются в диапазоне 0,2–0,4 МПа. По результатам наших расчётов, диапазон изменения составил 0,27–0,46 МПа. Однако с течением времени (апрель–май) указанные расчётные прочностные характеристики льда снижаются от верхнего предела приведённых диапазонов к нижнему в сопровождении незначительных пространственных колебаний.

Для условий редкой повторяемости сравнить расчётные и натурные значения прочности довольно сложно, так как натурные измерения прочностных свойств проводятся в определённых временных рамках (период проведения экспедиции), напрямую не связанных с климатическими факторами. На рис. 4 и 5 приведены максимальные за год величины расчётных прочностей льда (полученные непосредственно из рядов расчётного годового хода для каждой точки). Заметим, что даже для климатически среднего года приведённые на рис. 4 и 5 значения прочностей выше, чем указанные нами средние величины прочностей, полученные по данным экспедиционных наблюдений. Этот момент важен для понимания сути эволюционных изменений прочностных характеристик льда, происходящих в течение годового периода. Он также свидетельствует о необходимости корректного выбора времени проведения экспедиционных исследований.

Используемая нами методика расчёта прочностных характеристик льда из ISO [12] для

российских проектных компаний не является обязательной. Полученные по этой методике оценки прочностных свойств льда, как следует из практики, для предела прочности на сжатие обычно расценивают как завышенные. При этом проведение расчётов эволюции прочностных характеристик льда по методике из СП 38 [11] на настоящий момент осложнено отсутствием прямой функциональной связи указанных характеристик льда с его физическими свойствами (как, например, формулы (1) и (2) для методики ISO).

Для расчёта пределов прочности на сжатие мы использовали формулу для морского льда зернистой структуры как более консервативную. Однако, как было указано в работе [22], лёд Карского моря в природных условиях имеет сложную слоистую структуру, что особенно характерно для районов открытого моря. Работы [22, 23], а также официальный нормативный документ [11] для такого случая рекомендуют вести расчёт по слоям (где верхняя четверть толщи льда представлена зернистой структурой, а нижние три четверти – волокнистой). Также при расчёте предела прочности льда на сжатие долю свободного объёма  $v_T$  мы приравнивали к доле, занимаемой только рассолом  $v_b$ , что приводило к некоторому завышению получаемых величин. Однако, поскольку проводили расчёты экстремальных (максимальных) значений прочности, с учётом сказанного получаемое искусственное завышение и приближает нас к оценке верхней границы их возможных значений. Наши оценки предела прочности на одноосное сжатие превосходят аналогичные результаты из работы [29], основанной на принципиально ином подходе к расчёту прочностных характеристик и толщины льда Карского моря.

Из приведённых на рис. 2 результатов расчётов эволюции толщины льда и его термической структуры для акватории моря вблизи порта Амдерма хорошо видно несовпадение по времени для наиболее низких температур толщи и значений максимальной толщины льда. С учётом темпов снижения среднеинтегральной солёности низкие температуры толщи льда в феврале–марте приводят к повышению значений прочности льда. Таким образом, в феврале–марте на акватории Карского моря наблюдается так называемый период максимальной прочности льда, а в мае – период максимальных значений тол-

щины льда. Все наши результаты относительно толщины и прочностных характеристик льда для каждой расчётной точки получены при условии образования и дальнейшей эволюции ледяного покрова (включая его таяние) в относительно небольшом локальном районе. В представленном исследовании не учитываются возможный дрейф льда из этого района (включая отрыв и вынос припая) и образование на его месте нового льда.

## Выводы

На примере Карского моря показана возможность получения расчётных значений толщины и прочностных характеристик льда редкой повторяемости для районов морских акваторий с сезонным ледяным покровом, где отсутствуют данные натурных наблюдений. Рассмотрен способ получения климатических данных, соответствующих условиям разной повторяемости, для дальнейшей оценки прочностных свойств и толщины морского льда с помощью термодинамического моделирования. Данный способ основан на подборе статистического закона распределения для «сумм градусодней мороза» и получении значений их редкой повторяемости. Для акватории Карского моря выполнены расчёты толщины и прочностных характеристик льда для климатических условий разной повторяемости. Для средних климатических условий расчётные значения толщины и прочностных характеристик льда хорошо совпали с соответствующими результатами натурных наблюдений. Для климатических условий редкой повторяемости полученные расчётные сроки устойчивого ледообразования и расчётные максимальные толщины ровного льда также соответствуют результатам натурных наблюдений на прибрежных ГМС Карского моря.

Результаты расчётов толщины и прочностных характеристик льда редкой повторяемости можно рекомендовать к использованию для проектных организаций в качестве грубой оценки («первого приближения») на начальных этапах проектирования. Однако в дальнейшем они потребуют уточнения с учётом гидрометеорологических, батиметрических и иных особенностей локального района, для которого будет вестись проектирование.

## Литература

## References

1. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas // Journ. of Climate. 2003. № 16 (12). P. 2078–2085.
2. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // The Cryosphere. 2012. № 6 (4). P. 881–889.
3. Бородачев В.Е. Льды Карского моря. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 182 с.
4. Divine D.V., Korsnes R., Makshatas A.P. Variability and climate sensitivity of fast ice extent in the north-eastern Kara Sea // Polar Research. 2003. № 22 (1). P. 27–34.
5. Zubakin G.K., Egorov A.G., Ivanov V.V., Lebedev A.A., Buzin I.V., Eide L.I. Formation of the severe ice conditions in the southwestern Kara Sea // Proc. of the 18-th Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. Canada, Vancouver, 2008. P. 623–629.
6. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P. Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov // Oceanologia. 2014. № 56 (3). P. 445–460.
7. Морской лед. Справочное пособие / Под ред. И.Е. Фролова, В.П. Гаврило. СПб.: Гидрометеоиздат, 1997. 402 с.
8. Ebert E.E., Curry J.A. An intermediate one-dimensional thermodynamic sea ice model for investigating ice-atmosphere interactions // Journ. of Geophys. Research. 1993. V. 98. № C6. P. 10085–10109.
9. Электронный ресурс: <https://www.ecmwf.int/>. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
10. Электронный ресурс: <https://www.ncep.noaa.gov/>. National Centers for Environmental Prediction.
11. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04–82. М.: Стандартинформ, 2019. 122 с.
12. ISO/FDIS 19906:2010(E). Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. 2010. P. 435.
13. Андреев О.М., Иванов Б.В. Параметризация радиационных процессов в модели ледяного покрова // Метеорология и гидрология. 2001. № 2. С. 81–88.
14. Назинцев Ю.Л., Дмитраж Ж.А., Мусеев В.И. Теплофизические свойства морского льда. Л.: изд. ЛГУ, 1988. 260 с.
15. Cox G.F., Weeks W.F. Salinity variations in sea ice // Journ. of Glaciology. 1974. № 13 (67). P. 109–120.
16. Makshatas A.P., Andreas E.L., Svyashchennikov P.N., Timachev V.F. Accounting for Clouds in Sea Ice Models // Cold Regions Research and Engineering Laboratory. 1998. V. 9 (89). 30 p.
17. Timco G.W., Frederking R. Compressive strength of sea ice sheets // Cold Regions Science and Technology. 1990. № 17 (3). P. 227–240.
1. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas. Journ. of Climate. 2003, 16 (12): 2078–2085.
2. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. The Cryosphere. 2012, 6 (4): 881–889.
3. Borodachev V.E. *L'dy Karskogo moria*. Ice of Kara Sea. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1998: 182 p. [In Russian].
4. Divine D.V., Korsnes R., Makshatas A.P. Variability and climate sensitivity of fast ice extent in the north-eastern Kara Sea. Polar Research. 2003, 22 (1): 27–34.
5. Zubakin G.K., Egorov A.G., Ivanov V.V., Lebedev A.A., Buzin I.V., Eide L.I. Formation of the severe ice conditions in the southwestern Kara Sea. Proc. of the 18-th Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. Vancouver, Canada, 2008: 623–629.
6. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P. Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov. Oceanologia. 2014, 56 (3): 445–460.
7. *Morskoy led. Spravochnoye posobiye*. Sea ice. Reference Guide. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1997: 402 p. [In Russian].
8. Ebert E.E., Curry J.A. An intermediate one-dimensional thermodynamic sea ice model for investigating ice-atmosphere interactions Journ. of Geophys. Research. 1993, 98 (C6): 10085–10109.
9. <https://www.ecmwf.int/>. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
10. <https://www.ncep.noaa.gov/>. National Centers for Environmental Prediction.
11. СП 38.13330.2018 *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: Standardinform, 2019: 122 p. [In Russian].
12. ISO/FDIS 19906:2010(E). Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. 2010. P. 435.
13. 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].
14. Nazintsev Yu. L., Dmitrazh Z.A., Moiseev V.I. *Teplofizicheskiye svoystva morskogo l'da*. Thermophysical properties of sea ice. L.: Leningrad State University Publishing House, 1988: 260 p. [In Russian].
15. Cox G.F., Weeks W.F. Salinity variations in sea ice. Journ. of Glaciology. 1974, 13 (67): 109–120.
16. Makshatas A.P., Andreas E.L., Svyashchennikov P.N., Timachev V.F. Accounting for Clouds in Sea Ice Models. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. 1998, 9 (89): 30 p.
17. Timco G.W., Frederking R. Compressive strength of sea ice sheets. Cold Regions Science and Technology. 1990, 17 (3): 227–240.

18. *Timco G.W.* Flexural strength equation for sea ice // Cold Regions Science and Technology. 1994. № 22 (3). P. 285–298.
19. *Андреев О.М., Драбенко Д.В.* О способе подготовки исходных данных разной повторяемости для термодинамического моделирования льда в Арктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 112–120.
20. *Гумбель Э.* Статистики экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
21. Рекомендации по расчету климатических норм. ВМО. Сайт Гидрометцентра России. (<https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11151-03062015-1-r>).
22. *Gavrilov V.P., Kovalev S.M., Lebedev G.A., Nedoshivin O.A.* Mapping of the Barents and Kara Seas by strength and bearing capacity of first-year ice // Proceedings of the 13th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition. Murmansk, Russia. 1995. V. 3. P. 69–77.
23. *Гладков М.Г., Петров И.Г., Федоров Б.А.* Схема расчета предела прочности льда // Тр. ААНИИ. 1983. Т. 379. С. 75–88.
24. *Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М.* Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 16–26.
25. *Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М.* Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 41–50.
26. *Егоров А.Г.* Прогноз сроков устойчивого ледообразования в юго-западной части Карского моря // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 328.
27. *Егоров А.Г.* Долгосрочный прогноз сроков устойчивого ледообразования в северо-восточной части Карского моря // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2011. № 38. С. 56–78.
28. *Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Shushlebin A.I., Kolabutin N.V., Kornishin K.A., Efimov Y.O., Tarasov P.A., Volodin D.A.* Physical and Mechanical Characteristics of Sea Ice in the Kara and Laptev Seas // Proc. of the 29-th Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. Honolulu, USA, 2019. P. 2535–2539.
29. *Chenglin D., Sheng D., Zhifeng W.* Estimates of Sea Ice Mechanical Properties in the Kara Sea // Pure and Applied Geophysics. 2020. V. 177. P. 5101–5116.
18. *Timco G.W.* Flexural strength equation for sea ice. Cold Regions Science and Technology. 1994, 22 (3): 285–298.
19. *Andreev O.M., Drabenko D.V.* About the method of preparing the source data of different repeatability for thermodynamic modeling of ice in the Arctic. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2020, 10: 112–120. [In Russian].
20. *Gumbel E.* *Statistiki ekstremal'nykh znacheniy* Extreme Statistics. Moskva: Mir, 1965: 450 p. [In Russian].
21. <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11151-03062015-1-r>. *Rekomendatsii po raschetu klimaticheskikh norm. WMO. Sayt Gidromettsentra Rossii*. Recommendations for the calculation of climate standards. WMO Site of the Hydrometeorological Center of Russia.
22. *Gavrilov V.P., Kovalev S.M., Lebedev G.A., Nedoshivin O.A.* Mapping of the Barents and Kara Seas by strength and bearing capacity of first-year ice. Proc. of the 13th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition. Murmansk, Russia. 1995, 3: 69–77.
23. *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].
24. *Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolianitsky V.M.* The formation of the age composition of ice in the southwestern part of the Kara Sea in the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2017, 3 (113): 16–26. [In Russian].
25. *Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolianitsky V.M.* Seasonal changes in the age composition of ice in the north-eastern part of the Kara Sea in the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2016, 4 (110): 41–50. [In Russian].
26. *Egorov A.G.* Forecast of sustainable ice formation in the southwestern part of the Kara Sea. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. Modern problems of science and education, 2012, 4: 328. [In Russian].
27. *Egorov A.G.* Long-term forecast for sustainable ice formation in the northeastern Kara Sea. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. Test results of new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts. 2011, 38: 56–78. [In Russian].
28. *Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Shushlebin A.I., Kolabutin N.V., Kornishin K.A., Efimov Y.O., Tarasov P.A., Volodin D.A.* Physical and Mechanical Characteristics of Sea Ice in the Kara and Laptev Seas. Proc. of the 29-th Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. Honolulu, USA, 2019: 2535–2539.
29. *Chenglin D., Sheng D., Zhifeng W.* Estimates of Sea Ice Mechanical Properties in the Kara Sea. Pure and Applied Geophysics. 2020, 177: 5101–5116.