

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛЕДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗЫСКАНИЙ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

*д-р геогр. наук Е. У. МИРОНОВ, канд. геогр. наук Ю. П. ГУДОШНИКОВ,
д-р физ.-мат. наук В. Н. СМИРНОВ*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: mir@aari.ru

Рассматриваются современные методы наблюдений и измерений морфометрических, физико-механических и динамических характеристик ледяных полей, гряд торосов, стамух и айсбергов. Эти методы широко использовались в последние годы при проведении ледовых исследований и изысканий на российском арктическом шельфе.

Ключевые слова: морфометрия, физико-механические свойства, динамика, ледяные образования, арктические моря.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение шельфовых месторождений в Арктике является стратегическим направлением деятельности ведущих российских нефтяных и газодобывающих компаний. По своему совокупному нефтегазовому потенциалу акватории российского арктического шельфа сравнимы с крупнейшими нефтегазовыми районами мира (Дмитриевский и др., 2007). Более 100 лицензионных участков на акваториях арктических морей в последние годы было распределено между государственными компаниями ОАО «НК «Роснефть»» и ОАО «ГАЗПРОМ».

Необходимым условием освоения шельфовых месторождений является проведение гидрометеорологических изысканий, которые регламентируются Сводом правил (СП, 2004). Этот документ устанавливает общие технические требования и правила, состав и объемы инженерно-гидрометеорологических изысканий, выполняемых на этапах освоения территории на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений, включая разработку предпроектной и проектной документации, строительство и эксплуатацию морских нефтегазопромысловых сооружений. Для обеспечения максимально возможной длительности временного ряда наблюдений инженерно-гидрометеорологические изыскания необходимо начинать с опережением по отношению к другим видам изысканий и вести непрерывно, включая период проектирования, с последующим продолжением в период строительства. Продолжительность наблюдений до начала проектирования и строительства морского сооружения должна быть не менее 3–5 лет.

На акватории арктических морей, учитывая суровые климатические условия и наличие морского льда в течение большей части года (Миронов, Гудкович и др., 2007), особое внимание необходимо уделять ледовым исследованиям и изысканиям. При освоении углеводородных месторождений для определения нормативных значений

ледовых нагрузок на шельфовые инженерные сооружения учитываются морфометрические характеристики торосов, стамух и айсбергов, физико-механические свойства льда, а также динамика ледяных полей и айсбергов.

Физика и механика морского льда, его морфометрия и динамика являются основными свойствами, параметры которых используются при решении прикладных задач на шельфе арктических морей. Традиционные подходы к определению этих свойств дают необходимую информацию для расчета ледовых нагрузок на инженерные сооружения и определения несущей способности льда (Смирнов, Миронов, 2010). В настоящее время изучение морского льда проводится с позиции рассмотрения его не только как материала и конструкции, но и как крупномасштабной дискретной среды. Такой подход основан на тесно связанных научных задачах: механической, отражающей напряженное состояние ледяного покрова, геометрической, обусловленной деформациями ледяных полей при сжатии и торошении и физической сущностью физико-механических процессов, происходящих под действием как внешних, так и внутренних сил.

Проводя ледовые изыскания необходимо осуществлять комплексные исследования, включая метеорологические и океанографические наблюдения. В период с 2009 по 2014 г. ААНИИ выполнил цикл ледовых экспедиций в локальных районах Байдарацкой губы, северной части Обской губы, морях Карском и Лаптевых по заказу компаний ПитерГаз, ЯмалСПГ, НОВАТЭК и Роснефть. Все экспедиции имели комплексный характер и в них использовались современные методы наблюдений параметров ледяного покрова и айсбергов.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Метод определения рельефа верхней поверхности ледяных образований

Для определения рельефа верхней поверхности ледяных образований производится тахеометрическая съемка с использованием электронного тахеометра, например M3 DR TrimbleAccess. Задачей съемки является построение схемы полигона, фиксирование относительных координат точек бурения, расположения линий, вдоль которых производилось бурение, определение высоты паруса тороса в выбранных при разметке точках. Тахеометр устанавливается на ровном льду, где производится бурение шнековым буром скважины до воды. От воды определяется высота тахеометра и затем высота измеряемых точек. Для определения высоты паруса тороса в точках бурения устанавливается рейка с отражателем. При определении положения и высоты труднодоступных точек тахеометр работает в режиме отражения ото льда. Такой режим используется при исследовании айсбергов. Место расположения тахеометра является первой опорной точкой съемки. Затем выбирается вторая опорная точка, обычно с другой стороны гребня тороса, так как с места первой опорной точки не всегда можно снять точки, расположенные с другой стороны гребня. Азимут направления на вторую опорную точку определяется с помощью компаса. Невысокая точность определения направления с помощью компаса в данном случае не важна, так как торосы расположены на дрейфующем льду и направление линии гребня тороса по отношению к сторонам света может несколько изменяться при движении ледяного покрова.

После обработки данных тахеометрической съемки можно построить схему полигона и пространственное распределение рельефа паруса гряды тороса (айсберга), как показано на рис. 1.

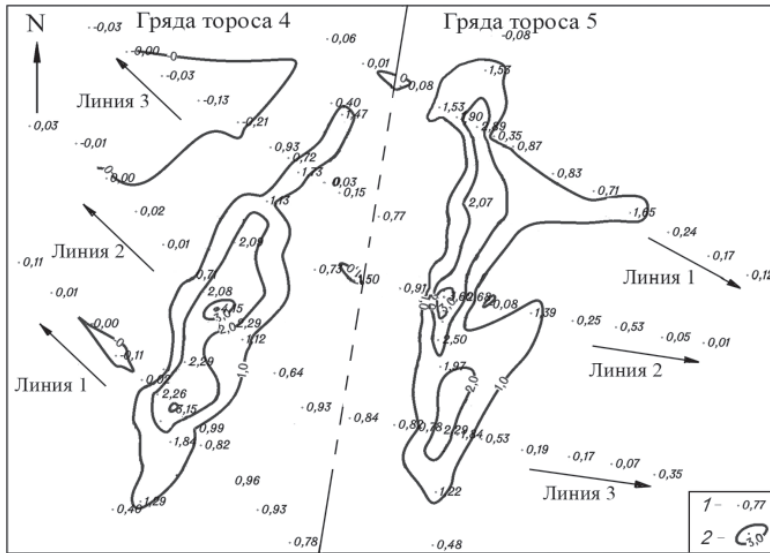


Рис. 1. Схема полигона с рельефом двух гряд торосов.

1 – превышение льда над уровнем воды, 2 – изобата

Метод термобурения ледяных образований

Наиболее эффективным методом определения вертикальных параметров гряд торосов (стамух) и их внутреннего строения является установка водяного термобурения льда (УВБЛ) с компьютерной записью скорости бурения, разработанная в ААНИИ (Миронов и др., 2003). Скорость бурения зависит от подаваемой тепловой мощности, пористости и температуры льда, разработанная технология защищена патентом (Патент, 2000).

Морская вода через смесительную трубу и всасывающий шланг электронасосами прокачивается через водоподогреватель, где нагревается котлом, работающим на дизельном топливе. Некоторое количество горячей воды сливается в смесительную трубу для подогрева всасываемой в водоподогреватель воды. Подогретая до температуры 70–80 °С вода по подводным шлангам, намотанным на вьюшки, поступает в измерительные боксы. В измерительных боксах размещены преобразователь перемещения бура, датчик температуры воды и логгер.

После обработки данных строится профиль внутреннего строения гряды тороса с выделением, по разработанной методике (Миронов и др., 2009), границ твердого, рыхлого льда и пустот, а также границ и толщины консолидированного слоя. Дальнейший анализ распределения всех морфометрических характеристик гряд торосов позволяет построить геометрическую модель тороса, которая имеет треугольную или трапециевидную форму кия (Миронов, Порубаев, 2011).

Метод определения формы и глубины кия ледяных образований и экзарации дна

Основным функциональным назначением подводного телеуправляемого обзорного комплекса (ПТОК) типа «ГНОМ» является получение оператором видеоизображения объектов, находящихся в толще воды, посредством перемещения телеуправляемого подводного аппарата (ТПА), оснащенного видеокамерой. Пере-

мещения и управление режимами работы телеуправляемого подводного аппарата, находящегося под водой, осуществляются по командам с надводного блока управления (БУ). ПТОК обеспечивает:

- получение оператором видеоизображения, сформированного телекамерой на борту ТПА в реальном масштабе времени;
- получение оператором данных в режиме телетекст о параметрах работы, с наложением на видеоизображение, транслируемого с борта ТПА;
- управление движением ТПА в толще воды при помощи блока управления с задержкой выполнения команд управления не более 0,5 с;
- перемещения ТПА в толще воды со скоростью не менее 0,5 м/с и развороты вокруг вертикальной оси со скоростью 10 м/с;
- погружение ТПА на глубину до 100/250 м.

Экспресс-анализ данных позволяет получать данные о глубине киля тороса или айсберга, его форме, а также параметры (глубина, ширина) экзарации дна ледяными образованиями.

Для определения морфометрических характеристик нижней поверхности ледяного покрова в настоящее время широко применяются комплексы на базе гидролокаторов кругового обзора. Данные комплексы представляет собою гидроакустический комплекс с функцией сонара – интерферометра с круговым обзором и предназначены для решения задач по определению морфометрических характеристик объектов, находящихся в зоне действия акустического поля, создаваемого антенной комплекса. Сонограмма, получаемая в результате гидроакустической съемки нижней поверхности ледового покрова, дает возможность получить светотеневую картину видимой части исследуемого объекта. Применяя фазовый анализ волнового поля, по углу подхода отраженных лучей можно оценить их интегральную размерность. В оптимальных условиях светотеневая картина нижней поверхности ледяного покрова может иметь площади до 400–500 м в диаметре.

Данные гидролокационной съемки нижней поверхности ледяного покрова дают возможность определить максимальные значения осадки килей торосов на всей площади сканирования. Для определения размеров выступающих частей ледяных образований используются специализированные программы, которые при наличии тени, отбрасываемой этим выступом на ледяную поверхность (с известной толщиной) вдоль радиуса кругового поля, и данных о пространственной ориентации антенны гидролокатора позволяют сделать это весьма оперативно.

В экспедиционной практике ААНИИ хорошо себя зарекомендовал быстро разворачиваемый гидроакустический комплекс «СОНИК-5ПИМ», разработанный российскими специалистами с учетом экстремальных условий работы на дрейфующем льду. В 2015 г. специалистами института планируется использование цифрового гидролокатора кругового обзора 881L DIGITAL MULTI-FREQUENCY PROFILING. Благодаря использованию интерфейса Ethernet возможно получить более 100 сканирований в секунду с разрешением по дальности от 1 до 2 мм и качеством, близким к фотографическому.

*Аэрофотосъемка ледяного покрова с вертолета
и беспилотного летательного аппарата*

Одним из методов получения информации о геометрических размерах ледяных образований является аэрофотосъемка, выполняемая с пилотируемого или бес-

пилотного летательного аппарата. Последующая фотограмметрическая обработка полученных изображений позволяет получать данные о линейных размерах и высоте зафиксированных объектов. Данный метод дает возможность охватить большую площадь исследуемой акватории в сравнительно короткие сроки.

В недавнем прошлом в производстве аэрофотосъемочных работ широко применялся аналоговый комплекс на базе фотоаппарата АФА-41/10 или его аналогов. Достаточно трудоемкий процесс проявки и обработки пленочных носителей информации в настоящее время успешно заменяется цифровой техникой, которая по своим характеристикам не уступает и даже превосходит аппаратуру, используемую ранее. К неоспоримым преимуществам современной аппаратуры следует отнести мобильность (как правило, небольшие размеры) и автономность (возможность использования комплексов без подключения к бортовой сети и увеличенная в сотни раз емкость носителя информации). Опыт применения специалистами ААНИИ бортовой системы управления аэрофотосъемкой для пилотируемых воздушных судов производства компании GEOSCAN в экспедиционных исследованиях 2013–2014 гг. показал пригодность использования оборудования подобного типа в арктических условиях. Еще одним преимуществом цифровой аэрофотосъемки является возможность использования фотоаппаратуры различных производителей, что позволяет выбирать оптимальные параметры для получения качественных результатов.

Применение аэрофотосъемки для изучения морфометрических параметров ледяных объектов позволяет с большой точностью получать трехмерные модели отснятых объектов. На рис. 2 представлена трехмерная модель айсберга, полученная после обработки материалов съемки.

Беспилотный летательный аппарат (БЛА) «Орлан-10» является самолетом среднего радиуса действия, обеспечивает выполнение плановой съемки объектов большой площади (50×50 км) или маршрутной съемки большой протяженности (до 400 км) во всем диапазоне высот (100–3000 м).

В экспедициях ААНИИ на БЛА «Орлан-10» была установлена следующая полезная нагрузка:

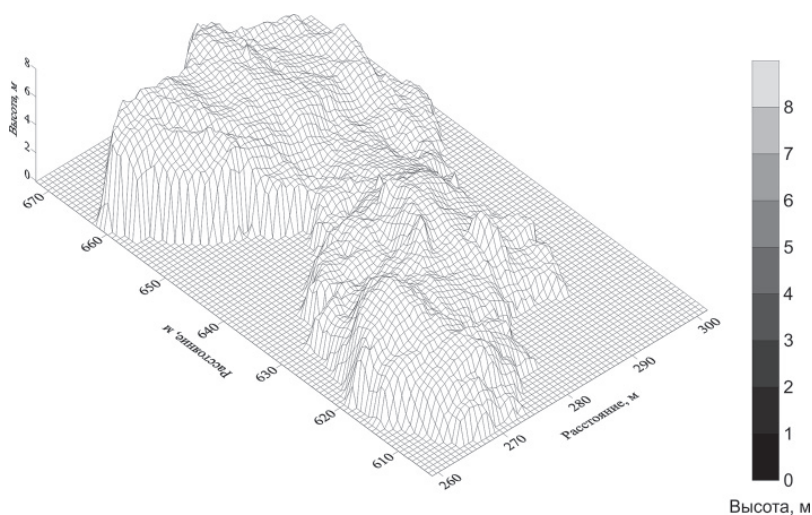


Рис. 2. Восстановленная трехмерная модель айсберга.

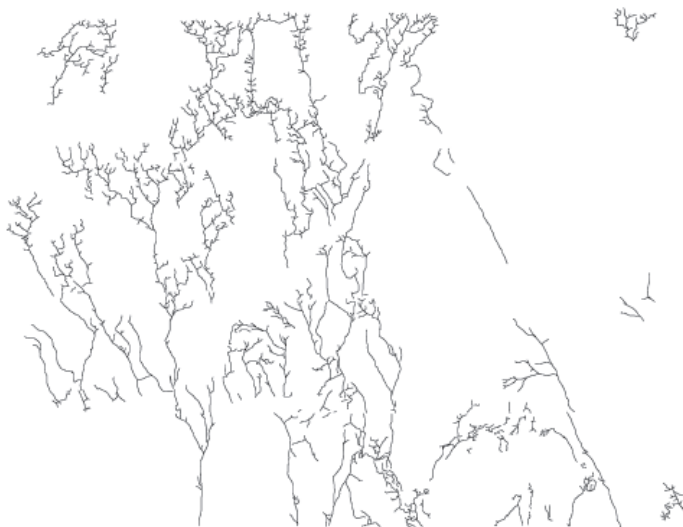


Рис. 3. Структура торосистых образований, выделенная по ортофотоплану.

- 2 телекамеры с возможностью записи изображения на борту или передачи в режиме реального времени на пункт управления для выполнения мониторинговой съемки, контроля условий полета и фактической видимости;
- цифровой фотоаппарат Canon 550 D для плановой аэрофотосъемки;
- тепловизионная камера для выполнения мониторинговой съемки с записью данных;
- поворотная камера для оперативного мониторинга ледяной поверхности по курсу полета самолета.

Опыт применения БЛА «Орлан-10» позволяет оценить этот комплекс как достаточно эффективное средство производства аэрофотосъемки последовательно совмещенных малых полигонов размером 1×1 км для построения ортофотопланов (рис. 3), оценки плотности гряд торосов, линейных размеров гряд и их направлений.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕЙФА ЛЕДЯНЫХ ПОЛЕЙ И АЙСБЕРГОВ

ААНИИ имеет достаточно длительный положительный опыт использования радиомаяков различных спутниковых систем (Inmarsat-C, ARGOS) и различных модификаций.

Все подобные устройства являются автономными и «теряемыми» (сбор обратно не предусмотрен) и предназначены для дистанционного мониторинга приповерхностного атмосферного давления и дрейфа ледяных образований с передачей результатов измерений через спутниковую систему определения местоположения и сбора данных (в настоящее время используются радиомаяки спутниковой системы ARGOS). Траектория движения радиомаяка определяется по результатам измерения координат встроенным приемником глобальной навигационной системы GPS, а также на базе эффекта Доплера (рис. 4). Синхронно с измерением координат производится измерение атмосферного давления, температуры корпуса радиомаяка, а также напряжения его источника питания. Передача информации происходит с дискретностью один час.



Рис. 4. Радиомаяк спутниковой системы ARGOS, установленный в припае.

Получаемые с помощью этих приборов сведения имеют уникальный характер и позволяют отслеживать дрейф ледяных образований (ледяные поля, айсберги) на обширных акваториях в течение длительного периода. Акватории, на которых использовалось это оборудование, включают в себя северо-восточную часть Баренцева моря, а также моря Печорское, Карское, Лаптевых и северную часть Обской губы, в которых ведутся исследования в интересах проектов по обустройству и введению в эксплуатацию шельфовых углеводородных месторождений и их береговой инфраструктуры. С 2004 г. специалистами ААНИИ успешно установлено более сотни подобных устройств, получены и обработаны траектории дрейфа различных ледяных образований (Ледяные образования..., 2006).

Одним из наиболее эффективных средств сбора информации об осадке, дрейфе льда и течениях являются притопленные автономные буйковые станции (ПАБС) оснащенные гидролокатором верхнего обзора и акустическим профилографом течений, позволяющие собирать натурные данные непосредственно в районе интересов. Наиболее распространенный вариант комплектации ПАБС: акустический доплеровский профилограф течений ADCP Workhorse Sentinel (производство Teledyne RD Instruments, США) и гидролокатор верхнего обзора для профилирования льда (ГПЛ) IPS (производство ASL Environmental Sciences, Inc., Канада). Энерговооруженность данного оборудования позволяет проводить наблюдения за параметрами окружающей среды с высокой частотой (ежесекундная фиксация осадки льда, скорости и направления течений и дрейфа льда с дискретностью 10 минут и т.д.) в течение года. В зависимости от комплектации, с помощью этих приборов возможно также определять параметры морского волнения.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЬДА И ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Методики изучения физико-механических свойств морского льда

Физико-механические свойства льда изучаются на основании кернов, выбуренных с помощью кольцевого бура или керноотборника из ровных ледяных полей, торосов, стамух и айсбергов. Описание структуры и текстуры льда являются одним из первых шагов в исследовании свойств морского льда. Текстура льда описывается на основании визуального осмотра продольного разреза и фотографирования кернов

льда. Основные особенности текстуры льда: прозрачность, цвет, наличие воздушных, минеральных и органических включений, их форма, размеры и распределение по горизонтам. Вертикальные и горизонтальные пластины льда толщиной 1–2 мм используются для изучения кристаллической структуры льда в поляризованном свете. Методические особенности изучения физики и механики льда представлены в работе (Смирнов и др., 2011).

Температура льда измеряется при помощи термометра ТЛ-4, диапазон измерений –20... +30 °С, или электротермометра ГТН 175/Pt. Чтобы исключить радиационный прогрев во время измерения температуры, Kern накрывается фольгированной пленкой. Соленость льда определяется по электропроводности талой воды, полученной из образцов льда с различных горизонтов ледяного образования. Кондуктометром с автоматической термокомпенсацией HI8733 измеряется проводимость полученного раствора, по которому определяется соленость. В соответствии с рекомендациями ИСО, по температуре и солености можно оценивать прочность льда. Плотность льда определяется путем измерения объема и взвешивания образца льда на электронных весах типа МК-6.2-A20.

Испытания прочности образцов льда при одноосном сжатии проводятся на гидравлическом прессе в комплекте с гидравлической станцией. Давление в рабочей камере прессы и перемещение поршня при деформировании образцов льда через систему датчиков регистрируются на компьютере; также давление в гидросистеме контролируется по показаниям образцового манометра. Цилиндрические образцы с осью, ориентированной перпендикулярно и параллельно поверхности ледяного покрова, изготавливались из кернов, выбуренных из ледяного покрова. Высота цилиндрических образцов льда составляла 290 мм, что удовлетворяет требованиям нормативных документов, предъявляемым к размерам образцов льда. Измерения проводятся при постоянной скорости деформирования льда. Отмечается характер разрушения образца льда: хрупкий или пластический. Прочность льда при одноосном сжатии (σ_c , МПа) определяется из соотношения:

$$\sigma_c = \frac{F}{S_0},$$

где: F — разрушающая сила (МН), S_0 — площадь поперечного сечения образца (м^2).

Испытания пределов прочности ледяных дисков на изгиб проводятся на левой испытательной машине ПИМ–200М. Диапазон скоростей хода опорной плиты от 0,1 мм/с до 5 мм/с. Продолжительность деформирования диска льда от момента приложения силы до разрушения диска льда составляет от 0,7 до 1,2 с. Максимальное значение силы в момент разрушения диска измеряется по показаниям динамометра. При испытаниях пластин диаметром 14,1 см, внутреннем диаметре подставки прессы 12,4 см и диаметре опытного цилиндра 1 см прочность круглой пластины определяется по формуле:

$$\sigma_{пл} = -2,08 \frac{P_{\max}}{h^2},$$

где $\sigma_{пл}$ — разрушающее напряжение (МПа), P_{\max} — разрушающая нагрузка (МН), h — толщина льда (м).

Для испытания прочности ледяных консолей при изгибе на плаву выбирается ровный участок ледяного покрова однородной толщины без видимых трещин. Для выпиливания используются как цепная бензопила с шиной 1,2 м, так и ручная «канад-

ская» пила. Консольная балка должна иметь соответствующие размеры: соотношения длины консоли (l), ее ширины (b) и высоты (h_d) составляют $l \approx (6-8) \cdot h_d$, $b \approx (1-2) \cdot h_d$. При испытании регистрируется сила, действующая на свободный конец консоли, и перемещение свободного конца консоли. Напряжение σ_k (МПа) во льду у основания консоли (прочность консоли) определяется по формуле:

$$\sigma_k = \frac{6 \cdot Fl}{b h_d^2},$$

где F — сила (МН), при которой происходит разлом консоли. Регистрация всех параметров испытания прочности консоли на изгиб производится на компьютере.

Метод испытания полномасштабной прочности морского льда на сжатие

В ААНИИ создана установка — скважинный зонд-индентор — для определения прочности льда на сжатие в естественных условиях. Установка состоит из гидростанции, зонда-индентора, шлангов высокого давления и регистратора/компьютера показаний датчиков давления, перемещения и сигналов трещинообразования во льду во время испытания (рис. 5). Подробное описание установки имеется в работе (Смирнов и др., 2011). Собственно зонд-индентор состоит из опорной плиты и гидроцилиндра с выдвигающимся штоком. Испытания проводятся в скважинах, пробуренных в ледяных образованиях с помощью мотобура диаметром 250 мм на глубину до 5 м. Зонд-индентор помещается в скважине, и через каждые 30 см производится испытание. Постоянство скорости внедрения индентора в лед может регулироваться в пределах 1–4,5 мм/с. Во время испытаний с дискретностью 100 Гц фиксируются изменение давления в гидросистеме, смещение индентора в стенку скважины и появляющиеся акустические сигналы.

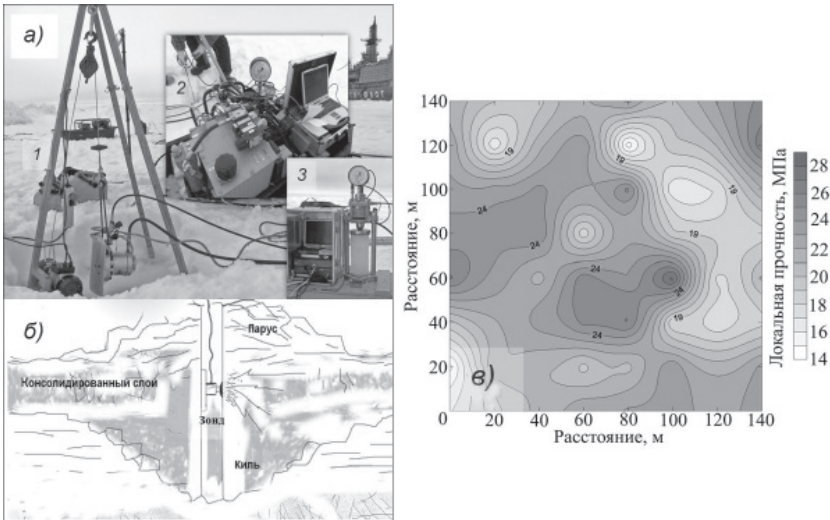


Рис. 5. Гидравлическая установка для комплексного исследования прочности льда на сжатие в ледяных образованиях.

а — оборудование: 1 — тренога над скважиной с зонд-индентором; 2 — гидростанция с регистратором показаний датчиков давления, перемещения и сигналов трещинообразования; 3 — гидропресс для традиционных испытаний прочности образцов льда. *б* — типичная схема расположения зонд-индентора в скважине торося для определения прочности консолидированного слоя и выделения его верхней и нижней границ. *в* — неоднородность прочности ледового полигона толщиной 1,2 м, определенная зонд-индентором.

На основании измерения разрушающего давления на горизонтах ледяного образования строятся вертикальные диаграммы, пересчитываемые затем в механические напряжения.

Таким образом, с помощью скважинного зонд-индентора определяется разрушающее напряжение, или локальная прочность льда. Методика рекомендована в Своде правил (СП, 2004) и международном стандарте ISO 19906 (2010), из которого следует привести замечание: «Результаты испытаний скважинным зонд-индентором широко характеризуют прочностные свойства льда *in situ* и представляют сравнительный индекс прочности. Испытания дают информацию о прочности льда при объемном напряженном состоянии. Некоторые эксперименты показали, что давление p_{ult} в скважине связано с прочностью образцов льда σ_c в диапазоне $2\sigma_c < p_{ult} < 4\sigma_c$. Другие испытания показали диапазон $3,5\sigma_c < p_{ult} < 5\sigma_c$. Большие величины $p_{ult} = 5$ даны в работе (Kovalev et al., 2004). При получении большего количества данных этот диапазон может быть изменен. Скважинным зонд-индентором важно изучать изменчивость прочности в весенне-летний период. Зонд может быть использован для выявления профиля неоднородности прочности ледовых дорог и консолидации торосов».

В работе (Palmer, Croasdale, 2012) также указывается, что возможности скважинного зонд-индентора позволяют адекватно интерпретировать результаты измерений и существенно улучшать точность вычислений ледовых нагрузок на сооружение, а также более корректно сравнивать свойства льда в различных регионах. Отмечается, что представляет большой интерес сокращение диапазона $\sigma_{c_{min}} < p_{ult} < \sigma_{c_{max}}$.

По данным последних работ в экспедициях ААНИИ в морях Карском и Лаптевых этот диапазон составил 4,5 – 5,0. При соответствующих экспериментах на полигонах выявляется пространственная неоднородность прочности льда, которая приводит к разным средним локальным значениям на вертикальных сечениях полигона. Разница средней прочности полигона достигает 10 % (рис. 5в).

Мониторинг физико-механического состояния ледяных образований

Инструментальный мониторинг проводится по двум направлениям: изучение физико-механического состояния льдов и разработка методов получения исходных данных по характеристикам полномасштабной прочности льда как одного из основных параметров, необходимых для проектирования ледостойких сооружений на арктическом шельфе и их безопасного функционирования. Обратная задача мониторинга состоит в том, чтобы по физико-механическим изменениям во льду и крупномасштабной динамической реакции льда на воздействия можно было судить об источниках сил, вызывающих эти изменения, и о возможностях прогнозирования возникновения экстремальных ледовых явлений. Определение вектора ускорения при подвижках позволяет с учетом массы дрейфующего покрова получать значения сил взаимодействия в физических терминах. Подобного рода динамические процессы в случае с шельфовыми инженерными сооружениями приводят к нежелательной вибрации и дополнительным динамическим нагрузкам (Palmer, Croasdale, 2012).

С применением комплекса приборов на льду — наклонометры, акселерометры, сейсмометры — созданы подходы к разработке прогнозирования процессов сжатия и разрушения с целью раннего выявления опасных ледовых явлений в реальном масштабе времени. Обнаружены признаки возникновения сжатия и разлома: импульсы микроподвижек и автоколебаний, возникающие за несколько минут/часов до сжатия и сдвигового разлома (Смирнов и др., 2013). На примере результатов мониторинга

состояния дрейфующих льдов показано, что в большинстве случаев не отмечается прямой связи процессов сжатия и торошения с местными гидрометеорологическими условиями. Выявлены характеристики мезо- и макромеханики морских льдов, и с привлечением снимков льда с ИСЗ и БЛА, произведена дешифровка изображений протяженных разломов, гряд торосов, разводий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение последнего десятилетия выполнены разработки и создано специализированное оборудование и измерительная техника для исследования ледяных образований (установки водяного термобурения льда, скважинные зонд-инденторы, измерители деформаций и напряжений и др.). На устройства и способы определения свойств морского льда получены патенты.

В комплексных ледоисследовательских экспедициях применялось современное отечественное и зарубежное оборудование для определения рельефа верхней (цифровой аэрофотоаппараты, тахеометры, беспилотные летательные аппараты) и нижней (сонары кругового обзора) поверхности ледяного покрова и айсбергов, измерения параметров дрейфа льдов и айсбергов (радиомаяки, доплеровские измерители течений и дрейфа льда).

На основании испытаний локальной прочности льда можно оценивать прочность ледяного покрова, не выбуривая керны и не испытывая образцы льда. Такой подход позволяет устранить несовершенство традиционной методики испытания прочности образцов льда и дополнить российский Свод правил соответствующими рекомендациями.

Возможности скважинного зонд-индентора еще предстоит выявить при решении многих ледотехнических задач: определение полномасштабной прочности льда с учетом его толщины, определение сил сцепления, измерение изменчивости средней локальной прочности участка/полигона ледяного покрова, выявление коэффициента снижения прочности морского льда в весенний период.

Метод инструментального мониторинга динамического состояния морских льдов позволяет выявлять физико-механические характеристики льда и, привлекая изображения льда с ИСЗ и БЛА, проводить дешифровку снимков с изображением разломов, гряд торосов, разводий.

За последние годы проведен цикл ледоисследовательских работ по изучению морфометрических и физико-механических свойств ледяных образований, динамики ледяных полей и айсбергов на шельфе морей Баренцева, Карского и Лаптевых по заказу ведущих отечественных и зарубежных нефтегазодобывающих компаний.

В перспективе планируется освоение нефтегазовых месторождений в Восточно-Сибирском и Чукотском морях, имеющих существенные особенности ледового режима. Это обуславливает опережающее проведение ледоисследовательских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дмитриевский А.Н., Пашин В.М., Караганов В.В., Кульпин Л.Г., Симонов Ю.А. Шельф России — перспективы добычи углеводородов и потребности в морских и береговых технических средствах // Сборник аннотаций докладов 8-й межд. конф. RAO'07, 11–13 сентября 2007. СПб., 2007. С. 36–37.

Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.

Миронов Е.У., Гудкович З.М., Карклин В.П., Мюрмель К. Ледовые условия в Северном Ледовитом океане // Научные исследования в Арктике. Т. 3. СПб.: Наука, 2007. С. 24–62.

Миронов Е.У., Клячкин С.В., Порубаев В.С. Морфометрические характеристики гряд торосов и стамух по данным натурных наблюдений и модельных расчетов в северо-западной части Каспийского моря // Труды 9-й межд. конф. РАО'09, 15–18 сентября 2009. СПб., 2009. Т. 1. С. 280–286.

Миронов Е.У., Морев В.А., Порубаев В.С., Тюряков А.Б., Харитонов В.В. Метод водяного термобурения для исследования внутренней структуры ледяных образований // Труды 6-й международной конференции РАО'03, Санкт-Петербург, 16–19 сентября 2003. СПб., 2003. С. 355–359.

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.

Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В. Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта. Патент на изобретение № 2153070 от 20.07.2000. Бюллетень № 20. М., 2000.

Свод правил «Инженерные изыскания на шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений», СП 11-114-2004. М., 2004. 76 с.

Смирнов В.Н., Миронов Е.У. Исследование прочности, морфометрии и динамики льда в инженерных задачах при освоении шельфа в замерзающих морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 5–15.

Смирнов В.Н., Панов Л.В., Соколов В.Т. Динамика процесса разлома дрейфующего ледяного поля станции «Северный полюс-38» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 1 (100). С. 26–34.

Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М., Никитин В.А. Способ определения физико-механических характеристик ледяных образований в натурных условиях в скважинах. Патент на изобретение № 2348018, 2009.

Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М., Шейкин И.Б. Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения. СПб.: ААНИИ, 2011. 178 с.

ISO/FDIS 19906: 2010 (E). Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. 2010. P. 435.

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 // 17th International Symposium on Ice. S-Petersburg, IAHR, 2004. P. 147–153.

Palmer A.C, Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. London: World Scientific, 2012. P. 357.

Ye. U. MIRONOV, Yu. P. GUDOSHNIKOV, V. N. SMIRNOV

CURRENT METHODS OF ICE STUDIES AND EXPLORATIONS ON THE SHELF OF THE ARCTIC SEAS

Current methods of observations and measurements of morphometric, physical-mechanical and dynamic characteristics of ice floes, ice ridges, stamukhas and icebergs are considered. These methods have been widely used in the last few years in ice studies and explorations in the Russian Arctic offshore.

Keywords: morphometry, physical-mechanical properties, dynamics, ice features, shelf, Arctic Seas.