

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ ЗЕМЛИ

УДК 551.326:535.3

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-2-157-169

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЗОНД-ИНДЕНТОРА И ТЕПЛООВОГО БУРЕНИЯ В ЛЕДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В.В. ХАРИТОНОВ, А.И. ШУШЛЕБИН*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

**sogra.kharitonov@mail.ru*

ANALYSIS OF THE JOINT APPLICATION RESULTS OF A BOREHOLE JACK AND THERMAL DRILLING IN ICE RESEARCH

V.V. KHARITONOV, A.I. SHUSHLEBIN*

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

**sogra.kharitonov@mail.ru*

Received March, 29, 2018

Accepted June, 13, 2018

Keywords: borehole jack, ice ridge, local ice strength, porosity, thermal drilling.

Summary

In last two decade, studies of ice ridge morphometry and strength properties have been actively carried out. Thermal drilling of ice and experiments to determine the local strength of ice using a borehole jack are performed. The paper discusses the issues of joint use of thermal drilling equipment and borehole jack for the ice cover research. Two approaches to the comparison of the results obtained by these two methods are considered. Average penetration rate versus local ice strength dependences are presented. With increasing ice strength and decreasing penetration rate the interval of changes in the ice strength increases and correspondence of the strength to the penetration rate decreases. Based on the results of ice ridges research, depth-wise distributions of local strength and thermal drill penetration rate are compared. Difference between the average thicknesses of the consolidated layer obtained from these distributions was 5 %.

Поступила 29 марта 2018 г.

Принята к печати 13 июня 2018 г.

Ключевые слова: зонд-индентор, лед, пористость, прочность, термобурение.

Citation: *Kharitonov V.V., Shushlebin A.I. Analysis of the joint application results of a borehole jack and thermal drilling in ice research. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (2): 157–169. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-2-157-169.*

В последние два десятка лет проводятся исследования морфометрических и прочностных характеристик торосистых образований и припая. Выполняется тепловое бурение льда и проведение экспериментов по определению локальной прочности льда с помощью зонд-индентора. В статье обсуждаются вопросы совместного применения термобурового оборудования и зонд-индентора для исследования ледяного покрова. Рассмотрены два подхода к сравнению результатов, полученных этими двумя методами. Приведены зависимости средней скорости бурения от локальной прочности льда. При возрастании прочности льда и уменьшении скорости бурения диапазон изменения прочности льда увеличивается и понижается соответствие прочности скорости бурения. Выполнено сравнение среднестатистических распределений прочности и скорости бурения по глубине по результатам исследования торосов. Отличие полученных из этих распределений значений средней толщины консолидированного слоя торосов составило 5 %.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с освоением шельфовых зон замерзающих морей России и перспективной строительства стационарных платформ для добычи углеводородов стоит задача обеспечения безопасной эксплуатации таких сооружений в условиях дрейфующих и припайных льдов. Для этого необходимо проводить исследования прочности и строения ледяных образований (ровный дрейфующий лед, торосы, припай, стамухи, айсберги, навалы льда на берега). В ААНИИ были разработаны оригинальные технологии определения прочностных и морфометрических характеристик льда в натуральных условиях, позволяющие проводить исследования прочности и строения ледяного покрова как по площади, так и по толщине. Целью данной работы является ответ на вопрос: возможно ли, основываясь на данных о скорости бурения льда, сделать вывод о его прочности? Для достижения данной цели потребовалось решить следующие задачи:

- рассмотреть результаты совместного применения термобурового оборудования и зонд-индентора для исследования ледяного покрова;
- сопоставить данные о прочности льда с данными термобурения;
- предложить аналитическую зависимость скорости теплового бурения от прочности льда, пригодную для практического применения.

Технология морфометрических исследований внутреннего строения ледяных образований основана на скоростном бурении льда горячей водой или электро-термобурении с компьютерной записью скорости движения бурового снаряда во льду. Скорость бурения зависит от подаваемой тепловой мощности, пористости льда и в небольшой степени от его температуры. Бурение проводится вдоль профилей, проложенных поперек гребня тороса (стамухи, навала), на постоянной тепловой мощности. Фиксируются дата, номер ледяного образования, номер линии, номер скважины, высота снежного покрова, которая измеряется в месте бурения с помощью снегомерной рейки. После того, как скважина пробурена, измеряется превышение верхней поверхности снежного покрова (льда) над уровнем моря с помощью контактного измерителя уровня воды. При обработке данных термобурения определяются величина надводной и подводной части ледяного покрова, границы консолидированного льда, границы пустот, участки льда различной пористости.

В настоящее время в ААНИИ принято при определении внутреннего строения торосов и стамух выделять области плотного льда, рыхлого льда и пустот [1, 2]. Под рыхлым льдом понимается область, заполненная мелкими кусками льда, смерзшимися между собой в местах контактов. За граничную величину кусков принята

минимальная толщина блоков льда, составляющих парус тороса или стамухи. Встречающаяся во время бурения область, в которой чередуются участки льда и пустоты с размерами меньше граничной, идентифицируется как область, заполненная рыхлым льдом. Участки, где бурение идет без провалов, но его скорость существенно выше, чем скорость бурения плотного льда, идентифицированы как межблоковые пространства, заполненные полусмерзшейся шугой [4].

Установка «Скважинный зонд-индентор» [3] состоит из гидростанции, зонд-индентора, регистратора показаний датчиков давления, перемещения и сигналов трещинообразования во льду во время испытания. Собственно зонд-индентор состоит из опорной плиты и гидроцилиндра с выдвигающимся с постоянной скоростью штоком. Испытания проводятся в скважинах диаметром 0,25 м с интервалом не менее 0,30 м на глубину до 5 м. Скорость внедрения индентора в лед может регулироваться в пределах от почти нулевой до 4,5 мм/с. Во время испытаний фиксируются изменение давления в гидросистеме, перемещение индентора при его внедрении в стенку скважины и появляющиеся при деформировании льда акустические сигналы. Разрушающие давления на различных горизонтах ледяного образования пересчитываются в механические напряжения, на основании которых строятся вертикальные распределения прочности.

Технологии исследования внутреннего строения торосов и стамух основаны на различных физических принципах: оценивания прочности льда с помощью зонд-индентора и описания структурных элементов внутри ледяных образований по скорости движения бурового снаряда при термобурении. Сравнение полученных результатов позволяет выделить как общие закономерности распределения характеристик, так и индивидуальные особенности каждого из методов. Рассмотрим два подхода к сравнению результатов, полученных этими двумя методами.

ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Скважины для проведения испытаний с помощью зонд-индентора, как правило, совпадали со скважинами термобурения; расстояние между ними не превышало одного метра. Термобурение выполнялось после зонд-индентора и не влияло на результаты зондирования. Отсчет уровней зондирования осуществлялся от поверхности льда, а при тепловом бурении от уровня воды в скважине. При сопоставлении результатов термобурения и зондирования все данные о глубине приводились к уровню воды. На рис. 1 приведена характерная запись зависимости скорости термобурения от глубины, и на этот же график нанесены уровни зондирования и локальная прочность льда [7] на этих уровнях.

В мае–июне 2004 г. в Обской губе проводились исследования морфометрических и прочностных характеристик припая. Лед состоял в основном из крупноблочных кристаллов неправильной формы, соответствующих структурному типу А1, что обусловлено ранними сроками устойчивого ледообразования. Текстура этого типа льда монолитная, в слоях с минимальным количеством включений значения плотности пресного льда приближались к своему максимуму — 917 кг/м³. К моменту начала проведения работ температура льда повысилась до 0 °С, и ее вертикальное распределение стало однородным.

Расстояние от буровой скважины до скважины зонд-индентора колебалось в пределах 0,15... 0,25 м. Подаваемая на термобур электрическая мощность была постоянна в течение всего бурения. Для каждого опыта на соответствующей записи скорости был выделен участок на шкале глубин, на котором происходило внедрение

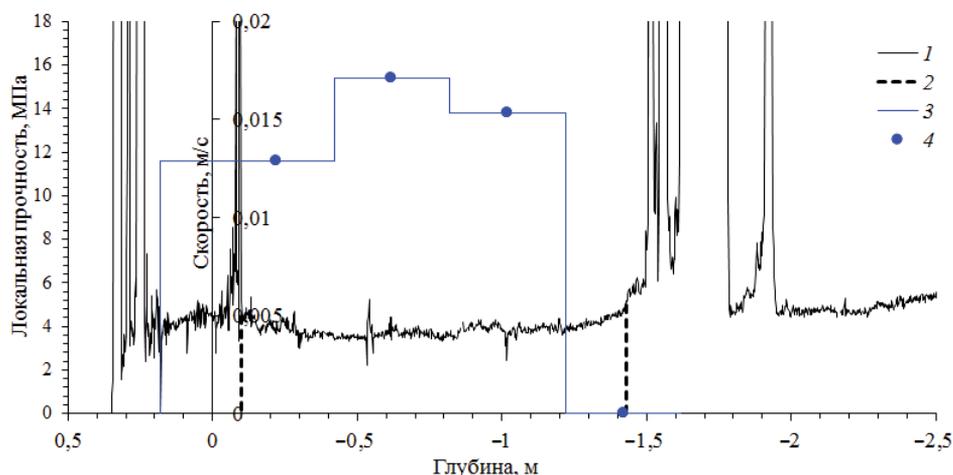


Рис. 1. Сопоставление локальной прочности льда и скорости термобурения по глубине испытаний: 1 — скорость; 2 — границы консолидированного слоя; 3 — локальная прочность; 4 — измеренное значение локальной прочности

Fig. 1. Comparison of the local strength of ice and the speed of thermal drilling by the depth of the test: 1 — speed; 2 — consolidated boundary boundaries; 3 — local strength; 4 — measured value of local strength

зонд-индентора в лед, и рассчитана средняя скорость электротермобура на этом участке. Всего получилось 78 пар значений средней скорости на участке и соответствующей этому участку локальной прочности льда.

Аналогичная работа проводилась во время ледоисследовательских работ в Байдарачьей губе в 2010 г. Тогда было получено 74 пары значений скорости и прочности, но уже для соленого льда. За счет наличия в соленом льду ячеек с рассолом скорость бурения соленого льда выше, чем скорость бурения пресного льда. Напротив, с повышением солёности прочность льда уменьшается. Эти тенденции изменения скорости бурения и прочности льда при повышении его солёности дают основание для объединения этих данных в один массив. Совместная диаграмма, связывающая среднюю скорость бурения на участке с соответствующим значением локальной прочности льда, для 2004 и 2010 гг. приведена на рис. 2.

Функциональная связь скорости бурения и локальной прочности льда представлена облаком точек неправильной формы и на первый взгляд трудноопределима. Такая связь примерно с одинаковой точностью может быть описана различными аналитическими выражениями. В нашем случае главное требование к математической модели для такой связи — удобство ее использования. Другое требование — содержательность, или интерпретируемость, на данном этапе анализа практически недостижимо. Поэтому было принято решение считать связь скорости и прочности льда линейной, как наиболее простое, и воспользоваться надежным методом наименьших квадратов. Уравнение линейной регрессии приведено на диаграмме. Однако дальнейший расчет параметров полосы неопределенности данных показал трудность ее определения из-за малости общего числа проведенных измерений. Поэтому для упрощения описания нашей функциональной зависимости было решено использовать уравнения ограничивающих точки линий. Эти уравнения также приведены на

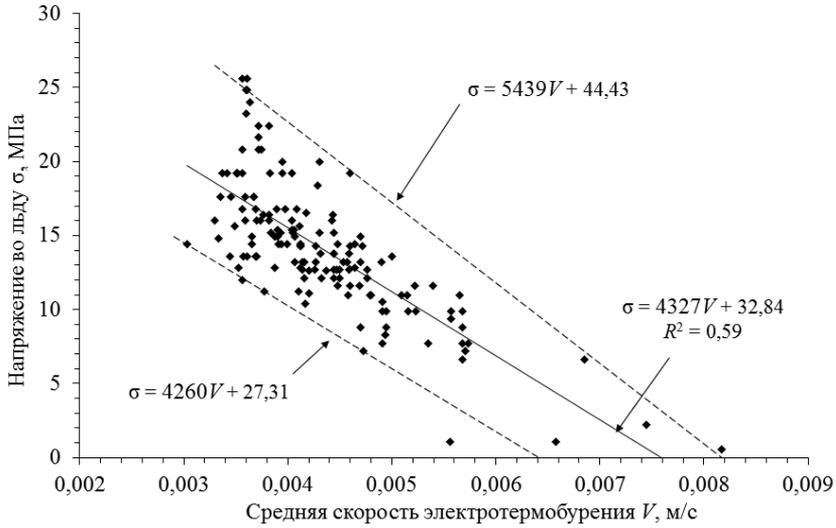


Рис. 2. Диаграмма связи локальной прочности льда σ и скорости электротермобурения V по данным исследования ровного пресноводного льда в Обской губе в 2004 г. и морского льда в Байдарацкой губе в 2010 г.

Пунктирные линии ограничивают область, занимаемую экспериментальными точками на диаграмме. Сплошная линия — линия линейной регрессии

Fig. 2. The diagram of the relation between the local strength of ice σ and the rate of electrothermoburial V according to the study of fresh freshwater ice in the Ob Bay in 2004 and sea ice in the Baydaratskaya Bay in 2010.

Dotted lines limit the area occupied by the experimental points on the diagram. The solid line is the linear regression line

диаграмме. Таким образом, воспользовавшись этими уравнениями, можно оценить интервал, в какой попадает значение локальной прочности при измеренной скорости бурения, и математическое ожидание этого значения. Например, термобур проходит лед со средней скоростью 0,0044 м/с. Тогда локальная прочность этого льда будет лежать в интервале от 8,5 до 20,5 МПа и наиболее вероятно будет равна 13 МПа.

На рис. 3 приведены диаграммы связи локальной прочности σ льда и скорости термобурения V , построенные по данным исследования торосов и ровного льда пролива Шокальского в 2016 г. Здесь производилось уже водяное бурение, поэтому скорость проходки термобура значительно выше. Поскольку в электротепловом бурении льда и в бурении льда горячей водой используется один и то же принцип — расплавление льда и за счет этого погружение термобура, отличие только в способе подачи тепла ко льду, нет никаких методических ограничений для поиска связи скорости обоих видов бурения с прочностью льда. Для сравнения с электротермобурением приведены два графика, отличающиеся тем, что на первом интервал усреднения скорости равен диаметру индентора (0,09 м), а на втором — половине интервала зондирования ((0,30 м)/2 = 0,15 м).

Вопрос выбора интервала усреднения скорости находится в стадии изучения, поскольку для выверенного решения недостаточно экспериментальных данных. Представляется, что при практическом применении уравнений для оценки локальной

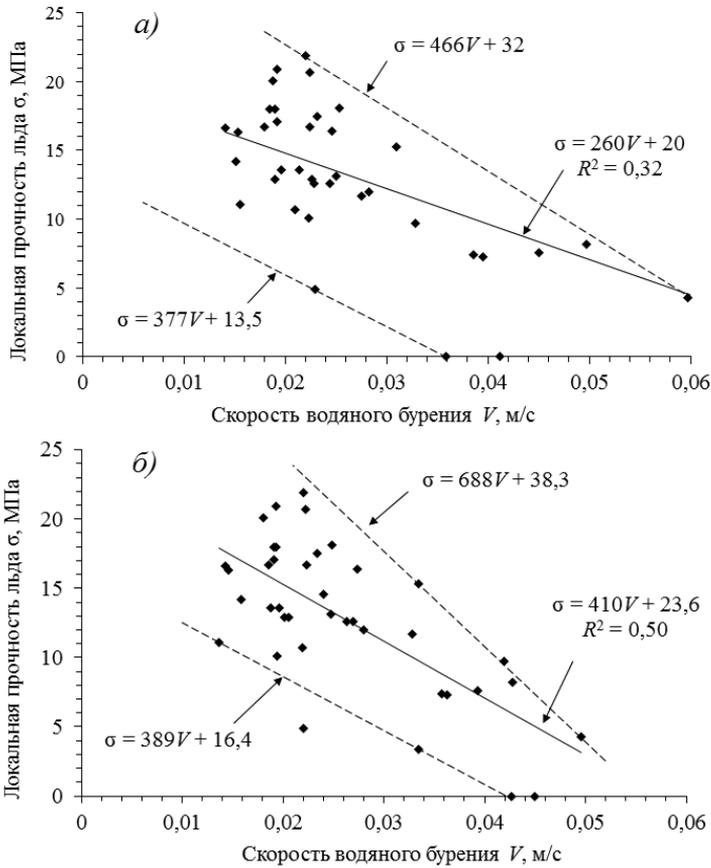


Рис. 3. Диаграмма связи локальной прочности льда σ и скорости водяного термобурения V по данным исследования торосов в проливе Шокальского в 2016 г. Интервал усреднения скорости: а) — 0,09 м, б) — 0,15 м.

Пунктирные линии ограничивают область, занимаемую экспериментальными точками на диаграмме. Сплошные линии — линии линейной регрессии

Fig. 3. The diagram of the relation between the local strength of ice σ and the water-drilling temperature V according to the data of the study of hummocks in the Shokalsky Strait in 2016. The interval for averaging the velocity: а) — 0,09 m, б) — 0,15 m.

Dotted lines limit the area occupied by the experimental points on the diagram. Solid lines are linear regression lines

прочности льда по скорости бурения для разных интервалов усреднения результаты будут близки, по крайней мере, для диапазона скоростей, где присутствует наибольшее скопление точек, т.е. наиболее интересного.

Таким образом, можно констатировать следующее: на данном этапе однозначной связи скорости термобурения и прочности льда не обнаружено. Определенной скорости термобурения соответствует диапазон локальной прочности льда, от которого можно перейти к прочности стандартных образцов при одноосном сжатии. При высоких скоростях бурения можно делать вывод, что прочность проходимого термобуром льда невысока. При средних и небольших скоростях бурения диапазон

разброса значений прочности льда расширяется, и, хотя его центр смещается в сторону больших значений, однозначного вывода о прочности льда сделать нельзя. Это является основанием для проведения дальнейших исследований.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Второй подход к сравнению результатов, полученных с помощью зонд-индентора и термобурения, заключается в анализе среднестатистических распределений прочности и скорости бурения по глубине. Рассмотрим его на примере данных термобурения и зонд-индентора, полученных в результате исследования торосов Каспийского моря в 2013 г.

Согласно закону сохранения энергии связь скорости термобурения с подаваемой мощностью можно выразить калориметрической формулой:

$$V = \frac{KP}{\Lambda \left[\rho(1-a-s)(-c_i t_i + L) - \rho_w s c_w t_i + (\rho(1-a-s) + \rho_w s) c_w t_w \right]}, \quad (1)$$

где V — скорость погружения термобура, м/с; P — подаваемая на термобур тепловая мощность, Вт; K — коэффициент, учитывающий рассеяние тепла через боковую поверхность коронки термобура (к.п.д. термобура); Λ — площадь миделева сечения коронки термобура, м²; ρ — плотность монокристалла льда, кг/м³; a — объемное содержание воздуха во льду; s — объемное содержание рассола во льду; c_i — теплоемкость чистого льда, Дж/(кг·град); t_i — температура льда, °С; L — удельная теплота плавления льда, Дж/кг; ρ_w — плотность расплава, кг/м³; c_w — теплоемкость расплава, Дж/(кг·град); t_w — температура расплава, °С. Определим объемное содержание твердой фазы льда V_{Cl} (аббревиатура *Volumetric Content of Ice*) как

$$V_{Cl} = 1 - a - s. \quad (2)$$

Величина V_{Cl} аналогична коэффициенту заполнения, но несколько меньше его, т.к. учитывает наличие микропор в блоках льда.

Преобразуем формулу (1) к виду

$$V = \frac{KP}{\Lambda \left[\rho(1-a-s)(-c_i t_i + L + c_w t_w) + \rho_w s c_w (t_w - t_i) \right]}. \quad (3)$$

В знаменателе формулы (3) удельная теплота плавления льда $L = 335$ кДж/кг. Удельная теплоемкость льда $c_i = 2,093$, удельная теплоемкость воды $c_w = 4,187$ кДж/(кг·К). Температура льда t_i , как правило, находится в пределах 0...-10 °С, температура талой воды по данным экспериментов не превышает 30 °С, соленость льда s в подавляющем большинстве случаев не превышает 11 %. Удельное содержание пузырьков воздуха находится в пределах 10 %. Таким образом, первое слагаемое в квадратных скобках (3) будет не меньше, чем $918 \cdot (1-0,1-0,11) \cdot (2,093 \cdot 0 + 335 + 4,187 \cdot 30) \approx 2,4 \cdot 10^5$. Второе же слагаемое не превысит величины $1003 \cdot 0,11 \cdot 4,187 \cdot (30 - (-10)) \approx 1,8 \cdot 10^4$. Пренебрегая вторым слагаемым, а также слагаемым $c_i t_i$ как слагаемыми высшего порядка малости в знаменателе формулы (3), из (2) и (3) скорость бурения V обратно пропорциональна объемному содержанию твердой фазы льда V_{Cl} :

$$V_{Cl} \approx \frac{KP}{\Lambda \rho (L + c_w t_w)} \cdot \frac{1}{V}. \quad (4)$$

За счет высокой тепловой инерционности нагревательной коронки электро-термобура влияние объемного содержания твердой фазы льда V_{Cl} на к.п.д. коронки,

т.е. на коэффициент K , будет незначительно. Эксперименты, проведенные в 1999 г. в Лаборатории физического моделирования (ныне — УМЦ «Ладога»), показали, что коэффициент K при бурении лабораторного льда различной солёности и с различным содержанием воздушных включений изменялся в пределах 6 %. Согласно расчетам [5], относительная доля тепловой энергии, рассеиваемой в твердой фазе, уменьшается с ростом скорости плавления и уменьшением параметра удлиненности нагревательной коронки, т.е. соотношения ее высоты и диаметра. Для скоростей плавления, соответствующих льду, и параметра удлиненности коронки термобура ААНИИ, равного 1/7, доля рассеиваемой тепловой энергии становится пренебрежимо малой. Таким образом, в первом приближении можно считать, что коэффициент пропорциональности между величиной, обратной скорости бурения, и значением объемного содержания твердой фазы льда V_{cl} в (3) не зависит от самой величины объемного содержания.

Распределение скорости погружения термобура вдоль скважины согласно (3) дает распределение объемного содержания твердой фазы льда в относительных единицах, поскольку коэффициент пропорциональности между V_{cl} и $1/V$ имеет размерность скорости. Точные значения V_{cl} неизвестны, т.к. неизвестен коэффициент пропорциональности между V_{cl} и величиной, обратной скорости. Поскольку коэффициент пропорциональности принят как величина постоянная, для упрощения в дальнейшем в качестве значений V_{cl} используются значения $1/V$ как некие относительные величины. Для каждой скважины это распределение будет индивидуальным. Усреднив эти кривые по всем скважинам, можно получить среднее распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине для выбранного отдельного тороса или для всего района проведения исследований. Усреднение происходит следующим образом. Последовательно рассматриваются все глубины от максимального значения высоты паруса до минимального значения глубины кия. На каждой выбранной глубине усредняются значения $1/V$ во всех скважинах, соответствующие этой глубине. В тех точках, где рассматриваемая глубина выходит за пределы паруса или кия, значение $1/V$ принимается равным нулю.

Проделав эту операцию со всеми записями совместных точек бурения (всего 108 скважин), получим зависимость V_{cl} , приведенную на рис. 4а. Определение границ консолидированного слоя (КС) по этой кривой будет валидным. Кривая V_{cl} в области 0,4...–0,9 м представляет собой интегральное распределение вероятности наличия льда в этом диапазоне глубин, которое определяется разбросом положения верхней и нижней границ КС. Среднее положение верхней границы КС можно получить усреднением полученной зависимости в диапазоне глубин 0,4...0 м, где происходит резкое увеличение V_{cl} . Это значение равняется 0,19 м. Аналогичный расчет дает среднее положение нижней границы КС на горизонте –0,45 м. Общая толщина КС составляет, таким образом, в среднем 0,64 м.

Второй вариант усреднения: те точки, в которых рассматриваемая глубина выходит за пределы паруса или кия, не рассматриваются. На рис. 4б представлен такой вариант усреднения.

Точно так же по первому и второму типу усредняем ступенчатые линии локальной прочности льда (см. рис. 1). Рис. 5а показывает усредненное по второму типу распределение по глубине. Если исключить anomalно высокие значения прочности (12,6 МПа) на горизонте 2,4 м в одной из скважин, как результат измерения,

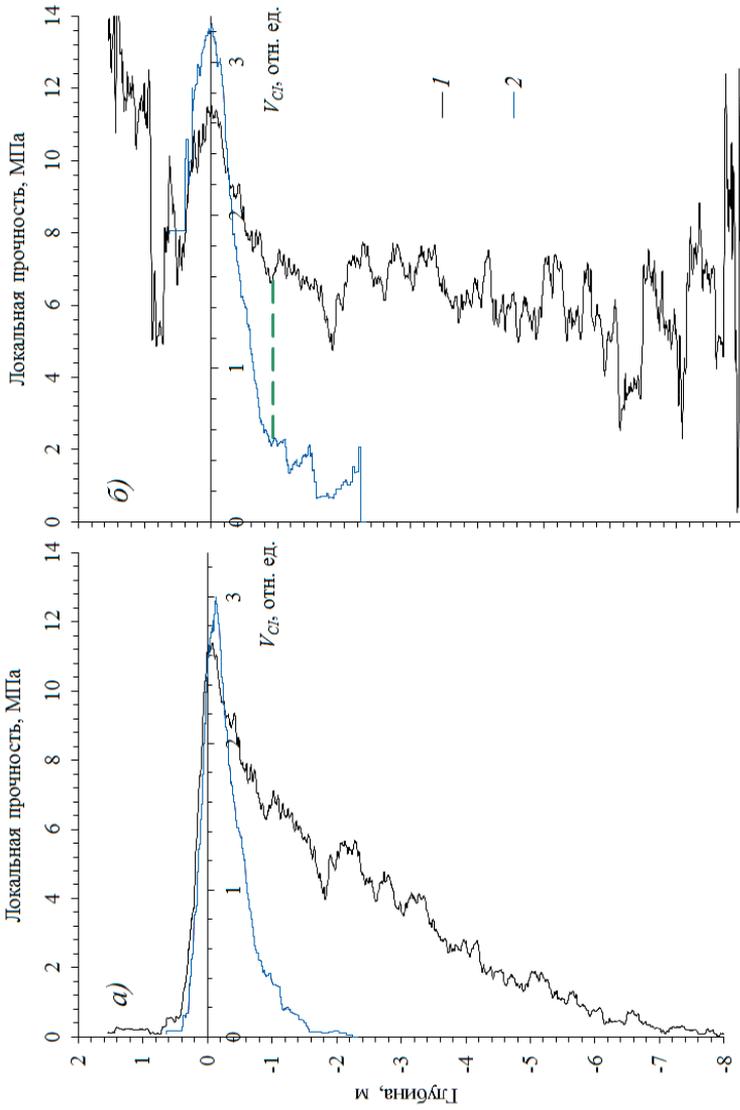


Рис. 4. Распределение объемного содержания твердой фазы льда $V_{сг}$ и локальной прочности: усреднение индивидуальных $V_{сг}$ и σ (для каждой скважины) происходит по первому типу льда; 2 — локальная прочность. Пунктирной линией показано соответствие глубины локального минимума содержания льда и излома на кривой средней прочности льда. Это обстоятельство косвенно подтверждает расположение на этом горизонте минимальной нижней границы КС, т.е. ниже этого горизонта располагаются несмоороженные блоки льда кила

Fig. 4. Distribution of the volume content of the solid phase of $V_{сг}$ ice and local strength: averaging of individual $V_{сг}$ and σ (for each well) occurs according to the first type (a) and the second type (b).

1 — the volume content of the solid phase of ice; 2 — local strength. The dashed line shows the correspondence between the depth of the local minimum of the ice content and the kink on the curve of the average ice strength. This circumstance indirectly confirms the location on this horizon of the minimum lower boundary of the CS, i.e. below this horizon unfrozen keel ice blocks are located

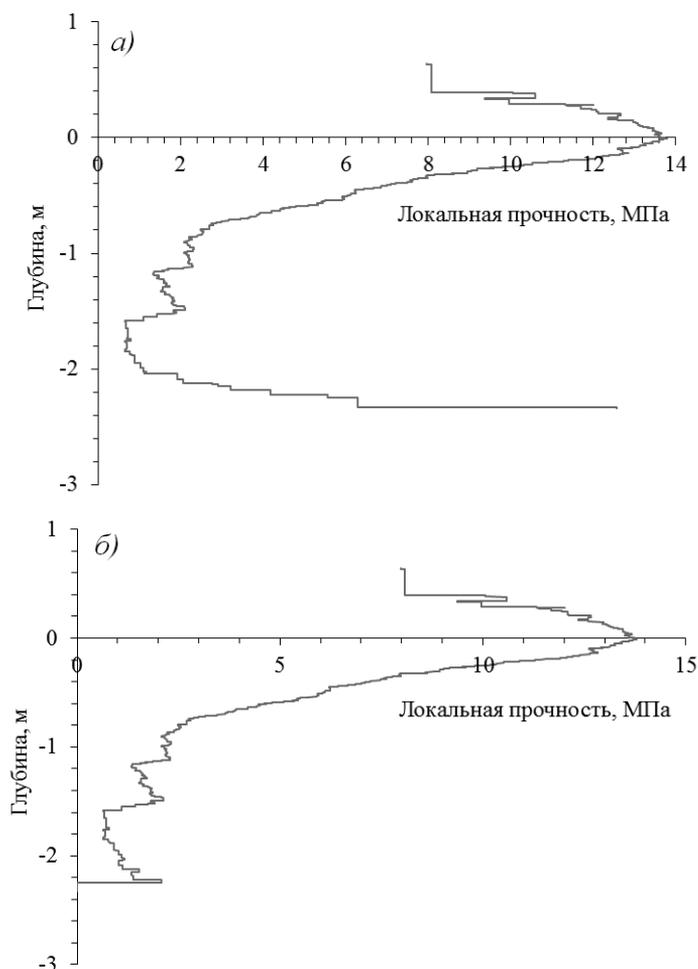


Рис. 5. Усредненное по второму типу распределение локальной прочности льда.

a) — средняя локальная прочность льда; *б)* — та же без экстремального значения на горизонте 2,4 м в одной из скважин

Fig. 5. Averaged over the second type of distribution of local ice strength.

a) is the average local ice strength; *b)* is the same without an extreme value at the horizon of 2,4 m in one of the wells

выделяющийся из общей выборки, тогда получится картина, представленная на рис. 5б. Очевидно, что выше 0,28–0,29 м («полка» прочности 8–11 МПа) локальная прочность резко уменьшается, что указывает на то, что выше измеряется не прочность КС, а прочность паруса.

Совместные графики V_{CI} и зонд-индентора представлены выше (см. рис. 4).

На рис. 6 приведена гистограмма 346 значений локальной прочности. Два основных максимума указывают на то, что на гистограмме отражена прочность двух различных сред — КС и неконсолидированной части торосов, в основном это неконсолидированный киль. Минимум между этими пиками соответствует значе-

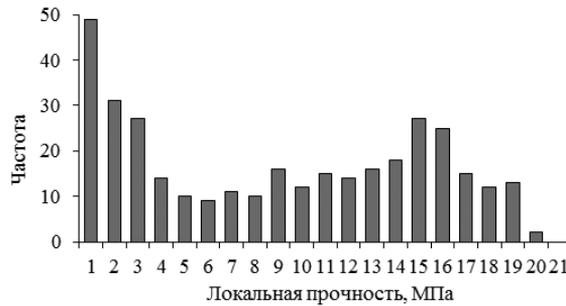


Рис. 6. Гистограмма распределения значений локальной прочности ($n = 346$)

Fig. 6. Histogram of distribution of local strength values ($n = 346$)

нию локальной прочности, равному 6 МПа. М. Джонстон и А. Баркер [7] приводят данные о локальной прочности, полученные с помощью зонд-индентора, а также цитируют другие источники. По их информации, прочность КС находится в пределах 10...20 МПа, понижаясь до нуля на нижней границе КС. Ввиду отсутствия критериев минимальной прочности КС, примем значение 6 МПа в качестве порогового.

С учетом принятого критерия рассмотрим среднее распределение локальной прочности (см. рис. 4а). Значению локальной прочности 6 МПа соответствуют глубины 0,09 и $-0,49$ м. То есть в диапазоне глубин 0,09... $-0,49$ м среднее значение локальной прочности находится в диапазоне, соответствующем прочности КС. Таким образом, эти значения представляют собой оценки среднего положения границ КС. Толщина КС в этом случае составляет 0,58 м.

На горизонте $-0,80$ м и прочности 2,6 МПа наблюдается излом тренда кривой (см. рис. 5б), что можно расценивать как окончательный переход от КС к непосредственно килю. Ниже горизонта $-0,80$ м средняя прочность льда составляет 1,4 МПа и является оценкой прочности кия.

Совпадение фрагментов графиков (см. рис. 4а), относящихся к надводной части торосов, объясняется тем, что эксперименты по локальной прочности льда начались с поверхности льда (с соответствующим заглублением), поэтому если нет льда, соответственно, нет и прочности. Подводная часть графика средней прочности на рис. 4а ниже горизонта $-1,30$ м фактически теряет смысл, т. к. зондирование не проводилось до конца скважины, а прекращалось в среднем на этом горизонте. Кривая прочности к этой глубине практически уходит в ноль, хотя реально прочность кия ненулевая.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определенной скорости термобурения соответствует диапазон локальной прочности льда, от которого можно перейти к прочности стандартных образцов при одноосном сжатии. При высоких скоростях бурения можно делать вывод, что прочность проходимого термобуром льда невысока. При средних и небольших скоростях бурения диапазон разброса значений прочности льда расширяется, и, хотя его центр смещается в сторону больших значений, однозначного вывода о прочности льда сделать нельзя. Тем не менее в результате выполненной работы получены уравнения прямых, на основе которых могут быть получены оценки прочности льда по скорости его теплового бурения.

По данным термобурения среднее положение верхней границы КС располагается на горизонте 0,19 м, нижней границы КС — на горизонте 0,45 м. Толщина КС составила 0,64 м. По оценке данных зондирования среднее положение верхней границы КС располагается на горизонте 0,09 м, нижней границы КС — на горизонте 0,49 м. Толщина КС составила 0,58 м. Средняя прочность кия оценена в 1,4 МПа. Таким образом, при достаточно большом количестве измерений локальной прочности по ним, так же как и по данным термобурения, можно оценить среднее положение границ КС.

Для более детального и точного анализа данных теплового бурения и зондирования необходимо проводить испытания в одной точке. Чтобы повысить сопоставимость результатов, желательно в точках совместных испытаний кроме водяного бурения проводить бурения электротермобуром. Это позволит детализировать строение тороса, т.к. электротермобурение дает более точное определение скоростей прохождения слоев тороса по сравнению с водяным бурением. Желательно модернизировать зонд-индентор таким образом, чтобы проводить испытания в скважинах, подготовленных с помощью электромеханического керноотборника фирмы «Kovacs Enterprise», что позволит получать точные представления о текстуре, температуре и солености льда непосредственно в месте проведения определения прочности льда. Для жесткой привязки морфометрических данных к данным зондирования необходимо разработать оперативный метод оценки толщины КС в полевых условиях, чтобы была возможность осуществлять реперное определение прочности КС в наиболее характерных местах, и тем повысить точность интерпретации совместных измерений.

Благодарности. Экспериментальная часть работы выполнена в рамках программы работ сезонной экспедиции «Север-2016» Высокоширотной арктической экспедиции (ВАЭ) ААНИИ.

Acknowledgements. The experimental part of the work was carried out within the framework of the work program of the seasonal expedition “Sever-2016” organised by the High-Latitudinal Arctic Expeditions Department, the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) of Roshydromet.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов Е.У., Морев В.А., Порубаев В.С., Тюряков А.Б. и др. Метод водяного термобурения для исследования внутренней структуры ледяных образований // Труды RAO/CIS Offshore. Санкт-Петербург, Россия. 16–18 сентября 2003. С. 247–252.
2. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Статистическая модель морфометрии гряды тороса в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 3 (89). С. 49–61.
3. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Бородкин В.А., Нюбом А.А. и др. Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явлений сжатия и торшения в морских льдах. СПб.: ААНИИ. 2017. 174 с.

REFERENCES

1. Mironov E.U., Morev V.A., Porubaev V.S., Tiuriakov A.B. et al. Method of water thermal drilling for the study of the internal structure of ice formations // Proc. of RAO/CIS Offshore. St. Petersburg, Russia, 16–18 Sept. 2003: 247–252 [In Russian].
2. Mironov E.U., Porubaev V.S. Statistical model of ice ridge morphometry in the southwestern part of the Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Problems of Arctic and Antarctic. 2011, 3 (89): 49–61. [In Russian].
3. Smirnov V.N., Kovalev S.M., Borodkin V.A., Niubom A.A. et al. Instrumental'nyi monitoring i kratkosrochnyi prognoz iavlenii szhatiia i torosheniia v morskikh l'dakh. Instrumental monitoring and short-term forecasting of compression and torsion phenomena in sea ice. St. Petersburg: AARI, 2017: 174 p. [In Russian].

4. Тышко К.П., Ковалев С.М. Роль водно-шуго-вых слоев в нарастании однолетнего ледяного покрова и консолидации торосов // Метеорология и гидрология. 2006. № 8. С. 72–82.
5. Чистяков В.К., Саламатин А.Н., Фомин С.А., Чугунов В.А. Тепломассоперенос при контактном плавлении. Казань: Изд-во Казанского университета, 1984. 176 с.
6. Johnston M., Barker A. Microstructure of first year sea ice ridges. Technical Report HYD-TR-043. May 2000. URL: <http://dx.doi.org/10.4224/12340979> (дата обращения 01.07.2018).
7. Kovalev S.M., Korostelev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N. et al. Application of a borehole jack for determination the local strength of fresh and sea ice // Proc. of the 17th Int. Symp. on Ice. St. Petersburg: IAHR, 2004. P. 147–153.
4. Tyshko K.P., Kovalev S.M. Role of water-shuga layers in the build-up of annual ice cover and consolidation of hummocks. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2006, 8: 72–82. [In Russian].
5. Chistiakov V.K., Salamatin A.N., Fomin S.A., Chugunov V.A. *Teplomassoperenos pri kontaktnom plavlenii*. Heat and mass transfer during contact melting. Kazan': Publishing house of Kazan' State University, 1984: 176 p. [In Russian].
6. Johnston M., Barker A. Microstructure of first year sea ice ridges. Technical Report HYD-TR-043. May 2000. URL: <http://dx.doi.org/10.4224/12340979> (accessed 01.07.2018).
7. Kovalev S.M., Korostelev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N. et al. Application of a borehole jack for determination the local strength of fresh and sea ice. Proc. of the 17th Int. Symp. on Ice. St. Petersburg: IAHR, 2004: 147–153.