

Оценка пределов прочности льда на одноосное сжатие в Охотском море по данным измерений и расчётов

© 2021 г. С.В. Годецкий*, О.В. Кокин, О.А. Кузнецова, А.С. Цвезинский, В.В. Архипов

Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия

*godetskiystas@ya.ru

Estimation of ice strength limits for uniaxial compression in the Sea of Okhotsk according to measurements and calculations

S.V. Godetsky*, O.V. Kokin, O.A. Kuznetsova, A.S. Tsvetsinsky, V.V. Arhipov

N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow, Russia

*godetskiystas@ya.ru

Received December 17, 2020 / Revised September 22, 2021 / Accepted October 4, 2021

Keywords: *first-year ice, sea ice, sea of Okhotsk, uniaxial compressive strength.*

Summary

The data on the strength of sea ice obtained in the course of explorations in the Sea of Okhotsk are compared with the results of calculations for the purpose to test the applicability of analytical methods to the conditions of this Sea. Two groups of samples were used to determine the ice strength limit. The first group included samples obtained from smooth drifting ice fields, and the second one were samples obtained from ice blocks similar to hummocks on a surface of an ice field. The measured characteristics of the temperature and electrical conductivity of ice were used in calculations using empirical formulas. The calculated values of the ice strength limits were compared with the measurements. Note, that application of the ISO 19906:2008 methodology (International Technical Standard) provided greater variety of strength values of both smooth and hummocky ice, and the SP 38.13330.2012 methodology (Russian Technical Standard) underestimated the values. The algorithms from the «Guidelines for Calculating Ice Strength Limits» are suitable for estimating mean values, but do not provide comparable root-mean-square deviation values with real data of direct measurements. The results of calculating the strength characteristics allow us to conclude that to obtain the extremely possible strength values the direct measurements (field tests) are necessary. ISO 19906:2008 is most suitable for estimating the values of smooth ice from the methods under consideration, and the algorithm from the «Methodical Letter on calculating Ice Strength Limits» is better to use for an average assessment of ice blocks.

Citation: S.V. Godetsky, O.V. Kokin, O.A. Kuznetsova, A.S. Tsvetsinsky, V.V. Arhipov. Estimation of ice strength limits for uniaxial compression in the Sea of Okhotsk according to measurements and calculations. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (4): 561–570. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421040108.

Поступила 17 декабря 2020 г. / После доработки 22 сентября 2021 г. / Принята к печати 4 октября 2021 г.

Ключевые слова: *морской лёд, однолетний лёд, Охотское море, предел прочности на одноосное сжатие.*

Впервые для дрейфующего льда Охотского моря проведено сравнение измеренных и рассчитанных по инженерным методикам значений прочности морского льда на одноосное сжатие. Проанализирована точность российских и зарубежных алгоритмов расчёта с учётом региональной особенности ледовых условий. Сделан вывод, что средние значения прочности льда удовлетворительно воспроизводятся при помощи алгоритма В.В. Богородского, в то время как максимальные значения прочности более точно рассчитываются по методике ISO 19906:2008.

Введение

Один из ключевых факторов, влияющих на безопасность хозяйственной деятельности в российских морях, — морской лёд [1]. Свойства льда зависят от многих параметров: температуры, солёности, пористости, прочности, плотности, наличия минеральных и органических включений и т.д. Эти характеристики существенно меняются в зависимости от условий формирования льда [2, 3]. Согласно требованиям нормативной документации,

при проектировании техногенных конструкций на шельфе необходимо учитывать прочность морского льда [4, 5]. Алгоритмы для расчёта прочности льда, описанные в методических руководствах, базируются на материалах полевых исследований, выполненных преимущественно в Арктических морях, или на данных лабораторных экспериментов.

Главная проблема искусственных опытов — сложность воссоздания всех условий и факторов, влияющих на формирование льда в естественной среде. Основная сложность полевых экспе-

риментов связана с получением ледовых кернов и вариативностью условий, в которых ведётся их дальнейший лабораторный анализ [2]. Российские и зарубежные нормативы по расчёту прочности льда на одноосное сжатие дают разброс величин от 0,3 до 3,3 МПа [6]. Значения прочности льда на акваториях морей России, по данным полевых исследований, меняются от 0,5 до 12 МПа, что объясняется не только региональными свойствами льда, но и широкими спектрами изменения температуры образцов и скорости их нагружения с помощью специальных прессов [6].

Ледовые условия Охотского моря существенно отличаются от условий в морях Российской Арктики: весь лёд имеет местное происхождение, нет многолетних ледовых полей, толщина льда может достигать 180 см и более за счёт многократного наслоения в динамически активных районах, дрейф льда характеризуется высокими скоростями – до 130–140 см/с [7].

Анализ научной литературы и исторической информации по ледовым исследованиям, расчётных данных, работа над архивами карт, построенных на основе спутниковых снимков видимого и радиолокационного диапазонов, позволяют сделать вывод о том, что в ледяном покрове Охотского моря на всех стадиях его развития формируются региональные стабильные зоны и локальная однородность параметров их ледяного покрова может быть условием для районирования. Район Шантарских островов, Сахалинский залив, отличается активным формированием зон сжатий и деформаций льда. Под воздействием низких температур воздуха происходят смерзание и вынос сильно деформированного и восторошенного льда к северо-восточному побережью Сахалина. Включаясь в генеральный дрейф, он движется вдоль восточного побережья о. Сахалин на юг, образуя пояс максимальной ширины до 48 км труднопроходимого льда (даже для современных судов ледового класса) [8]. С севера на юг дрейфуют льды с более низкой солёностью, которые образовались в так называемом «мешке холода» у Шантарских островов и Сахалинского залива из поверхностных вод, сильно распреснённых речным стоком Амура [9]. Прочность льда в Охотском море пока изучена недостаточно.

Задача настоящего исследования – оценить применимость неспецифических методик расчёта прочности льда, описанных в российских и зарубежных инженерных руководствах [4,

10, 14], к условиям Охотского моря путём сравнения результатов вычислений с эмпирическими данными, полученными в ходе полевых работ на восточном шельфе о. Сахалин

Материалы и методы

Полевые исследования проходили в апреле 2016 и 2019 г. Работы вели в условиях умеренной (2016 г.) и мягкой зим (2019 г.) [9]. Уникальность исследования состоит в том, что накоплен большой массив данных. За два ледовых сезона 2016 и 2019 г. были отобраны и исследованы образцы с разных дрейфующих льдов. Исследования проходили в одно время (апрель) на одном и том же участке Охотского моря. Район работ охватывал северо-восточное побережье о. Сахалин – от Луньского залива до залива Пильтун. Измерения вели при помощи ледокольного судна как вдоль побережья, так и в море (от 30 до 80 км по нормали от берега) [13]. Для рассмотрения в данной статье выделены две группы кернов льда. К первой группе относятся образцы, полученные из ровного дрейфующего льда (далее – ровный лёд), ко второй – полученные из блоков льда в результате динамических процессов на поверхности ровного дрейфующего льда и образовавших различные ледяные формы (далее – блоки льда) (рис. 1).

Анализ содержания жидкой фазы в кернах показал, что формирование блоков льда может существенно различаться, однако все они после того как оказываются на поверхности ровного льда и перестают взаимодействовать с морской водой «осушаются» и приобретают отличные от ровного льда физико-механические свойства. Один из важных аспектов настоящей статьи – сравнение неоднородности и вариативности пределов прочности для «осушенных» блоков и ровного и дрейфующего льда. Образцы для испытания на одноосное сжатие представляют собой цилиндры льда высотой 15 см и диаметром 7,5 см (все геометрические параметры измеряли специализированным оборудованием). У каждого образца льда исследовали следующие три характеристики: предел прочности на одноосное сжатие, МПа; температуру, °С; солёность, ‰.

Предел прочности измерялся на специализированном электронном механическом ледовом прессе, в котором фиксируются высота поднятия



Рис. 1. Процесс отбора керна:

a – ровный лёд; *б* – блоки льда.

В статье рассматриваются две группы кернов льда. В первую группу входят образцы, полученные из плоского дрейфующего льда (ровный лёд), во вторую группу входят образцы, полученные из блоков льда, которые в результате динамических процессов оказались на поверхности ровного дрейфующего льда и образовали различные ледяные формы (блоки льда)

Fig. 1. Coring process:

a – level ice; *b* – ice blocks.

The article discusses two groups of ice cores. The first group includes samples obtained from flat drifting ice (level ice), the second group includes samples obtained from ice blocks, which, as a result of dynamic processes, appeared on the surface of flat drifting ice and formed various ice forms (ice blocks)

плиты пресса, а также время и сила нагружения образца (жёсткое нагружение). Перед выполнением полевых работ измерительное оборудование прошло проверку. Предел относительной погрешности измерения составлял 1%, частота записи данных – 2 Гц, средняя скорость нагружения образца – 0,23 МПа/с. Пресс находился в открытой лаборатории на палубе судна. Средняя температура воздуха во время работ, по данным судовой метеостанции, в 2016 г. составляла $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, в 2019 г. – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 2. Разрушение образца при испытании на одноосное сжатие в момент регистрации разрушающей (пиковой) нагрузки

Fig. 2. Fracture of a specimen during testing for uniaxial compression at the moment of registration of the breaking (peak) load

Плоско-параллельность образцов обеспечивалась разделкой на специализированном станке с закреплёнными циркулярными пилами, что позволяло обеспечить одинаковую высоту образцов и аккуратный продольный срез. При выполнении экспериментов использовали прокладки из полиэтилена, которые помещали на верхнюю и нижнюю плиты для повышения трения и предотвращения смещения образцов из-под плит пресса. На рис. 2 приведён фрагмент испытания образца в момент регистрации разрушающей (пиковой) нагрузки. Время подготовки образцов максимально минимизировалось: после извлечения керна до испытаний проходило не более 10–15 мин.

Предел прочности вычислялся по формуле [4]

$$\sigma = P/S,$$

где σ – предел прочности льда на сжатие, Па; P – нагрузка, при которой происходит разрушение, Н; S – площадь сечения образца, см^2 .

Таблица 1. Пример описания текстуры керна льда, отобранного при полевых работах 2016 г.

Глубина, см	Описание горизонта
0–115	Серовато-белый лёд, количество воздушных и солевых включений – 4 балла. Плотный, с равномерно распределёнными сферическими пузырьками $d = 0,1 \div 0,5$ мм, нитями длиной до 5 мм и цилиндрами $d = 0,5$ мм.
115–220	Белёсо-серый лёд с равномерно распределёнными воздушными включениями (1–2 балла), сферическими пузырьками $d = 0,5 \div 1$ мм, вертикально вытянутыми цилиндрами $d = 0,1 \div 0,5$ мм высотой до 4 мм.
229–243	Серый прозрачный лёд, пузырьков практически нет (<5% – до 1 балла), визуальное – мелкокристаллический лёд с изометричными зёрнами $1 \times 1, 1 \times 2$ мм. При нагреве керна рукой воздушные пузырьки появляются между кристаллами льда.
243–282	Блок прозрачного серого льда, раздробленные, с крупными наклонными каналами стока рассола, кавернами, заполненными мелкокристаллическим льдом – зёрна $d = 1 \div 3$ мм, часть каналов стока – полые, $d = 5 \div 6$ мм.
282–320	Серый прозрачный лёд (1 балл) с каналами стока рассола диаметром до 5–6 мм. Лёд зернистый, кристаллы $d = 2 \div 3$ мм.
320–390	Перемешанная толща – зёрна-кристаллы льда $d = 2 \div 3$ мм, блоки серого полупрозрачного льда (1–2 балла), границы между слоями наклонные.
390–420 (подшва керна)	Полупрозрачный лёд (2 балла), зёрна $d = 2 \div 3$ мм, при переворачивании керна между кристаллами возникают воздушные пузырьки. Полностью торос не пробурен – лёд продолжается и ниже; пробурен на максимальную глубину, которую позволяют имеющиеся штанги.

При измерении прочности льда замечен большой разброс исследуемой величины, что связано с пространственно-временной изменчивостью текстуры и подтверждается описанием кернов. Текстуру исследовали на каждой ледовой станции. Пример её описания дан в табл. 1.

Температура и солёность льда измерялись у керна, отобранного в 10–15 см от мест взятия образцов для испытания предела прочности. Температуру измеряли с шагом 10 см по всей толщине керна. Показатели солёности получали путём измерения электропроводности талого льда; образцы также отбирали с шагом 10 см.

Из всего массива полевых данных были отобраны и разделены на группы только те керны льда, которые примерно соответствовали толщине льда при естественном нарастании в апреле 2016 и 2019 гг. Возможное нарастание морского льда на момент проведения зимних исследовательских работ было оценено с помощью известных эмпирических формул:

а) Н.Н. Зубова [15] –

$$h_i^2 + 50h_i = 8\Sigma(-T_a);$$

б) В.П. Гаврило и К.К. Сухорукова [16] –

$$h_i^2 + 6,7h_i = 6,1\Sigma(-T_a);$$

в) В.П. Доронина [17] –

$$h_i^2 - h_i^0 = 12\Sigma(-T_a),$$

где h_i – толщина льда; h_i^0 – начальная толщина льда; $\Sigma(-T_a)$ – сумма градусодней мороза.

Данные формулы не учитывают теплофизические свойства снежного покрова и их влияние на нарастание льда. Расчёты были выполнены по СГДМ (сумме градусодней мороза), рассчитанной по значениям температур, зафиксированным на метеостанции сети Росгидромета на о. Большой Шантар (индекс ВМО 31174). Результаты расчётов СГДМ соответствуют времени выполнения полевых измерений на акватории Охотского моря. Они приведены в табл. 2. После расчётов СГДМ по эмпирическим формулам была выполнена оценка нарастания льда. Итоговые результаты возможной теоретической толщины льда даны в табл. 3.

Исходя из расчётных данных табл. 3 и сравнения их с полученными измерениями, были выделены критерии для анализа. Ровный лёд в исследуемом районе в данное время года примерно соответствовал толщине 110–120 и 100–110 см для 2016 и 2019 гг. соответственно. Для дальнейшего исследования были выбраны измерения в тех кернах, мощность которых соответствовала указанным здесь показателям. Предел прочности льда по методике из СП 38.13330.2012 [4] получают при помощи табличных значений и рассчитанного количества жидкой фазы. При расчёте количества жидкой фазы использовалась следующая формула [4]:

$$\xi_i = Swt(1 - 0,018ti)/0,018ti, 0 < ti < -7,3^\circ\text{C},$$

где ξ_i – количество жидкой фазы; Swt – солёность льда; ti – температура льда.

Таблица 2. Расчёты суммы градусодней мороза по данным ГМС Большой Шантар

Даты	Сумма градусодней мороза, °С	
	2016 г.	2019 г.
1 апреля	-2324	-2025
10 апреля	-2348	-2055
20 апреля	-2406	-2072

Расчёты по методике из ISO 19906:2008 [12] похожи на расчёты по методике СП 38.13330.2012 [4], так как в обоих случаях требуется определить количество жидкой фазы. По Международному стандарту [12] рассчитывать данную величину предлагается с применением формулы

$$v = S(49,18/|T| + 0,53),$$

где v – объёмная доля рассола; S – солёность льда; T – температура льда.

Предел прочности вычисляют по формуле [12]

$$\sigma = 37\varepsilon^{0,22}(1 - (v_i/0,27)^{0,5}),$$

где σ – предел прочности льда на сжатие, Па; ε – скорость деформации; v_i – общая объёмная доля пустот.

Методика допускает использование вместо параметра v_i параметр v . Скорость деформации ε можно заменить на коэффициент 0,22 [12]. Для расчёта предела прочности по алгоритму «Методического письма по расчёту пределов прочности льда» [11] была оцифрована номограмма зависимости обобщённого (среднего) предела прочности образцов льда при сжатии (МПа) от температуры для различных солёностей (рис. 3); каждая кривая соответствует определённой солёности льда. Для этого применялось программное обеспечение GetData Graph Digitizer. С целью упрощения дальнейшего процесса расчёта для кривых (см. рис. 3) были вычислены полиномиальные функции (табл. 4). Изучить поведение функции на графике, аппроксимировав её некоторым многочленом, часто легче, чем исследовать ту же функцию непосредственно с графика.

При помощи полученных полиномиальных функций и алгоритма, указанного в работе [11], были рассчитаны пределы прочности льда при сжатии. В расчётах использовали значения температуры и солёности льда, полученные при полевых исследованиях.

Таблица 3. Расчётная толщина морского льда по разным формулам для 2016 г. (числитель) и 2019 г. (знаменатель), см

Даты	Н.Н. Зубова	В.П. Доронина	В.П. Гаврило и К.К. Сухорукова
1 апреля	114/105	167/156	121/113
10 апреля	114/106	168/157	122/114
20 апреля	116/106	170/158	124/115

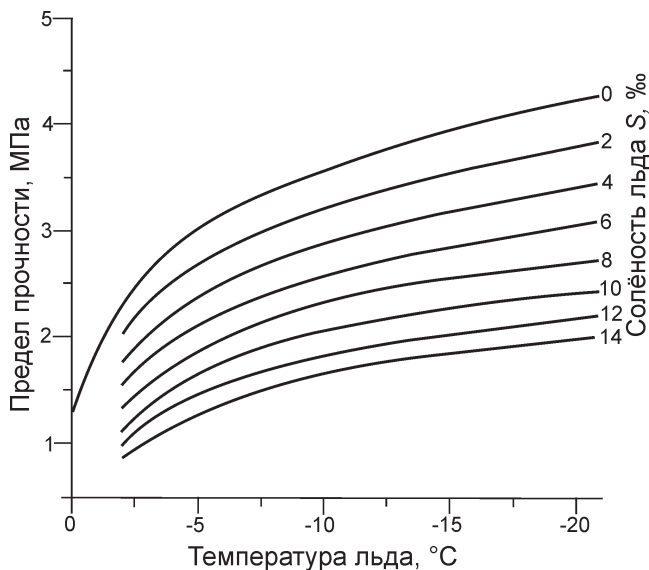


Рис. 3. Зависимости прочности льда на одноосное сжатие (МПа) от температуры (°С) при разной солёности льда (‰), построенные с использованием предрасчитанных полиномиальных функций по алгоритму В.В. Богородского [11]

Fig. 3. Dependence of ice uniaxial compressive strength (MPa) on temperature (°C) and salinity (‰) of ice, based on calculated polynomial functions, using algorithm of V.V. Bogorodsky [11]

Результаты

Данные о числе испытанных образцов морского льда и блоках сухого льда, результаты расчётов среднеквадратического отклонения (СКО) и средних значений предела прочности льда приведены в табл. 5. Вычисления были разделены на группы по измеренным температурам исследуемого керна. Зависимости средних значений предела прочности льда от температуры показаны на рис. 4. Прочность льда на одноосное сжатие по алгоритму [11] учитывает изменение температуры и солёности льда. Прочность, рассчитанная по методике [4] и [12], зависит от объёмной доли рассола. Самый большой массив полевых дан-

Таблица 4. Полиномиальные функции для предела прочности льда на одноосное сжатие при различной солёности, по данным из методического письма В.В. Богородского (X – температура образца, °C; Y – предел прочности образцов при сжатии, МПа)

Солёность, ‰	Полиномиальные функции
0	$Y = 1,29 - 0,65X - 9,08 \cdot 10^{-2}X^2 - 7,2 \cdot 10^{-3}X^3 - 2,8 \cdot 10^{-4}X^4 - 4,2 \cdot 10^{-6}X^5$
2	$Y = 1,17 - 0,555X - 7,3 \cdot 10^{-2}X^2 - 5,67 \cdot 10^{-3}X^3 - 2,2 \cdot 10^{-4}X^4 - 3,3 \cdot 10^{-6}X^5$
4	$Y = 0,91 - 0,53X - 7,1 \cdot 10^{-2}X^2 - 5,565 \cdot 10^{-3}X^3 - 2,19 \cdot 10^{-4}X^4 - 3,4 \cdot 10^{-6}X^5$
6	$Y = 0,83 - 0,44X - 5,4 \cdot 10^{-2}X^2 - 4 \cdot 10^{-3}X^3 - 1,55 \cdot X^4 - 2,35 \cdot 10^{-6}X^5$
8	$Y = 0,72 - 0,365X - 3,78 \cdot 10^{-2}X^2 - 2,5 \cdot 10^{-3}X^3 - 9,1 \cdot 10^{-5}X^4 - 1,37 \cdot 10^{-6}X^5$
10	$Y = 0,44 - 0,42X - 4,8 \cdot 10^{-2}X^2 - 3,1 \cdot 10^{-3}X^3 - 10^{-4}X^4 - 1,26 \cdot 10^{-6}X^5$
12	$Y = 0,39 - 0,368X - 4,4 \cdot 10^{-2}X^2 - 3,2 \cdot 10^{-3}X^3 - 1,2 \cdot 10^{-4}X^4 - 1,76 \cdot 10^{-6}X^5$
14	$Y = 0,52 - 0,2X - 1,16 \cdot 10^{-2}X^2 - 2,89 \cdot 10^{-4}X^3 + 3,3 \cdot 10^{-6}X^4 + 9,12 \cdot 10^{-8}X^5$

Таблица 5. Расчёт среднеарифметических значений (знаменатель) и средних квадратических отклонений (числитель) прочности льда на одноосное сжатие разными методами

Температура льда, °C	Полевые данные, МПа	По алгоритму В.В. Богородского, МПа	По методике из СП 38.13330.2012, МПа	По методике из ISO 19906:2008 г, МПа	Число образцов
<i>Ровный лёд</i>					
-1	1,21/1,70	0,11/1,45	0,19/0,90	0,83/1,82	18
-2	1,44/2,03	0,13/1,58	0,15/1,01	0,67/2,34	124
-3	0,60/1,03	0,34/1,95	0,37/1,42	1,27/3,76	9
<i>Блоки льда</i>					
-1	0,77/1,74	0,12/1,50	0,94/1,37	1,20/3,90	27
-2	0,55/1,88	0,24/1,74	0,71/1,04	1,46/3,43	5

ных получен из кернов ровного льда при температуре -2 °C, 124 образца). Значения солёности данных образцов находятся в диапазоне от 2 до 8,5 ‰. Вероятно, такие колебания обусловлены расположением образцов на различных горизонтах. В кернах из блоков льда – разброс от 0 до 4 ‰. Здесь неоднородность солёности обусловлена разным временем «осушения» данных блоков после подъёма на поверхность дрейфующего льда в результате той или иной деформации ледяного покрова. На рис. 5 представлены данные предела прочности льда, распределённые по глубине их отбора, для двух зимних исследовательских работ: 2016 и 2019 гг. Также на рис. 5 приведены данные, полученные по расчётным эмпирическим формулам.

Обсуждение результатов

Главная задача данной работы – изучить неоднородность и вариативность прочностных свойств льда, а также возможность повторить их с помощью эмпирических формул. Эти зада-

чи имеют как прикладной, так и научный интерес, так как ранее не было подобных сравнений для данного вида морского льда в рассматриваемом районе Охотского моря. В работе [18] изучается прочность ледяного поля в заливе Петра Великого, рассматривается ровный припайный лёд, коэффициент неоднородности которого 0,75. Рассматриваемый в данной работе ровный дрейфующий лёд имеет коэффициент неоднородности 0,23, блоки льда – 0,5. Это связано с тем, что дрейфующий лёд имеет более сложную текстуру и подвержен постоянным динамическим нагрузкам в отличие от изучаемого в заливе Петра Великого припайного льда. Как уже отмечалось, неоднородность блоков льда – 0,5, они более однородны, чем рассматриваемый ровный дрейфующий лёд, а значит есть больше возможностей корректно описать их прочностные свойства эмпирическими формулами, несмотря на то, что они находятся под неконтролируемым атмосферным воздействием, вероятно, даже инсоляции. Возможность воссоздания прочностных свойств льда вызывает большой интерес, так как именно дрейфу-

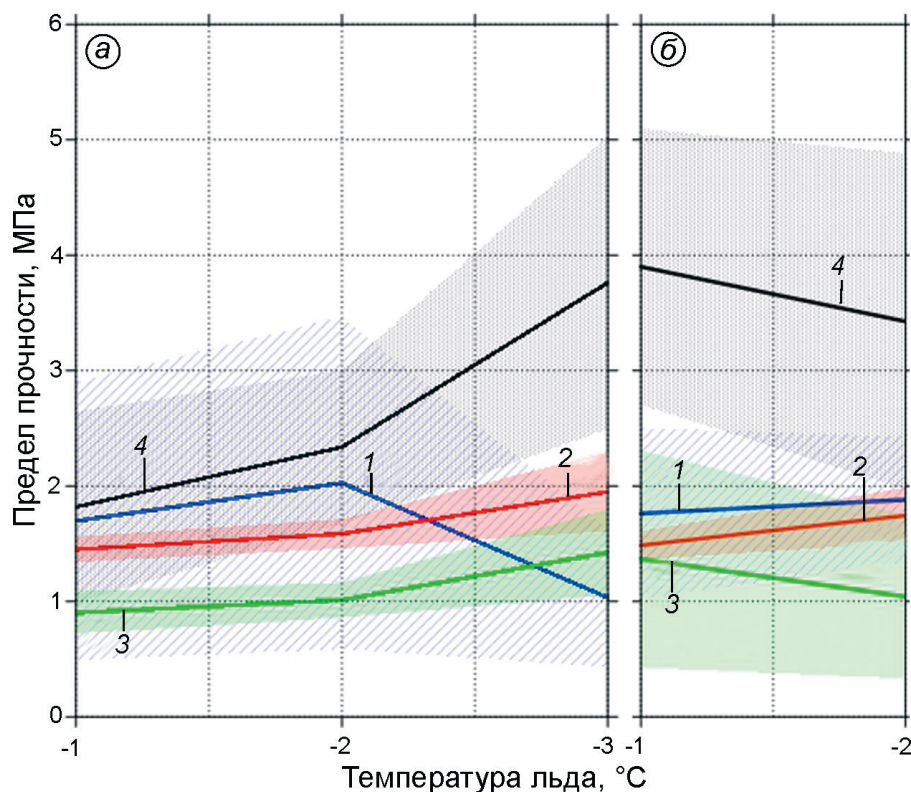


Рис. 4. Зависимость прочности морского льда на одноосное сжатие (МПа) от температуры (°С):

a – ровный лёд; *б* – блоки льда; *1* – полевые данные; *2* – алгоритм В.В. Богородского [11]; *3* – методика из СП 38.13330.2012 [4]; *4* – методика из ISO 19906:2008 [12]

Fig. 4. Dependence of ice uniaxial compressive strength (MPa) on temperature (°C):

a – level ice; *b* – ice blocks; *1* – field data; *2* – V.V. Bogorodsky algorithm [11]; *3* – method of SP 38.13330.2012 [4]; *4* – method of ISO 19906:2008 [12]

ющий лёд представляет собой существенную угрозу для техногенных сооружений [4, 5, 12].

По графикам зависимости прочности ровного льда от его температуры (см. рис. 4, 5) можно сделать вывод, что расчётные величины среднего арифметического значения прочности получились максимально приближёнными к полевым данным по алгоритму [11] и методике ISO 19906:2008 [12] для образцов льда температурой -1 и -2 °С. Для льда температурой -3 °С близкими по расчётам оказались значения, полученные по методике из СП 38.13330.2012 [4], однако испытаний таких образцов в рамках полевых исследований было проведено значительно меньше, поэтому их влияние статистически менее значимо. При использовании методики СП 38.13330.2012 [4] необходимо рассчитывать количество жидкой фазы («обводнённость»). Если количество жидкой фазы сравнительно мало (1–10 г/кг), то показатели прочности льда оказываются завышенными в 3–4 раза относительно тех, которые были получены при полевых испытаниях. Если же количество жидкой фазы составляет более 10 г/кг, то показатели прочности в основном оказываются занижены. В зависимости от обводнённости образцов к сближению теоре-

тических вычислений и полевых данных приводят разные формулы расчёта предела прочности.

Отметим, что количество данных для температур -3 °С в 15 раз меньше, чем для температур -1 и -2 °С. Разброс значений СКО, вычисленных по эмпирическим формулам, меньше, чем значений СКО, полученных при помощи испытаний на одноосное сжатие в рамках полевых испытаний. Натурные данные показывают большой диапазон изменения прочностных характеристик из-за пространственной неоднородности текстуры льда. Большее разнообразие величин предела прочности как ровного, так и блоков льда даёт применение методики из ISO 19906:2008 [12]. Для образцов ровного льда методика из СП 38.13330.2012 [4] скорее занижала значения, а для образцов льда, полученных из блоков льда, значения предела прочности, напротив, были завышены. Алгоритм [11] из инструкции не дал сравнимых значений СКО с реальными полевыми данными как в случае с ровным льдом, так и в случаях с блоками льда. Однако при сравнении среднеарифметических значений пределов прочности льда данные, расчеты [11] адекватно приближаются к полевым значениям (см. табл. 5).

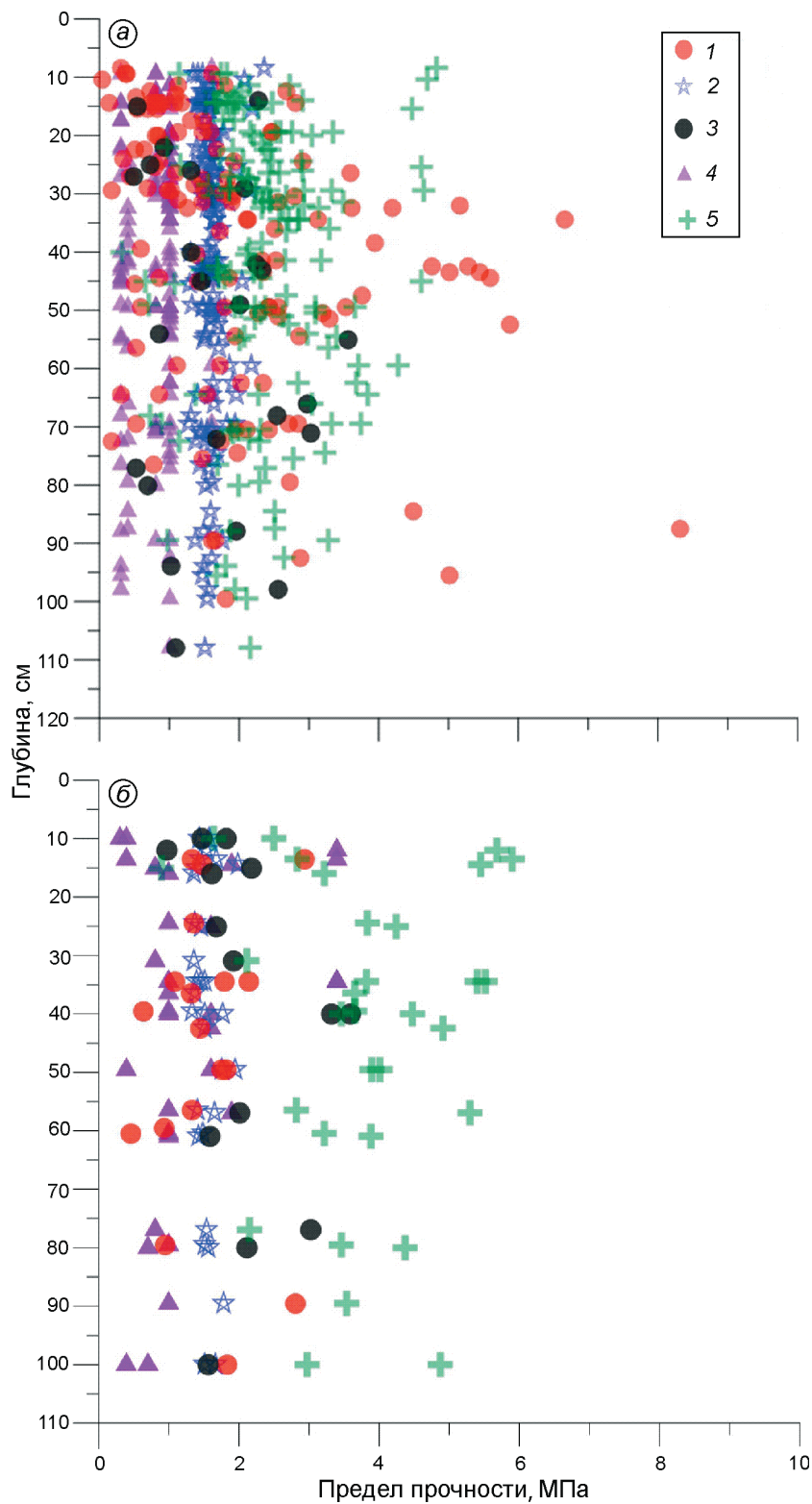


Рис. 5. Вертикальное распределение прочности льда (МПа) по горизонтам (см) отбора образцов: *a* – ровный лёд; *б* – блоки льда; 1 – полевые данные 2019 г.; 2 – алгоритм В.В. Богородского [11]; 3 – полевые данные 2016 г.; 4 – методика из СП 38. 13330.2012 [4]; 5 – методика из ISO 19906:2008[12])

Fig. 5. Vertical distribution of ice uniaxial compressive strength (MPa) along the horizons (cm) of sampling: *a* – level ice; *б* – ice blocks; 1 – field data 2019; 2 – V.V. Bogorodsky algorithm [11]; 3 – field data 2016; 4 – method of SP 38. 13330.2012 [4]; 5 – method of ISO 19906:2008[12])

Выводы

На основе массива полевых наблюдений за прочностью льда проанализированы свойства дрейфующего льда на северо-восточном шельфе Охотского моря. Уникальность данных состоит в том, что накоплен большой массив данных за два ледовых сезона 2016 и 2019 гг., когда были отобраны и исследованы образцы с разных дрейфующих льдов. Средняя прочность ровного льда составила 1,93 МПа (СКО = 1,38 МПа), максимальная – 8,31 МПа. Средняя прочность блоков льда – 1,78 МПа (СКО = 0,7 МПа), максимальная – 3,58 МПа.

Впервые для северо-восточного шельфа о. Сахалин в период максимального развития ледяного покрова проведено сравнение значений прочности льда на одноосное сжатие, полученных на дрейфующем льду и рассчитанных по имеющимся эмпирическим формулам. Установлено, что в целом средние значения как в случае с ровным льдом, так и с блоками удовлетворительно воспроизводятся при помощи алгоритма В.В. Богородского. Максимальные значения для ровного льда более

точно рассчитываются по методике, описанной в ISO 19906:2008. В условиях мягких и умеренных зим методика, изложенная в СП 38.13330.2012, показала для рассматриваемого района неудовлетворительные результаты как при оценке средних, так и максимальных значений прочности льда на одноосное сжатие. На основе результатов анализа сделан вывод, что для расчёта оценочных значений предела прочности льда на одноосное сжатие при проектировании и эксплуатации техногенных сооружений на северо-восточном шельфе о. Сахалин целесообразно использовать методику из ISO 19906:2008, так как она наиболее точно воспроизводит максимальные прочности льда в условиях умеренной и мягкой зимы.

Благодарности. Участие О.В. Кокина поддержано в рамках госбюджетной темы лаборатории геоэкологии Севера географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051100167-1).

Acknowledgements. Participation of O.V. Kokin supported within the framework of the state task of the Laboratory of Geoecology of the Northern territories, Geography faculty, MSU (№ 121051100167-1).

Литература

1. Шибакин С.И., Рогачко С.И. Нагрузки и воздействие на морские нефтегазопромысловые гидротехнические сооружения. М.:ООО «Газпром экспо», 2000. 120 с.
2. Ким Л.В. Безопасность мобильных морских буровых установок при обтекании потоком «контролируемого» льда // Вестн. Инженерной школы ДВФУ. 2019. № 2 (39). С. 100–108.
3. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: Изд-во Главсевморпути, 1945. 139 с.
4. СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (Волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04–82» (российский технический стандарт). М.: Минрегион России, 2016. 106 с.
5. СН 2.06.04–82. «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» (российский технический стандарт). М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 116 с.
6. Поломошнов А.М., Попников Е.Е., Шамсудинов Р.Е. Региональные особенности ледовых условий акваторий морских нефтегазовых месторождений // Инновации и инвестиции. 2020. № 7. С. 250–254.
7. Шевченко Г.В., Тамбовский В.С. Динамика дрейфа льда на северо-восточном шельфе острова Са-

References

1. Shibakin S.I., Rogachko S.I. *Nagruzki i vozdejstvie na morskije naftegazopromyslovyje gidrotekhnicheskie sooruzheniya*. Loads and impacts on offshore oil and gas field hydraulic structures. Moscow: ООО «Gazprom eksp», 2000: 120 p. [In Russian].
2. Kim L.V. Safety of mobile offshore drilling rigs when flowing around with a flow of «controlled» ice. *Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU*. Engineering school bulletin DVFU. 2019, 2 (39): 100–108. [In Russian].
3. Zubov N.N. *L'dy Arktiki*. Arctic ice. Moscow: Izd-vo Glavsevmorputi, 1945: 139 p. [In Russian].
4. SP 38.13330.2012 «Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships) (Russian technical standard). Updated edition SNiP 2.06.04–82». Moscow: Minregion Rossii, 2016: 106 p. [In Russian].
5. SN 2.06.04–82. «Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships)» (Russian technical standard). Moscow: CITP Gosstroya SSSR, 1989: 116 p. [In Russian].
6. Polomoshnov A.M., Popnikov E.E., Shamsudinov R.E. Regional features of ice conditions in offshore oil and gas fields. *Innovaczii i investiczii*. Innovation and investment. 2020, 7: 250–254. [In Russian].
7. Shevchenko G.V., Tambovskij V.S. Ice drift dynamics on the northeastern shelf of Sakhalin Island as measured by radar stations. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik vesti gazovoj nauki*. Scientific and technical collection to conduct gas science. 2017, 4 (32): 121–128. [In Russian].

- халин по данным измерений радиолокационными станциями // Вести газовой науки. 2017. Т. 4. № 32. С. 121–128.
8. Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М., Трусков П.А., Покрашенко С.А. Районирование ледяного покрова охотского и японского морей // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 3. С. 209–217.
 9. Думанская И.О. Ледовые условия морей Азиатской части России. М.–Обнинск: Изд-во ИГ – СОЦИН, 2017. 640 с.
 10. Жабин И.А., Абросимова А.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А. Влияние Амура на гидрологические условия Амурского лимана и Сахалинского залива Охотского моря в период весенне-летнего паводка // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 93–100.
 11. Методическое письмо по расчету пределов прочности льда / Ред. В.В. Богородский. Л.: изд. ААНИИ, 1983. 49 с.
 12. ISO 19906:2008 (Международный технический стандарт). Petroleum and Natural Gas Industries – Arctic Offshore Structures. P. 188–190.
 13. Лобанов А.В., Горева Е.В., Вераско К.С., Онищенко Д.А. Исследование особенностей гидрометеорологического режима на акватории глубоководной части шельфа о. Сахалин в Охотском море // Газовая промышленность. 2018. № 5 (768). С. 30–40.
 14. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Вып. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 215 с.
 15. Зубов Н.Н. О льдах Арктики и Антарктики. М.: Изд-во МГУ, 1956. 118 с.
 16. Гаврило В.П., Сухорукова К.К. Исследование динамики образования морского льда гидроакустическим методом // Тр. ААНИИ. 1980. Т. 374. С. 85–96.
 17. Доронин Ю.П. К вопросу о нарастании морского льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1959. Вып. 1. С. 73–83.
 18. Беккер А.Т., Фарафонов А.Э., Помников Е.Е. Неоднородность ледяных полей // Вестн. Инженерной школы ДВФУ. 2017. №3 (32). С. 64–71.
 8. Minervin I.G., Romanyuk V.A., Pishchal'nik V.M., Truskov P.A., Pokrashenko S.A. Area of the ice cover of the Okhotsky and Japanese sea. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2015, 85 (3): 209–217. [In Russian].
 9. Dumanskaya I.O. *Ledovye usloviya morej Aziatskoj chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Moscow–Obninsk: IG – SOCZIN, 2017: 640 p. [In Russian].
 10. Zhabin I.A., Abrosimova A.A., Dubina V.A., Nekrasov D.A. Influence of the Amur on the hydrological conditions of the Amur estuary and the Sakhalin bay of the Sea of Okhotsk during the spring-summer flood. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2010, 4: 93–100. [In Russian].
 11. *Metodicheskoe pis'mo po raschetu predelov prochnosti l'da*. Methodological letter on the calculation of ice strength limits. Ed.: V.V. Bogorodskiy. Leningrad: AANII, 1983: 49 p. [In Russian].
 12. ISO 19906:2008 (International technical standard). Petroleum and Natural Gas Industries – Arctic Offshore Structures: 188–190.
 13. Lobanov A.V., Goreva E.V., Verasko K.S., Onishhenko D.A. Study of the peculiarities of the hydrometeorological regime in the water area of the deep-water part of the shelf on Sakhalin in the Sea of Okhotsk. *Gazovaya promyshlennost*. GAS Industry of Russia. 2018, 5 (768): 30–40. [In Russian].
 14. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej*. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 9 (1): 215 p. [In Russian].
 15. Zubov N.N. *O ldah Arktiki i Antarktiki*. On the ice of the Arctic and Antarctic. Moscow: MGU, 1956: 118 p. [In Russian].
 16. Gavrilov V.P., Sukhorukova K.K. Investigation of the dynamics of sea ice formation by the hydroacoustic method. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1980, 374: 85–96. [In Russian].
 17. Doronin Y.P. To the question of the growth of sea ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic problems. 1959, 1: 73–83. [In Russian].
 18. Bekker A.T., Farafonov A.E., Pomnikov E.E. Inhomogeneity of ice fields. *Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU*. Engineering school bulletin DVFU. 2017, 3 (32): 64–71. [In Russian].