

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-44-57>  
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## Оценки некоторых физико-механических характеристик льда Обской губы

*О.М. Андреев<sup>1\*</sup>, Н.В. Головин<sup>1</sup>, Н.А. Крупина<sup>1</sup>, Н.В. Кубышкин<sup>2</sup>,  
А.А. Скутин<sup>1</sup>, А.В. Чернов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> — ООО «Арктик Шельф Консалтинг», Санкт-Петербург, Россия

\**andoleg@aari.ru*

### Резюме

Ледяной покров Обской губы формируется в зоне смешения морских и пресных вод, и изучению особенностей ряда характеристик такого льда посвящено данное исследование. Рассмотрены физико-механические характеристики ровного льда Обской губы по данным полевых исследований, проведенных за последние 30 лет. Приведены сведения по температуре льда в течение всего ледового сезона, показано изменение солёности льда в губе с географической широтой, даны оценки плотности и пористости льда. Проведен анализ соответствия натуральных данных по прочности образцов пресного льда при одноосном сжатии с приложением нагрузки параллельно поверхности ледяного покрова с оценками прочности, рекомендованными нормативными и методическими руководствами. Результаты, полученные в ходе анализа прочностных характеристик льда Обской губы, при необходимости могут быть использованы в практических целях.

**Ключевые слова:** Обская губа, плотность льда, прочность льда, солёность льда, температура льда, физико-механические свойства льда.

**Для цитирования:** Андреев О.М., Головин Н.В., Крупина Н.А., Кубышкин Н.В., Скутин А.А., Чернов А.В. Оценки некоторых физико-механических характеристик льда Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 44–57. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-44-57>.

Поступила 27.01.2023

После переработки 28.02.2023

Принята 01.03.2023

## Estimates of certain physical and mechanical characteristics of ice in the Ob' Bay

*Oleg M. Andreev<sup>1\*</sup>, Nikolay V. Golovin<sup>1</sup>, Nina A. Krupina<sup>1</sup>,  
Nikolay V. Kubyshkin<sup>2</sup>, Andrey A. Skutin<sup>1</sup>, Alexey V. Chernov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> — *State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> — *“Arctic Shelf Consulting” LLC, St. Petersburg, Russia*

*\*andoleg@aari.ru*

## Summary

The ice cover of the Gulf of Ob is formed in an extended zone, where the sea and fresh waters are mixed. This study aims to evaluate certain physical and mechanical characteristics of such ice. It examines data on a complex of physical and mechanical fast ice characteristics in the Ob' Bay, obtained in the course of field studies over the last 30 years. The total amount of data available to the team of authors exceeds 200 cores, sampled in the Ob' Bay (from Novy Port to the boundary between the Bay and the Kara Sea) in different years and in different months of the ice season.

Processed data on ice temperature are presented, as well as information on the evolution of integral ice temperature during ice season. The change of integral ice salinity in the Ob' Bay with geographic latitude is identified and shown, and the function approximating this change is given.

The estimates of average density and porosity of ice by thickness are presented. The effect of mineral inclusions on the increase in ice density is considered.

An analysis was carried out of the correspondence between the field data on fresh and saline ice sample strength in uniaxial compression (with the load application parallel to the ice cover surface) with theoretical strength estimates from Russian and foreign scientific and methodological literature, based on the data obtained on physical and mechanical ice characteristics in the Ob' Bay. A generalized estimate of the saline ice strength limit in the Ob' Bay, obtained in uniaxial compression parallel to the surface of ice accumulation is given, as well as its approximation by lognormal distribution.

The results obtained in the analysis of the strength characteristics of ice in the Gulf of Ob can be used for practical purposes. The results may also prove useful in terms of contribution to theoretical knowledge on the experimental mechanics of ice in desalinated water bodies.

**Keywords:** ice density, ice salinity, ice strength, ice temperature, Ob' Bay, physical and mechanical properties of ice.

**For Citation:** *Andreev O.M., Golovin N.V., Krupina N.A., Kubyshkin N.V., Skutin A.A., Chernov A.V.* Estimates of certain physical and mechanical characteristics of ice in the Ob' Bay. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research*. 2023, 69 (1): 44–57. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-44-57>.

Received 27.01.2023

Revised 28.02.2023

Accepted 01.03.2023

## ВВЕДЕНИЕ

Исследованию ледяного покрова Обской губы посвящено большое количество публикаций. Большинство из них рассматривают вопросы наступления (сроков) основных ледовых фаз, положения границы припая и Обь-Енисейской заприпайной полыньи, толщины льда, торосистости ледяного покрова, дрейфа льда. Очень слабо освещена в литературе тема физико-механических свойств льда Обской губы, при том, что эта тема весьма актуальна в условиях активного хозяйственного освоения этого природного объекта. Обрывочные сведения по отдельным характеристикам комплекса физико-механических свойств льда можно встретить в работах [1, 2, 3 и др.]. К сожалению, приведенные в этих работах сведения недостаточны для того, чтобы сформировать у большого сообщества специалистов, работающих в Обской губе (управленцев, менеджеров нефтегазовых компаний, проектировщиков и строителей, моряков, научных сотрудников и пр.), правильное представление о том, насколько

лед в этом регионе по своим свойствам специфичен по сравнению со льдами внутренних водных объектов или шельфовой зоны других регионов России (по которым накоплен достаточно большой объем данных).

В научной литературе, посвященной ледяному покрову природных водоемов, сложилось разделение на пресноводные и морские льды. Для них выведены соответствующие корреляционные зависимости, связывающие соленость льда с его толщиной, прочностные характеристики с температурой, соленостью и плотностью льда (или определяемыми через них соотношениями фазового состава льда). Данные зависимости хорошо известны и приводятся в соответствующей нормативной литературе и руководящих документах. Ледяной покров Обской губы включает в себя пресноводные льды (низовья Оби, южная часть Обской губы и Тазовская губа), морские льды (граница Обской губы и Карского моря) и наименее изученные (наименее представленные в научной литературе) льды распресненных водоемов, ежегодно образующиеся в губе между пресноводными и морскими льдами на отрезке протяженностью в несколько сотен километров.

В рамках данного исследования будет проведен анализ всех имеющихся в распоряжении авторов данных о физико-механических характеристиках ледяного покрова на всем протяжении губы. Наиболее важны в данном аспекте сведения о прочностных характеристиках льда, максимальные значения которых определяют нагрузки на гидротехнические сооружения и суда, а минимальные — отвечают за возможность безопасного проведения хозяйственной деятельности на поверхности ледяного покрова. Таким образом, основной целью проводимого исследования является получение обоснованных оценок (или отыскание функциональных зависимостей) для некоторых физико-механических характеристик льда на акватории Обской губы.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Коллектив авторов располагает данными по более чем 200 кернам, отобранным в Обской губе (от Нового Порта до границы губы с Карским морем) в разные годы и в различные месяцы ледового сезона. В этих кернах определялись те или иные характеристики льда (температура, соленость, плотность, пределы прочности при различных нагружениях льда). Указанные керны отбирались в ходе специальных ледоисследовательских экспедиций, проводимых в Обской губе ААНИИ, АМИГЭ и другими организациями в течение более чем трех десятков лет (первый керн датируется апрелем 1987 г., последний — декабрем 2022 г.; ледоисследовательские работы на момент написания настоящей статьи продолжаются). Распределение ледоисследовательских станций с определением физико-механических характеристик льда по акватории губы представлено на рис. 1.

Заметим, что определение физико-механических характеристик льда не входит в состав стандартных ледовых наблюдений, осуществляемых на береговых гидрометеорологических станциях. Значительная часть данных получена в рамках хозяйственных проектов, в том числе в ходе инженерных изысканий и специальных исследований для проектирования и строительства гидротехнических объектов (порт Сабетга, Салмановский причал, Новопортовский терминал круглогодичной отгрузки нефти и др.), а также в процессе специализированного гидрометеорологического обеспечения транспортных и строительных операций. В большей части экспедиций авторы настоящей статьи принимали непосредственное участие, а в отдельных случаях — данные были получены от коллег по ледоисследовательским работам или

взяты из соответствующих архивных технических отчетов.

Важно, что все используемые нами для анализа данные были получены на припайном льду, который большую часть ледового сезона распространяется на всю ширину Обской губы в довольно значительной ее части: от морского края дельты Оби до южной границы заприпайной полыньи [2, 4], а также он устанавливается вдоль ямальского и гыданского берегов губы, образуя западную и восточную границы полыньи.

**МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Температура льда**

Ледяной покров представляет собой тонкую пластину, температура нижней границы которой равна температуре замерзания или таяния льда и меняется в течение ледового сезона весьма слабо. Температура верхней поверхности ледяной пластины определяется радиационным балансом, турбулентным теплообменом с атмосферой, толщиной снежного покрова и притоком тепла фазовых переходов из толщи льда. Несмотря на значительную меридиональную протяженность Обской губы (более 800 км), условия, определяющие температуру льда, можно признать до некоторой степени однородными (по крайней мере на участке от Нового Порта до северной границы губы, на котором распределен массив рассматриваемых нами данных). Например, среднегодовые значения температуры воздуха по наблюдениям на ГМС Мыс Каменный, Тамбей и Дровяной различаются не более чем на 1 °С. Это позволяет нам объединить все имеющиеся данные по температуре льда для акватории Обской губы в единый массив и рассмотреть, как она меняется в течение ледового сезона.

Температура льда измерялась в кернах на горизонтах (обычно кратных 10 см) при помощи электронных термометров со щупом. Щуп термометра помещался в отверстие, высверленное ручной дрелью, а само сверло подбиралось под диаметр щупа, чтобы минимизировать зазор между измерительным элементом и льдом.

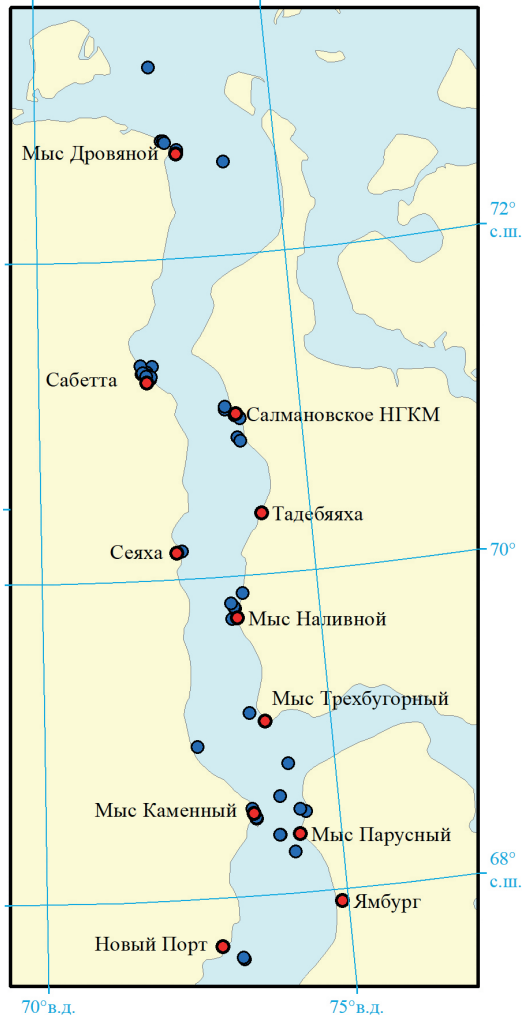


Рис. 1. Схема расположения ледоисследовательских станций в Обской губе

Fig. 1. Location scheme of ice research stations in the Ob' Bay

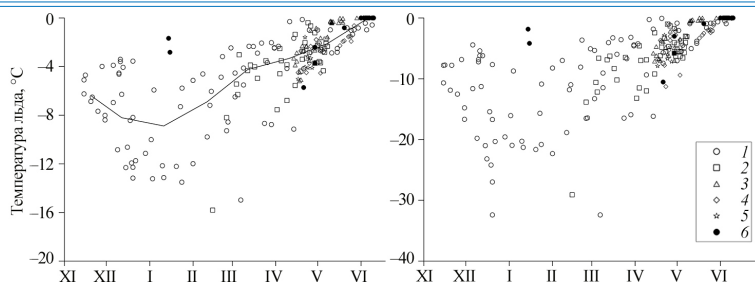


Рис. 2. Средняя по толщине температура льда в Обской губе (а) и минимальная температура льда в керне (б):

1 — в районе мыса Каменный, 2 — в районе Сабетты, 3 — Салмановское (Утреннее) НГКМ, 4 — в районе мыса Дровяной, 5 — в районе Геофизического НГКМ, 6 — другие районы, 7 — среднемесячные значения по всему объему данных

Fig. 2. Average ice temperature by thickness in the Ob' Bay (a) and minimum ice temperature in the core (b):

1 — in the area of the cape Kamenny, 2 — in the area of the Sabetta, 3 — Salmanovskoe (Utrennee) OGCF, 4 — in the area of the cape Drovyanoy, 5 — in the area of the Geofisicheskoe OGCF, 6 — other areas, 7 — average monthly values over the entire data volume

На рис. 2а представлен весь объем данных по средней по толщине температуре льда в Обской губе с ноября по июнь. На рис. 2б приведен аналогичный график для минимальных значений температуры в отобранных кернах, которые чаще всего регистрируются в верхнем слое ледяного покрова, но во время продолжительных оттепелей и весеннего прогрева льда могут смещаться в средний и даже в нижний слои льда. Последнее имеет место для периода таяния льда, когда большая часть ледяной толщи прогревается до нулевой температуры, а в нижнем слое температура льда еще близка к температуре замерзания соленой или солоноватой воды.

Средние даты начала устойчивого ледообразования в Обской губе относятся к октябрю, но возможность выхода на лед для определения его характеристик появляется только с установлением вдольберегового припая (в среднем конец октября — середина ноября). Временной интервал между средними датами образования припая (окончательного полного замерзания) по многолетним данным стационарных наблюдений (по оценкам, приведенным в [4]) составляет: между мысом Каменный и Тамбеем 5 суток, между мысом Каменный и полярной станцией Дровяная — 10 суток, т. е. вдольбереговой припай устанавливается достаточно быстро вдоль всего протяженного побережья губы (причем вдоль западного берега раньше, чем вдоль восточного). Наиболее ранние измерения температуры льда в нашей выборке датированы 15 ноября и выполнены в районе мыса Каменный. В середине ноября средняя по толщине температура льда уже достигает значений  $-5 \dots -6$  °С. Осредненная по всем имеющимся данным за вторую половину ноября средняя по толщине температура льда составила  $-6,4$  °С; минимальное локальное значение температуры (поверхность льда) равно  $-16,7$  °С.

Зимние месяцы отличаются не только самыми низкими температурами льда, но и наибольшей дисперсией значений (см. рис. 2). В это время толщина снега на льду сравнительно небольшая, встречаются участки совершенно без снега, из-за чего температура льда сильнее подвержена влиянию перепадов температуры воздуха, чем в весенний период. Температура поверхности льда с декабря по март

может опускаться ниже  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (абсолютный зарегистрированный минимум в Обской губе  $-32,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), при этом средняя по толщине температура льда понижается до  $-14\dots-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако среднемесячные оценки средней по толщине температуры льда в течение всего ледового сезона выражаются однозначными значениями целой части (в декабре  $-8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в январе  $-8,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в феврале  $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в марте уже наблюдается подъем до  $-4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

На графиках (см. рис. 2) хорошо заметно, что наибольшая плотность точек приходится на вторую половину апреля — первую половину мая. Именно в это время проводится основная часть ледоисследовательских экспедиций, т. к. в этот период ледяной покров Обской губы достигает максимальной толщины, а также имеет место наиболее благоприятное для проведения полевых работ сочетание продолжительности светлого времени суток и температуры воздуха. Среднемесячная температура льда (средняя по толщине) в апреле составляет  $-3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в мае  $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Локальные минимумы температуры льда в первой половине мая обычно не опускаются ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а во второй половине стабильно выше  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В конце мая — начале июня лед в Обской губе практически каждый год равномерно прогрет до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этом в отдельные годы вся толща ледяного покрова прогревается до околонулевых значений температуры уже в апреле.

### Соленость льда

Обская губа является уникальным водным объектом — в течение ледового сезона здесь одновременно присутствуют пресные (пресноводные) льды и льды распресненных водоемов, а при определенных условиях образуются и морские льды. Соленость льда зависит от солености воды, скорости нарастания льда и процессов перераспределения солей в уже образовавшемся льду (к последним относят, в частности, опреснение льда со временем). Известно, что соленость льда в губе повышается от нулевых значений (на участке губы к югу от соединения с Тазовской губой) до значений, характерных для морского льда (2–6 ‰), на границе Обской губы и Карского моря. Данные многолетних натуральных измерений солености льда насчитывают 60 кернов и позволяют получить некоторые оценки границы переходной зоны от пресных к морским льдам.

На рис. 3а представлено распределение средней по толщине солености льда  $S$  в Обской губе в зависимости от географической широты  $\varphi$ , а также кривая, аппроксимирующая это распределение, уравнение которой записывается в следующем виде:

$$S(\%) = \begin{cases} 0, & \varphi < 69,73^{\circ} \text{ ш.} \\ a_4\varphi^4 + a_3\varphi^3 + a_2\varphi^2 + a_1\varphi + a_0, & \varphi \geq 69,73^{\circ} \text{ ш.} \end{cases} \quad (1)$$

Значения коэффициентов  $a_i$  приведены в таблице.

*Таблица*

**Значения коэффициентов  $a_i$  уравнения (1)**

*Table*

**The values of the coefficients  $a_i$  of equation (1)**

Коэффициент	Значение
$a_0$	116701,3023
$a_1$	-6943,114389
$a_2$	154,8566946
$a_3$	-1,53457921
$a_4$	0,0057009416

Заметим, что аппроксимирующий полином столь высокой степени был выбран нами потому, что именно он наиболее плавно и с наибольшим коэффициентом детерминации ( $R^2$ ) описывал полученное распределение солености.

При перемещении с юга на север по графику (см. рис. 3а) видно, что средняя по толщине соленость льда в Обской губе начинает постепенно отличаться от нулевой уже на широте (70,0–70,5)° с. ш. По данным работы [4], в этом районе располагается в зимнее время граница пресных вод в Обской губе (с нулевой соленостью от поверхности до дна). Соленость воды в северной части губы меняется очень сильно как в течение года, так и в межгодовом рассмотрении. Она наименьшая в летние месяцы (всего несколько промилле), повышается осенью и достигает наибольших значений зимой (по данным ГМС Дровяная, в среднем до 16–19 ‰, но в отдельные годы может превышать 29 ‰ [4]). При этом в каждый отдельный ледовый сезон колебания солености вод могут иметь свои особенности, отличные от приведенного общего характера процесса, что отражается на вертикальном распределении солености льда. Например, в районе Сабетты включения пресного льда встречались во всех слоях ледяной толщи (в верхних, в средних и в нижних), а в отдельные годы не наблюдались совсем. Примеры вертикальных профилей солености льда северной части Обской губы показаны на рис. 3б.

Для образования морского льда соленость воды должна быть более 24,7 ‰. Такая соленость воды в поверхностном слое далеко не каждый год отмечается в зимнем годовом максимуме солености на границе Обской губы с Карским морем. На рис. 3а этому участку соответствуют точки значений солености льда на широте (72,5–72,7)°. Часть точек показывает пониженную соленость, другая часть вполне соответствует по солености морскому льду. Минимальное значение средней по толщине солености льда на данном участке (1,22 ‰) было зафиксировано в мае 1998 г. В мае 2005 г. соленость льда здесь была в пределах (2,9–3,8) ‰, в апреле 2010 г. — (3,7–5,1) ‰.

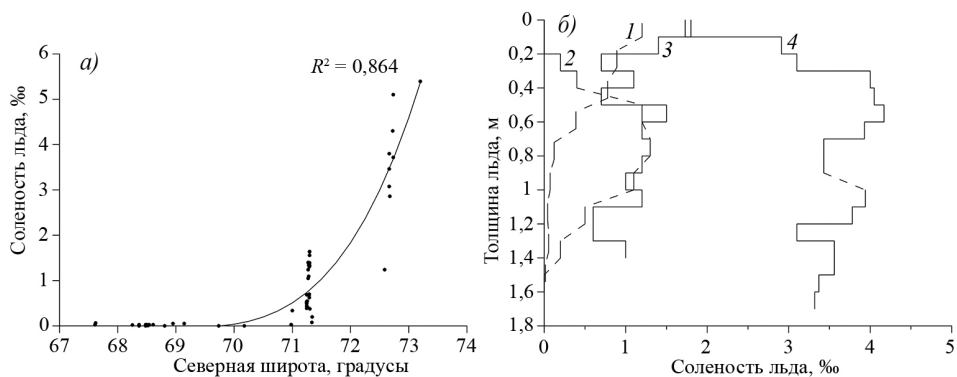


Рис. 3. Изменение средней по толщине солености льда в Обской губе с географической широтой (а) и вертикальные профили солености льда в северной части Обской губы (б):

1 — Сабетта, май 1998 г.; 2 — Сабетта, февраль 2011 г.; 3 — Сабетта, апрель 2013 г.; 4 — мыс Дровяной, май 2005 г.

Fig. 3. Change of the average ice salinity by thickness in the Ob' Bay with geographic latitude (а) and vertical profiles of ice salinity in the northern part of the Ob' Bay (б):

1 — Sabetta, May of 1998; 2 — Sabetta, February of 2011; 3 — Sabetta, April of 2013; 4 — cape Drovyanoy, May of 2005

**Плотность льда**

За рассматриваемый период (с 1987 г. по настоящее время) собрано более 100 кернов с измерением плотности льда на акватории от Нового Порта до границы губы с Карским морем. В 53 из них вместе с плотностью определялись температура и соленость льда, что позволяет оценить фазовый состав льда.

На рис. 4а приведена гистограмма значений средней по толщине плотности льда в Обской губе по всему объему имеющихся данных. Почти половина всех значений приходится на диапазон 890–910 кг/м<sup>3</sup> (точнее, нижний и верхний квартили равны 886 и 909 кг/м<sup>3</sup>, медиана — 897 кг/м<sup>3</sup>).

Плотность льда определяется плотностью и количественным соотношением фазовых составляющих: чистого льда, рассола, воздушных включений, твердых минеральных и органических включений (при их наличии). Влияние на плотность льда первых трех компонент хорошо изучено и достаточно точно определяется расчетными методами при известных температуре и солености льда.

Количество жидкой фазы рассчитывается по температуре и солености льда [5–7]. Объем воздушных включений  $v_a$  обычно определяется по расчетной плотности льда  $\rho_{TS} = f(T, S)$  и измеренной общей плотности льда  $\rho$ :

$$v_a (\%) = \frac{\rho_{TS} - \rho}{\rho} \cdot 100. \tag{2}$$

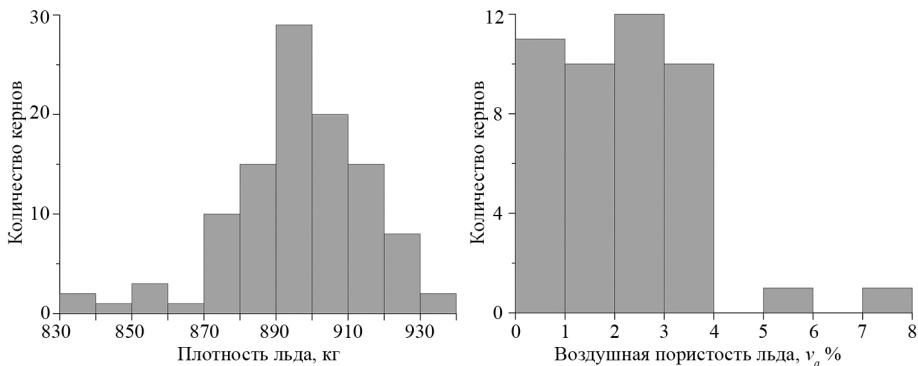


Рис. 4. Гистограммы значений средней по толщине плотности льда (а) и значений средней по толщине воздушной пористости льда (б) в Обской губе

Fig. 4. Histograms of values of average ice density by thickness (a) and average ice air porosity values by thickness (b) in the Ob' Bay

На рис. 4б приведена гистограмма распределения объема воздушных включений, рассчитанного по средним (по толщине льда) температуре, солености и плотности. За исключением единичных значений с  $v_a > 5\%$ , основной объем данных распределен почти равномерно в интервале  $0\% < v_a < 4\%$ .

В 15 % случаев измеренная плотность льда превышала соответствующие теоретические значения  $\rho_{TS}$  на 0,3–2,0 %. Это может быть связано как с погрешностью измерений (измерения физико-механических характеристик льда в полевых условиях редко бывают прецизионными), так и с игнорированием влияния твердых инородных включений, плотность которых выше плотности льда и рассола.

Вклад в общую плотность льда минеральных и органических включений в ходе полевых ледоисследовательских работ обычно оценивается только на качественном



уровне при описании текстуры льда: наличие включений, их размер и количество в терминах «редкие», «мало», «много» и т. п. В лучшем случае приводится субъективная визуальная оценка количества включений в процентах от объема рассматриваемого слоя льда, принятая «на глазок» специалистом, описывающим текстуру льда в кернах. Такие оценки не могут быть использованы для определения количества минеральных включений и их вклада в общую плотность льда. Между тем этот вклад может быть весьма значительным для ледяного покрова Обской губы, мутность воды в которой достаточно высока. Минеральные включения попадают в ледяной покров, вмержая в лед при непосредственном его контакте с грунтом или при замерзании воды, содержащей взвешенные частицы. По данным работ [8, 9], плотность глинистых илов, составляющих поверхностный слой донных грунтов — источник взвешенных частиц, составляет  $(1,5-1,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  (во влажном состоянии), а плотность самих частиц —  $2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Полагаем, что именно минеральные включения являются причиной повышения плотности практически пресного льда до значений  $930 \text{ кг/м}^3$  и выше (см. рис. 4а). К сожалению, до внедрения в практику полевых ледоисследовательских работ точных лабораторных измерений количества и характеристик минеральных включений по слоям льда корректно оценить их влияние на плотность льда не представляется возможным.

### Прочность льда

Прочность льда зависит от его температуры, солености, пористости, структуры, наличия органических и минеральных включений, условий проведения испытаний: вида и скорости приложения нагрузки, формы и размера ледяных образцов, качества их подготовки к испытаниям и др. В частности, в работе [10] рассматривается влияние на результаты определения прочности льда трения и теплообмена между поверхностями образца и пластинами пресса. При большом количестве влияющих факторов измеренные значения прочности льда демонстрируют высокий разброс, и даже в одной серии испытаний пределы прочности образцов могут существенно различаться.

В рамках данной статьи рассмотрим прочность льда при одноосном сжатии при приложении нагрузки параллельно поверхности ледяного покрова (так называемое «параллельное», или «горизонтальное», сжатие). Такое направление соответствует условиям воздействия льда на сооружение с вертикальной стенкой.

Объем данных по прочности при параллельном сжатии пресного льда в Обской губе, имеющихся в распоряжении авторов, составляет 137 образцов, отобранных из разных слоев ровного льда. Еще 67 образцов, отобранные в северной части губы, относятся к соленому льду. Все образцы цилиндрической формы. Испытания на прочность выполнялись при рекомендуемой нормативными документами средней скорости деформации  $\sim 10^{-4} \text{ 1/с}$ .

Результаты испытаний пресного льда в виде облака точек представлены на рис. 5, связывающем прочность льда  $\sigma$  с температурой образцов  $T$ . На графике ожидаемо большой разброс значений предела прочности, тем не менее прослеживается тенденция его увеличения с понижением температуры льда. Рассмотрим, как данные полевых исследований согласуются с расчетными, представленными в научно-методической литературе.

Одним из наиболее проработанных отечественных исследований прочности льда в плане расчета пределов прочности по комплексу определяющих их факторов

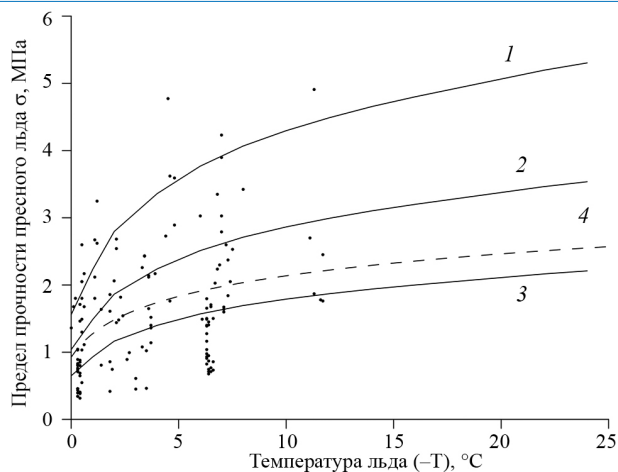


Рис. 5. Предел прочности пресного льда при одноосном сжатии параллельно поверхности ледяного покрова (перпендикулярно длинным осям структурных элементов):

1 — для льда призматической структуры [11, 12]; 2 — для льда шестовато-игольчатой структуры [11, 12]; 3 — для льда зернистой структуры [11, 12]; 4 — формула (3); точками отмечены данные полевых измерений в Обской губе

Fig. 5. Ice strength limit in uniaxial compression parallel to the ice cover surface (perpendicular to the long axis of the structural elements):

1 — for ice of prismatic structure [11, 12]; 2 — for ice with columnar-acicular structure [11, 12]; 3 — for ice of granular structure [11, 12]; 4 — formula (3); data of the field measurements in the Ob' Bay are marked with points

является работа [11], на основе которой было разработано методическое руководство по расчету прочности льда [12]. На рис. 5 нанесены три кривые пределов прочности при сжатии для различной структуры пресного льда, построенные по указаниям работ [11, 12] для условий параллельного сжатия без учета воздушной пористости льда и формы образцов (в [11, 12] прочность при сжатии приведена для ледяных кубиков с ребром 5 см). Теоретические кривые и данные полевых наблюдений достаточно хорошо согласуются с учетом большого разнообразия сочетаний кристаллических структур в ледяном покрове в естественных условиях. К сожалению, условия проведения полевых работ не позволяют четко указать структуру для большинства образцов, поскольку мы столкнулись с большим пространственным разнообразием структурных типов даже в пределах ледоисследовательской площадки, что, по-видимому, связано со сложным сочетанием условий ледообразования с точки зрения динамичности процессов (об этом же свидетельствует сложное чередование слоев прозрачного льда и льда с примесью песка и илов). В материалах исследований физико-механических характеристик ледяного покрова Обской губы встречаются все виды структуры льда, рассмотренные в работах [11, 12]. С учетом имеющихся материалов по строению льда, мы бы рекомендовали для расчетов прочности всей толщи ледяного покрова выбирать призматический тип структуры для участка губы южнее  $70,0-70,5^\circ$  с. ш., шестовато-игольчатый — между  $70,0-70,5^\circ$  с. ш. и  $72^\circ$  с. ш.

Следуя традиции логарифмического представления зависимости прочности льда от температуры, уравнение  $\sigma = f(T)$ , аппроксимирующее натурные данные по пределу прочности при горизонтальном сжатии пресного льда, представим в виде (кривая 4 на рис. 5):

$$\sigma \text{ (МПа)} = 0,5045 \cdot \ln(1 - T(^{\circ}\text{C})) + 0,9271. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает зависимость от температуры средней прочности льда при сжатии параллельно поверхности ледяного покрова без учета кристаллической структуры при естественном уровне пористости льда (см. выше), соответствует условиям хрупкого разрушения (скорости деформации  $\sim 10^{-4}$  1/с) цилиндрических образцов с диаметром основания 0,10–0,18 м (объемом  $(1,6\text{--}5,1) \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>). Заметим, что при переходе от прочности цилиндрических образцов к прочности кубиков с гранью 0,05 м по методике [12] кривая 4 на рис. 5, рассчитанная по формуле (3), «поднимется» на графике выше примерно на 0,5–0,6 МПа.

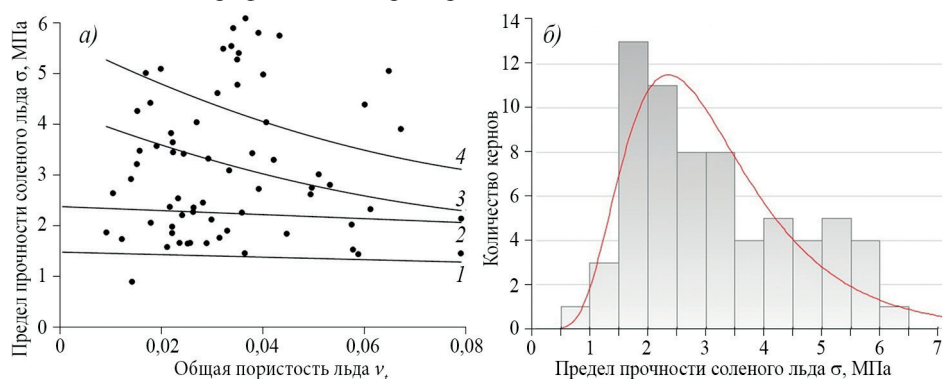


Рис. 6. Зависимость предела прочности соленого льда при одноосном сжатии параллельно поверхности ледяного покрова от общей пористости (а) и гистограмма значений предела прочности соленого льда при одноосном сжатии и аппроксимация ее логнормальным распределением (б)

1 — для льда зернистой структуры [11, 12]; 2 — для льда вертикально-ориентированной (волокнистой) структуры [11, 12]; 3 — для льда вертикально-ориентированной структуры [13]; 4 — для льда зернистой структуры [13]

Fig. 6. Dependence of saline ice strength limit in uniaxial compression parallel to the ice cover surface on total porosity (a) and histogram of values of saline ice strength limit in uniaxial compression and its approximation by lognormal distribution (b)

1 — for ice of granular structure [11, 12]; 2 — for ice of vertically-aligned (fibrous) structure [11, 12]; 3 — for ice of vertically-aligned structure [13]; 4 — for ice of granular structure [13]

На рис. 6а представлены результаты полевых измерений предела прочности при горизонтальном сжатии соленого льда и их сопоставление с расчетной прочностью по отечественным и зарубежным научно-методическим работам. Поскольку прочность соленого льда зависит как от температуры, так и от солености, удобнее ее рассматривать в зависимости от количества жидкой фазы (массы или объема), а наличие данных по плотности образцов льда позволяет учесть влияние на прочность льда суммарного объема рассола и воздушных включений  $v_t$ :

$$v_t = v_b + v_a. \quad (4)$$

Для представления данных полевых наблюдений в виде  $\sigma = f(v_t)$  использована популярная методика расчета объемов фазовых компонент соленого льда по работе [6];  $v_t$  на рис. 6а представлен в безразмерном виде (относительный объем).

Облако точек данных полевых наблюдений (см. рис. 6а) демонстрирует случайный разброс значений  $\sigma$ . На рис. 6б представлена гистограмма этих значений

и аппроксимирующая кривая плотности распределения по логнормальному закону  $f(\sigma) = (\sigma a \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\{-[\ln(\sigma/m)]^2 / 2a^2\}$  с параметрами масштаба  $m = 2,8614$  (медиана) и формы  $a = 0,4494$ .

При отсутствии функциональной связи полевых измерений  $\sigma$  с общим относительным объемом рассола и воздушных включений посмотрим, как облако точек соотносится с теоретическими кривыми  $\sigma = f(v_t)$ . Линии 1 и 2 (см. рис. 6а) представляют пределы прочности зернистой и волокнистой структур соленого льда по методике [11, 12], построенные по температуре, солёности и плотности образцов, испытанных в северной части Обской губы для условий горизонтального сжатия (без пересчета кубической формы образцов в цилиндрическую). По этим же данным построены кривые 3 и 4 с использованием уравнений работы [13]:

$$\sigma = 37(\dot{\epsilon})^{0,22} \left[ 1 - (v_t / 0,270)^{0,5} \right] \tag{5}$$

для вертикально-ориентированной структуры льда при его сжатии вдоль поверхности ледяного покрова и

$$\sigma = 49(\dot{\epsilon})^{0,22} \left[ 1 - (v_t / 0,280)^{0,5} \right] \tag{6}$$

для аналогичного нагружения льда зернистой структуры (при скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ).

Если можно говорить о наилучшем совпадении функциональных зависимостей с облаком случайных точек, наилучшее соответствие теоретических и полевых данных демонстрирует кривая 3, рассчитанная по формуле (5), пересекающая медианное значение облака точек  $\sigma_{0,5} = 2,86 \text{ МПа}$  в точке  $v_t \approx 0,046$ .

Уточним, что все рассмотренные выше значения, как для пресного, так и для соленого льда, относятся к малым образцам, т. е. не являются оценками прочности всей толщи ледяного покрова, которые могут быть рассчитаны по вертикальному распределению температуры, солёности и плотности льда и связанным с ними прочностью отдельных слоев.

В рамках данного исследования мы не стали рассматривать одну из важнейших физико-механических характеристик льда — предел прочности льда на изгиб. Это было связано с недостаточностью сведений об условиях проведения наблюдений для собранных нами данных. Однако, при получении данных сведений, мы надеемся (в ближайшее время) провести соответствующие обобщения и анализ по указанной характеристике.

Также следует уточнить, что оценки прочностных свойств льда, полученные нами в ходе обработки и анализа данных натурных наблюдений, напрямую никак не соотносятся с оценками, получаемыми для модельного льда в ледовых бассейнах (т. е. там, где добавление солей в лед производится с целью уменьшения прочности). Таким образом, результаты исследований характеристик модельного льда из известных работ для ледовых бассейнов (таких, как [14] и др.), на наш взгляд, мало применимы для проведения совместного анализа с натурными данными по прочностным характеристикам льда, полученными в Обской губе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках представленных работ были рассмотрены данные о физико-механических характеристиках припайного льда Обской губы, полученные при экспедиционных полевых исследованиях за последние 30 лет, общий объем которых превышает 200 кернов. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной неоднозначности некоторых

характеристик льда, возникающей вследствие того, что в течение ледового сезона в губе одновременно присутствуют пресные льды, льды распресненных водоемов, морские льды.

В дальнейшем нами планируется продолжение комплекса наблюдений за физико-механическими характеристиками льда Обской губы, с возможным включением современных физических методов контроля идентичности образцов для повышения достоверности оценки прочностных характеристик льда.

Однако уже сейчас, основывая свое мнение на приведенных результатах сравнения измеренных и рассчитанных значений прочностных характеристик льда, считаем, что очевидной необходимостью является проведение дальнейшего анализа физико-механических (преимущественно — прочностных) характеристик льда, выполняемого с точки зрения возможности и допустимости снижения нормативной прочности льда для определения ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения.

**Конфликт интересов.** У авторов исследования нет конфликта интересов.

**Competing interests.** The authors have no conflicts of interest to declare.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovalev S.M., Korostev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N., Shushlebin A.I. Application of a borehole jack for determining the local strength of fresh and sea ice // Proceedings of the 17th International Symposium on Ice. S.-Petersburg, IAHR. 2004. V. 2. P. 147–153.
2. Налимов Ю.В., Усанкина Г.Е., Голованова С.В., Кубышкин Н.В., Нестеров А.В. Ледовый режим и особенности формирования заприпайной полыни в северной части Обской губы // Тр. ААНИИ. 2009. Т. 450. С. 153–165.
3. Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P., Nesterov A.V., Kubyshkin N.V., Skutin A.A., Buzin I.V., Vinogradov R.A., Naumov A.K., Nalimov Yu.V., Klyachkin S.V., Fedyakov V.Ye., Andreev O.M. Evaluation of ice conditions of the Northern Ob Bay associated with construction of the port of Sabetta // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC. 2013. V. 1. P. 584–593.
4. Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод) / Под ред. д-ра геогр. наук Г.Н. Войнова. СПб.: Нестор–История, 2017. 192 с.
5. Frankenstein G.E., Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from  $-0.5$  to  $-22.9$  °C // J. Glaciol. 1967. № 6 (48). P. 943–944.
6. Cox G., Weeks W. Equations for determining the gas and brine volumes in sea ice samples // J. Glaciol. 1983. V. 29. № 102. P. 306–316.
7. Назинцев Ю.Л., Дмитраж Ж.А., Моисеев В.И. Теплофизические свойства морского льда. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 260 с.
8. Логвина Е.А., Гладыш В.А., Кубышкин Н.В., Нестеров А.В., Виноградов Р.А. Оценка заносимости подходного и морского каналов к порту в поселке Сабетта полуострова Ямал // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94). С. 105–118.
9. Гладыш В.А., Логвина Е.А., Нестеров А.В., Кубышкин Н.В. Оценка интенсивности литодинамических процессов в морском судоходном канале порта Сабетта // Инженерные изыскания. 2017. № 4. С. 36–77.
10. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 210 с.
11. Гладков М.Г., Петров И.Г., Федоров Б.А. Схема расчета предела прочности льда // Тр. ААНИИ. 1983. Т. 379. С. 75–88.
12. Методическое письмо по расчету пределов прочности льда / Под ред. В.В. Богородского. Л., 1983. 50 с.

13. Timco G.W., Frederking R. M.W. Compressive strength of sea ice sheets // Cold Regions Science and Technology. 1990. V. 17 (3). P. 227–240.
14. Von Bock und Polach R.U.F., Franz R.U., Etemab R., Gralhera S., Kellner L., Stendera M. The non-linear behavior of aqueous model ice in downward flexure // Cold Regions Science and Technology. 2019. V. 165. Paper 102775. doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.05.001.

## REFERENCES

1. Kovalev S.M., Korostelev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N., Shushlebin A.I. Application of a borehole jack for determining the local strength of fresh and sea ice. Proceedings of the 17th International Symposium on Ice. S.-Petersburg, IAHR. 2004, 2: 147–153.
2. Nalimov Yu.V., Usankina G.E., Golovanova S.V., Kubyshkin N.V., Nesterov A.V. Ice regime and features of the formation of a fast ice polynya in the northern part of the Gulf of Ob. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 2009, 450: 153–165. [In Russian].
3. Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P., Nesterov A.V., Kubyshkin N.V., Skutin A.A., Buzin I.V., Vinogradov R.A., Naumov A.K., Nalimov Yu.V., Klyachkin S.V., Fedyakov V.Ye., Andreev O.M. Evaluation of ice conditions of the Northern Ob Bay associated with construction of the port of Sabetta. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC. 2013, 1: 584–593.
4. Voinov G.N., Nalimov Yu.V., Piskun A.A., Stanovoy V.V., Usankina G.E. *Osnovnye cherty gidrologicheskogo rezhima Obskoi i Tazovskoi gub (led, urovni, struktura vod)*. Main characteristics of the hydrological regime of the Ob' Bay and Taz Bay (ice, levels, water structure). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017: 192 p. [In Russian].
5. Frankenstein G.E., Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from –0.5 to –22.9 °C. *J. Glaciol.* 1967, 6 (48): 943–944.
6. Cox G., Weeks W. Equations for determining the gas and brine volumes in sea ice samples. *J. Glaciol.* 1983, 29 (102): 306–316.
7. Nazintsev Yu.L., Dmitrazh Zh.A., Moiseev V.I. *Teplofizicheskiye svoystva morskogo l'da*. Thermophysical properties of sea ice. Leningrad: *Izd. Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta*. Ed. Leningrad State University, 1988: 260 p. [In Russian].
8. Logvina E.A., Gladyshev V.A., Kubyshkin N.V., Nesterov A.V., Vinogradov R.A. Estimation of the drift of the approach and sea channels to the port in the village of Sabetta on the Yamal Peninsula. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic research. 2012, 4 (94): 105–118. [In Russian].
9. Gladyshev V.A., Logvina E.A., Nesterov A.V., Kubyshkin N.V. Evaluation of the intensity of lithodynamic processes in the sea navigation channel of the port of Sabetta. *Inzhenernyye izyskaniya*. Engineering survey. 2017, 4: 36–77. [In Russian].
10. Lavrov V.V. *Deformatsiya i prochnost' l'da*. Deformation and strength of ice. Leningrad: Gidrometeoizdat. Hydrometeorological Publishing House, 1969: 210 p. [In Russian].
11. Gladkov M.G., Petrov I.G., Fedorov B.A. Scheme for calculating the tensile strength of ice. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1983, 379: 75–88. [In Russian].
12. *Metodicheskoye pis'mo po raschetu predelov prochnosti l'da. Pod red. V.V. Bogorodskogo*. Methodical letter on the calculation of the strength of ice. Ed. V.V. Bogorodsky. Leningrad, 1983: 50 p. [In Russian].
13. Timco G.W., Frederking R.M.W. Compressive strength of sea ice sheets. *Cold Regions Science and Technology*. 1990, 17 (3): 227–240.
14. Von Bock und Polach R.U.F., Franz R.U., Etemab R., Gralhera S., Kellner L., Stendera M. The non-linear behavior of aqueous model ice in downward flexure. *Cold Regions Science and Technology*. 2019, 165: 102775. doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.05.001.