

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ, МОРФОМЕТРИИ И ДИНАМИКИ ЛЬДА В ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧАХ ПРИ ОСВОЕНИИ ШЕЛЬФА В ЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРЯХ

д-р физ.-мат. наук В.Н.СМИРНОВ, д-р геогр. наук Е.У.МИРОНОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, smirnov@ari.nw.ru

*Рассматриваются новые и усовершенствованные методы изучения свойств морского льда и определения его физико-механических параметров как исходных данных для определения нормативных значений ледовых нагрузок при проектировании морских инженерных сооружений. Определены морфометрические характеристики льда с помощью тепловых буровых устройств существенно повысило эффективность изучения внутреннего строения торосистых образований. Выполнены подходы к определению прочности льда в его естественном состоянии с помощью технологии скважинного зонд-индентора. Изучены динамические явления, связанные с воздействием торосов и айсбергов на морское дно. Методы и результаты используются для практического приложения в задачах динамического воздействия льдов на морские сооружения, дно и берега.*

*Ключевые слова:* арктические и замерзающие моря, методы измерений, морфометрия, прочность и динамика ледяных образований.

### ВВЕДЕНИЕ

При освоении нефтегазовых месторождений на шельфе российских замерзающих морей учитываются свойства и динамика ровного льда, торосов, стамух и айсбергов. Для определения нормативных значений ледовых нагрузок на инженерные сооружения используются результаты натурных исследований морфометрических и физико-механических характеристик ледяных образований. Основными исходными данными для расчетов являются распределения параметров толщин ровного льда, консолидированного слоя торосов и прочности льда. Такие данные получаются в результате статистической обработки результатов как традиционных измерений морфометрии льда и образцов льда на прочность, так и крупномасштабных испытаний прочности ровного льда и торосистых образований на всю их толщину. Методы определения ледовых нагрузок основываются на математических моделях, описывающих механику деформирования и разрушения льда и процессы взаимодействия льда с опорами сооружения. Численная реализация расчетов осуществляется детерминистическими и вероятностными методами, учитывающими случайный характер изучаемых параметров. Традиционно инженерный подход к расчету статического давления льда на ледостойкие опоры основывается на формуле Коржавина, где основными параметрами являются толщина и прочность льда, а также ширина опоры [1]. Глобальная пиковая ледовая нагрузка  $F_{D,p}$  описывается уравнением

$$F_{D,p} = k_D \cdot k_S \cdot k_C \cdot R_c \cdot D \cdot h,$$

где  $R_c$  – прочность льда на сжатие, МПа;  $D$  – диаметр опоры, м;  $h$  – расчетная толщина ровного льда, м;  $k_D$  – коэффициент смятия, зависящий от отношения  $D/h$ ;  $k_S$  – коэффициент формы опоры в плане;  $k_C$  – коэффициент плотности контакта льда и поверхности опоры.

Динамический режим обусловлен как воздействием волновых и колебательных процессов в ледяном покрове, так и механизмом прорезания ледяного поля по контакту с ледостойкой опорой. При взаимодействии консолидированных дрейфующих образований (ледяных полей, гряд торосов, айсбергов в дрейфующих льдах) наблюдаются эффекты, подобные эффектам при взаимодействии вертикального сооружения со льдом: прерывистое дробление и прорезание льда (*intermittent ice crushing*), режим совпадения/захвата частот (*frequency lock-in*) и режим хаотических вибраций (*random vibrations*). Анализ натуральных данных указывает на то, что динамическая ледовая сила является типичной особенностью самовозбуждения системы лед–сооружение. Динамический режим взаимодействия вертикальной опоры со льдом вызывает возникновение автоколебаний в этой системе. Данные о длительности и уровне возникающих вибраций опоры и конструкций сооружения используются для анализа условий безопасной эксплуатации оборудования, прогноза вероятности ослабления грунтов основания и, соответственно, потери устойчивости сооружения. Ледовая нагрузка с учетом динамического поведения системы лед–сооружение зависит от коэффициента динамичности конструкции, физико-механических и морфометрических параметров льда и относительной скорости движения льда на контакте с сооружением.

В связи с этим особое внимание уделяется механике разрушения льда и получению новых данных о динамических процессах в морских льдах. Необходимость развития методологии оценки динамической прочности льда рассматривается в документах Международной организации по стандартизации ISO/DIS 19906. Представленные в работе методы и результаты исследований используются для практического приложения по контрактам с различными отечественными и зарубежными компаниями [2, 5, 8, 15, 16, 17, 23].

#### МОРФОМЕТРИЯ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Для получения информации о внутреннем строении ледяных образований обычно используется тепловое бурение, при котором для эффективного и быстрого получения глубоких скважин используется горячая вода. Тепловое водное бурение применялось при исследовании многолетних дрейфующих льдов моря Бофорта и на шельфе о. Сахалин [18, 20, 21]. В ААНИИ в конце 1990-х годов было разработано программное обеспечение для компьютерной регистрации характеристик термобурения, позволяющее точнее описывать внутреннюю структуру торосов и стамух [9, 20]. Скорость бурения зависит от плотности льда и количества пустот внутри ледяных образований, а также от температуры льда и используемой при бурении воды. Запись и последующая обработка этих данных позволяют получать информацию о распределении слоев льда различного типа (твердый, мягкий), о распределении пустот, о высоте паруса и глубине киля, границах льда и грунта (рис. 1).

Установка водяного термобурения использовалась при исследовании торосов и стамух в северной части Каспийского моря, в Байдарацкой губе Карского моря и на шельфе о. Сахалин [6, 7, 18]. В результате были получены новые натурные данные о распределении общей толщины стамух, высоте паруса, глубине киля, о слоях льда различного типа, пустотах, границах консолидированного слоя, глубине внедрения стамух в дно.

*Морфометрические характеристики торосов и стамух.* Торосистые нагромождения образуются в дрейфующих льдах и припае. Размер килей гряд торосов на дрейфующих льдах шельфа российских замерзающих морей находится в диапазоне от 3 до 25 м. Торошение льдов возможно при толщинах 15–30 см, поэтому наиболее интенсивно образование гряд торосов происходит в декабре–январе.

В случае попадания гряды торося на мелководье возможно внедрение киля торося в грунт и формирование нагромождения обломков льда при последующем

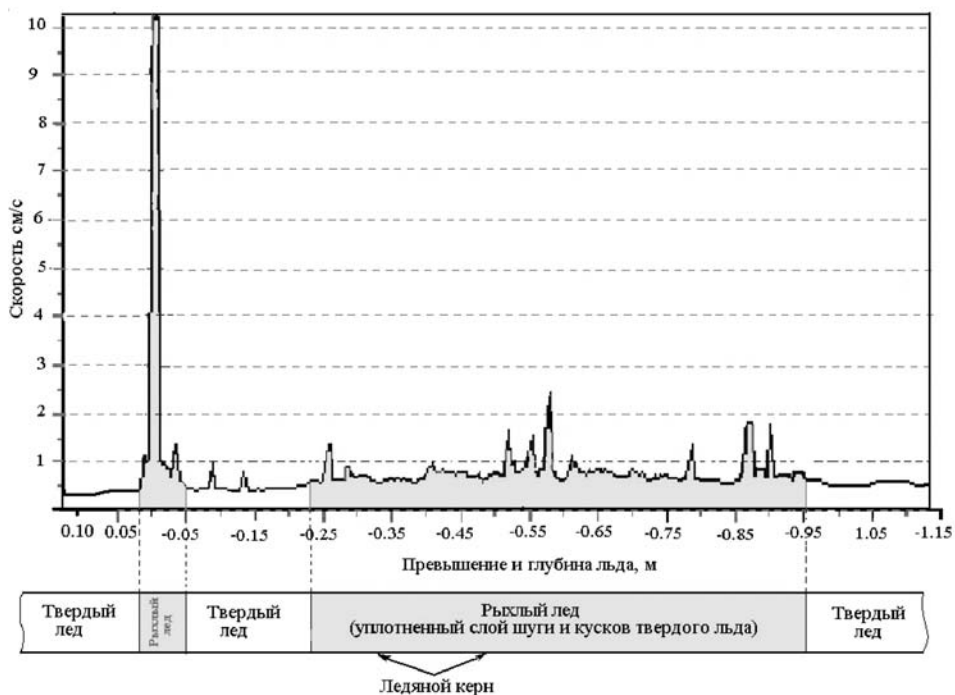


Рис. 1. Сравнительный анализ типов льда на основе данных скорости термобурения и структуры керна льда

напоре льдов на неподвижную гряд торосов. При этом формируется протяженная зона нагромождения обломков льда, связанная с грунтом, так называемая стамуха, площадь которой обычно превышает площадь гряд торосов. Под влиянием значительных колебаний уровня моря (приливных или сгонно-нагонных) может происходить всплытие стамухи и дальнейшая посадка на грунт. Воздействие килей торосов, расположенных в припае, возможно не в течение всего периода их существования, а только в весенне-летний период от разрушения припая до разрушения гряд торосов. Параметры морфометрии гряд торосов и стамух зависят от географических и гидрометеорологических условий их образования (табл. 1). Наиболее протяженные и широкие гряды торосов формируются на восточном шельфе о. Сахалин, что обусловлено адвекцией ледяных полей большой толщины из северной части Охотского моря и активной динамикой льдов в результате частых штормов и интенсивных приливов. Формирование гряд торосов в этом регионе обычно происходит при сжатии больших ледяных полей толщиной 0,5–1,0 м, между которыми находится молодой лед, при таких условиях образуются максимальные значения вертикальных размеров гряд торосов (до 20–25 м). Во всех районах зафиксирована преобладающая асимметрия торосов, т.е. максимальное значение киля смещено относительно максимального значения паруса. Обобщение новых натуральных данных позволяет построить уточненную геометрическую модель тороса, что необходимо для использования в различных математических моделях дрейфа льда и его воздействия на дно и берега.

В южной части Карского моря гряды торосов образуются преимущественно при нажимном дрейфе льдов на припай. При этом торосообразование обычно происходит при взаимодействии ледяных полей толщиной 0,5–0,7 м, а неустой-

Таблица 1

**Преобладающие морфометрические характеристики гряд торосов и стамух в шельфовых зонах Каспийского, Охотского и Карского морей**

Характеристика	Северо-западная часть Каспийского моря	Восточный шельф о. Сахалин	Южная часть Карского моря
Гряды торосов			
Ширина гряды, м	15–20	70–90	60–80
Высота паруса, м	1,0–2,0	2,0–3,0	2,0–3,0
Глубина киля, м	3,0–4,0	12,0–14,0	10,0–12,0
Толщина блоков, м	0,15–0,3	0,3–0,7	0,2–0,5
Стамухи			
Ширина гряды, м	40–60	100–150	100–120
Высота паруса, м	3,0–5,0	8,0–10,0	8,0–9,0
Глубина киля, м	3,0–5,0	13,0–15,0	8,0–10,0
Толщина блоков, м	0,15–0,3	0,3–0,7	0,3–0,7

чивые по направлению ветры над акваторией не могут создать значительных динамических эффектов. Поэтому в целом горизонтальные и вертикальные размеры ледяных образований в южной части Карского моря меньше, чем в Охотском море. На Северном Каспии преобладают молодые тонкие льды, поэтому повсеместно наблюдаются наслоенные льды, а гряды торосов отмечаются значительно реже при формировании более толстого льда. Преобладание малых глубин (менее 10 м) в северо-западной части Каспийского моря обуславливает благоприятные условия для формирования стамух, которые образуются путем нагромождения больших масс небольших ледяных блоков. Причем важной особенностью стамух в этом регионе являются небольшие значения их подводных частей (килей), ограниченных малыми глубинами, и большие значения высот надводных частей (парусов), достигающих 10–15 м. В исследованных районах плотность вероятности высоты паруса и глубины килей подчиняется логнормальному закону распределения (рис. 2) с различными статистическими параметрами [6, 8].

*Внутренняя структура ледяных образований.* При расчетах ледовых нагрузок необходимым параметром является толщина консолидированного слоя торосистого образования. Определение толщины консолидированного слоя решается в настоящее время последовательно в два этапа с помощью формального алгоритма и с использованием экспертной коррекции. При этом экспертная оценка границ консолидированного слоя осуществляется в соответствии со следующими основными принципами [6]:

- консолидированный слой не должен содержать пустот;
- консолидированный слой не должен содержать толстых слоев мягкого льда, это связано с тем, что, как показывают результаты кернового бурения, мягкий лед представляет собой кристаллическую структуру с большим количеством сравнительно крупных микрополостей – трещин, каверн, солевых каналов, воздушных пузырьков и т.д.;
- консолидированный слой не должен содержать слоев мягкого льда выше уровня воды, под которым часто понимается уплотненный снег;
- не должно быть резких (несколько метров) перепадов положения границ консолидированного слоя между соседними точками.

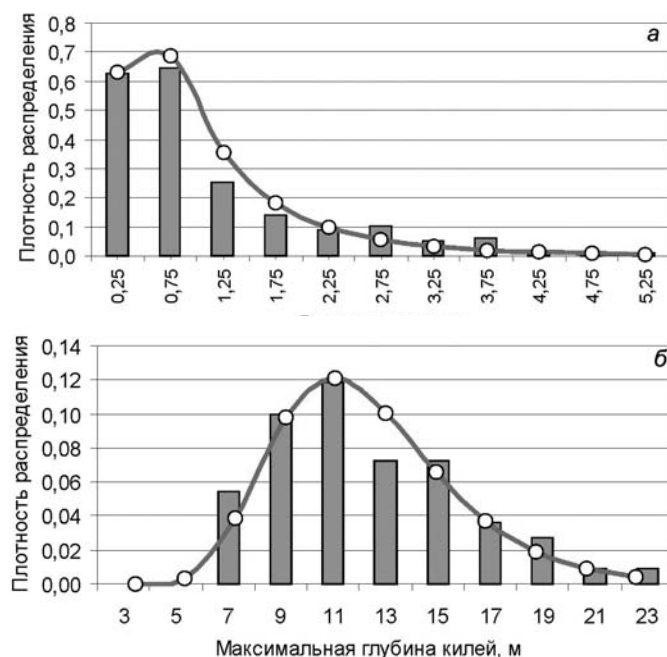


Рис. 2. Плотность распределения высоты паруса (а) и глубины киля (б) торосов (гистограмма – эмпирические значения, кривая – теоретические значения)

Предложенные методические принципы использовались при анализе натуральных данных, полученных при проведении полевых работ в Охотском, Карском и Каспийском морях. В результате выявлены существенные различия в распространении консолидированного слоя. В Охотском и Карском морях консолидированный слой в торосах и стамухах является сплошным и достаточно мощным [18, 19], а в Северном Каспии он представлен отдельными линзами с различной горизонтальной протяженностью и небольшой толщиной [6, 19], что обусловлено частыми оттепелями и менее суровыми зимами.

Важным параметром внутреннего строения ледяного образования является пористость, или коэффициент заполнения. Данные термобурения позволяют с большой точностью определять размеры пустот и, соответственно, пористость как всего ледяного образования, так и отдельно паруса и киля. Размеры полостей и пористость в киях больше, чем в парусах ледяного образования. Характер распределения пустот в торосах и стамухах близок к экспоненциальному закону.

#### ПРОЧНОСТЬ ЛЬДА

Инженерный подход к расчету ледовых нагрузок основывается на традиционных испытаниях прочности образцов льда. Однако масштабный эффект не позволяет однозначно судить о реальной прочности льда и ледяных образований. Существующие нормативные документы не учитывают в полной мере особенности воздействия льда на сооружение. В связи с этим постоянно совершенствуются как технология крупномасштабного испытания прочности льда, так и методы расчета ледовых нагрузок на сооружения. Значительные успехи достигнуты в изучении характеристик прочности торосистых образований при крупномасштабных испытаниях.

*Крупномасштабные испытания прочности льда.* Крупномасштабные испытания характеристик прочности торосистых образований, проведенные ААНИИ по контракту с компанией Exxon Neftegas Ltd. в 1998 г. на шельфе о. Сахалин, являются значительной вехой в освоении технологии исследования прочности торосов и стамух. Для определения прочности консолидированного слоя и кия торосов проводились испытания на продавливание льда до нескольких метров (Punch Test), на прямой сдвиг (Direct Shear Test) и на разрыв (Pull-up Test) [23]. Природа формирования торосов приводит к стремлению веса надводных и подводных частей тороса к равенству. В результате возникает дискретная пористая среда из ледяных обломков, которые контактируют друг с другом. При несмерзшихся обломках такая непрочная среда характеризуется начальным сцеплением и трением между обломками. Наиболее прочная консолидированная часть обусловлена температурным профилем тороса и структурным строением смерзшихся обломков (рис. 3 цв. вклейки). Обломки нижней части слабо смерзшегося кия, как правило, имеют деформированную окатанную форму. Получение количественных механических оценок такой связно-сыпучей среды может осуществляться расчетными методами механики с использованием данных крупномасштабных испытаний параметров прочности: когезии и угла внутреннего трения.

Обобщенная схема крупномасштабных экспериментов (Punch Test, рис. 4) с продавливанием кия тороса позволяет получать данные по сцеплению и углу внутреннего трения в скоплении обломков льда [2, 23]. Получаемые при этом диаграммы «нагрузка – смещение» отражают процесс разрушения кия тороса на этапах упруго-пластического деформирования, основного разлома и сдвига.

Кроме крупномасштабных экспериментов по разрушению торосов выполнены масштабные измерения напряжений и деформаций в ледяных полях при статических и динамических нагрузках, создаваемых искусственным путем. При этом определяются масштабная изгибная прочность и модули упругости ледяных полей [10, 15]. Методика определения глобальной ледовой нагрузки на сооружение под воздействием припайного льда опробована в натуральных условиях [16], технология совершенствуется для проведения будущих исследований.

*Прочность морского льда в объемно-напряженных условиях.* Испытания прочности образцов льда даже с учетом масштабного эффекта не в полной мере учитывают реальное поведение ледовых образований при разрушении, т.е. не отражают прочности льда в естественном состоянии. Описываемая технология определения прочности льда на сжатие основана на измерении разрушающих напряжений во льду при объемно-напряженном состоянии, т.е. при ограничении возникающих деформаций в некотором объеме льда в естественных условиях. Методика таких испытаний применялась канадскими специалистами на сахалинском шельфе в 1998 г. (borehole jack tests). Результаты испытаний являются альтернативой традиционным определениям характеристик прочности образцов льда при одноосном сжатии. В дальнейшем в лаборатории физики льда ААНИИ было разработано устройство «скважинный зонд-индентор». Устройство отличается от зарубежного большей мощностью, конструктивными особенностями и постоянством скорости внедрения индентора в лед. Испытания проводятся в скважине диаметром 250 мм. Локальная прочность определяется на выбранных горизонтах до глубины 5 м. Реакция на силу сопротивления льда деформированию отражается через давление в гидросистеме устройства. Таким образом, прочность льда определяется в стесненных напряженных условиях локального объема льда, поэтому используется термин «локальная прочность льда» [4, 12, 13, 14]. Регистрирующий комплекс состоит из морозоустойчивого компьютера, согласующих устройств и программного обеспечения. Картина механики разрушения и возникновения упругих акустических импульсов при трещинообразовании дополняется данными сейсмометров и датчиков напряжения, устанавливаемых на удалении от скважины в ледяном образовании.

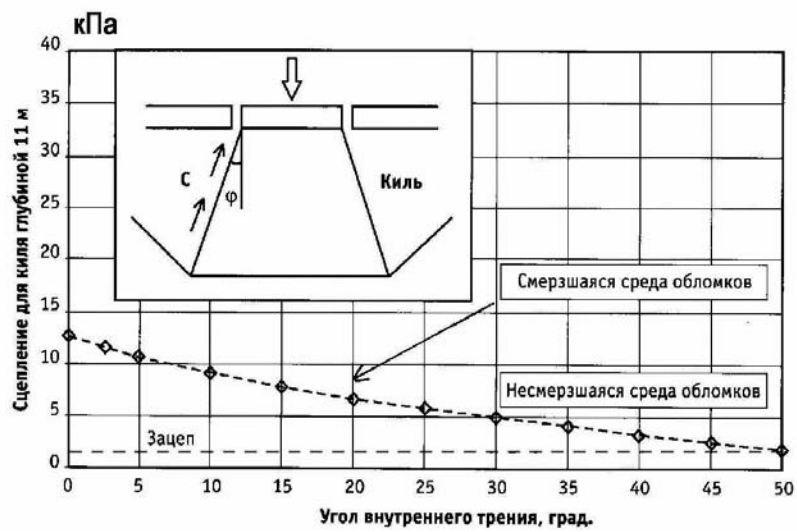


Рис. 4. Схема эксперимента с продавливанием кия тороса и полученные данные по сцеплению и углу внутреннего трения (эксперимент Punch Test)

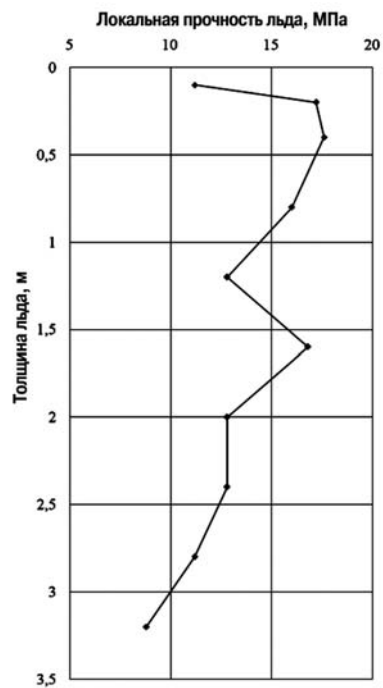


Рис. 5. Примеры вертикального профиля локальной прочности торосистого образования. Сахалинский шельф, март 2006 г.

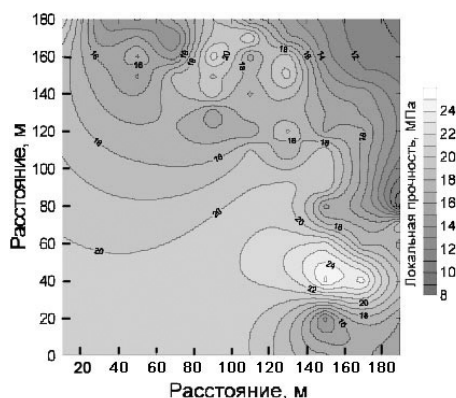


Рис. 6. Карта пространственной неоднородности прочности ледяного поля размером  $180 \times 180$  м; измерения с шагом 20 м на горизонте 0,8 м; максимальные значения локальной прочности 25 МПа; припай Обской губы, 2003 г. [17]

Примеры вертикальных разрезов локальной прочности льда в торосах отражают границы консолидированного слоя (рис. 5). Получены сравнительные данные между локальной прочностью льда и прочностью при одноосном сжатии образцов льда. Предварительная оценка коэффициента сравнения для различных льдов составляет 4,6 [15].

*Новые данные по масштабной прочности ровного льда.* Пространственная неоднородность характеристик прочности ровного льда влияет на формирование ледовой нагрузки, создавая динамические эффекты при прорезании ледяного поля опорой сооружения. При значении коэффициента вариации распределения прочности больше 0,2 влияние неоднородности прочности льда при расчете ледовых нагрузок необходимо учитывать. Технология скважинного зонд-индентора позволяет проводить статистически значимое количество испытаний локальной прочности льда на сжатие. Примером пространственной изменчивости характеристик прочности ледяного поля служат результаты исследования, проведенные на припае Обской губы. Локальная прочность ровного льда отражала неоднородность строения льда на площади размером  $180 \times 180$  м<sup>2</sup> (рис. 6).

На устройства и способы определения прочности льда получены патенты [4, 12, 13, 14]. Применение скважинного зонд-индентора рекомендовано в официальном издании СП «Инженерные изыскания на шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений» [2]. Необходимость развития методологии для оценки прочности льда, основанной на скважинных данных, рассматривается в документах Международной организации по стандартизации ISO/ DIS 19906.

#### ПРОЦЕССЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ДНО И БЕРЕГА

*Динамика торосов и айсбергов.* В районах шельфовых инженерных сооружений технология мониторинга припая позволяет осуществлять контроль его состояния и выявлять предвестники возникновения экстремальных ледовых воздействий на сооружения, берега и дно. Решение задачи выявления максимально возможной глубины пропахивания донного грунта шельфовых морей требует знания механизма процесса пропахивания дна киями торосов и стамух. Прямые инструментальные данные о механизме воздействия льда на морское дно получить трудно. Косвенный метод мониторинга процессов экзарации морского дна торосами, стамухами и айсбергами позволяет определять параметры динамики воздействия ледовых образований на мор-



ское дно и берега. Технология метода основана на физико-механических процессах внедрения льда в грунт. Физическим параметром, позволяющим реализовывать сейсмометрический метод, служат упругие волны, возбуждаемые в среде лед–вода–морское дно при динамике торосов и стамух, выводных ледников и айсбергов. Устанавливаемые на побережье контрольно-измерительные сейсмометрические приборы осуществляют регистрацию сигналов о воздействии льда на дно. Особое внимание уделяется методу обнаружения эпицентров зарождения айсбергов при круглогодичном мониторинге на арктических островах. С помощью приборов, установленных на берегу и на льду, из общего фона колебаний и волн выделяются сигналы, обусловленные процессами взаимодействия льда (ледников, айсбергов) с грунтом и скальными породами. Горизонтальные и вертикальные компоненты упругих волн характеризуют механику силового взаимодействия в системе лед–вода–грунт. Спектральный состав колебаний включает в себя волны с частотами от 0,1 до 10 Гц. По особенностям параметров регистрируемых волн определяется ледовый эпицентр: зона пропахивания дна торосами, место зарождения айсбергов и другие экстремальные явления. Метод опробован в прибрежных районах Охотского моря, в Байдарацкой губе и в Антарктике [15, 22]. На систему мониторинга получен патент [11].

*Навалы льда на берега.* Нагромождения и надвиги льда, объединяемые обычно термином «навалы», – распространенное явление для низких и открытых побережий замерзающих морей. Их образование часто представляет серьезную угрозу для гидротехнических сооружений, расположенных вблизи уреза воды, поэтому задача расчета геометрических параметров навалов и возникающих при этом силовых нагрузок и энергетических затрат является весьма актуальной. Решение этой задачи возможно с помощью математического моделирования. В основу модели, разработанной в ААНИИ [2, 6], положено предположение, что в массиве сплошного квазинеподвижного дрейфующего льда, прижатого к берегу под действием нажимного ветра, происходит своего рода «накопление» сжатия по направлению от мористого края к берегу и, соответственно, максимальное сжатие отмечается именно у берега. В точке контакта льда и берега на сжатый ледяной массив воздействуют сила сжатия (давления) льда, сила реакции грунта (точнее, ее касательная к поверхности склона компонента) и сила тяжести. По мере наползания льда на сушу, генерирующая процесс, уменьшается, а силы сопротивления увеличиваются, что, в конечном счете, должно привести к ослаблению и прекращению процесса. Для того чтобы определить геометрию навала, необходимо сравнить потенциальную энергию сжатия до начала и после завершения процессов подвижки льда в море, торособразования в море, надвигания льда на сушу и формирования собственно навала на суше. Иногда формирование навалов льда происходит при подъеме уровня моря, что оказывает влияние на процесс образования навала. Во-первых, при повышенном уровне моря контакт льда и берега происходит дальше от линии невозмущенного уреза воды, из-за чего нагромождение образуется дальше и выше по склону берега. Во-вторых, повышенный уровень моря облегчает преодоление подошвы припая, которая остается неподвижной даже после взлома припая.

Таким образом, на образование навалов льда влияют следующие факторы: наличие контакта между дрейфующим льдом и берегом, ширина прижатого к берегу ледяного массива, толщина льда, скорость нажимного ветра, высота подъема уровня моря и угол откоса берега.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние годы проведен цикл ледоисследовательских работ по изучению морфометрических и физико-механических свойств ледяных образований на шельфе Карского, Охотского, Каспийского и Азовского морей по заказу ведущих отечественных и зарубежных нефтегазодобывающих компаний.

Разработаны современные технологии по обработке и анализу натуральных данных, расчету экстремальных значений редкой повторяемости. Математические модели формирования навалов льда на берегах и экзарации дна ледяными образованиями адаптированы для различных акваторий.

Выполнены разработки и созданы специализированное оборудование и измерительная техника для исследования ледяных образований (термобуры, скважинные зонд-инденторы, измерители деформаций и напряжений). На устройства и способы определения свойств морского льда получены патенты.

Разработана методика определения масштабных механических характеристик морского льда – карты неоднородности прочности, значения изгибных напряжений и модулей упругости и деформаций ледяных полей.

Разработана методика натурального определения глобальной ледовой нагрузки на сооружение от припайного льда с помощью измерения напряжений во льду.

Разработан способ регистрации упругих сейсмических колебаний морского побережья от процессов экзарации морского дна торосистыми образованиями, при сдвиговых подвижках ледников и при зарождении айсбергов. При соответствующем техническом обеспечении на арктических островах может быть организован круглогодичный мониторинг с целью получения оперативной информации об эпицентрах событий зарождения айсбергов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вершинин А.С., Трусков П.А., Кузмичев К.В.* Воздействие льда на сооружения сахалинского шельфа. М.: Гипростроймост, 2005. 208 с.
2. Инженерные изыскания на шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений: Свод правил СП 11-114-2004, Госстрой России. М.: ПНИИИС по инженерным изысканиям в строительстве, 2004. 88 с.
3. *Клячкин С.В., Гудкович З.М., Дробкин В.В., Воеводин В.А.* Нагромождения и надвиги льда на побережья замерзающих морей и моделирование этих явлений // Ледяные образования морей Западной Арктики. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 248–264.
4. *Ковалев С.М., Никитин В.А., Смирнов В.Н., Шушлебин А.И.* Способ определения физико-механических характеристик ледовых образований в натуральных условиях в скважинах. Патент № 2348018 от 30 июля 2007 г.
5. *Мандель А.Я., Карцев А.Ю., Смирнов В.Н., Шушлебин А.И.* Опыт мониторинга ледовых условий в Обской губе для самоподъемной платформы // Труды 6-й международной конференции РАО'03. Санкт-Петербург, 16–19 сентября 2003 г. СПб.: 2003. С. 184–185.
6. *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 международной конференции РАО'09. Санкт-Петербург 15–18 сентября 2009 г. СПб., 2009. Т.1. С. 280–286.
7. *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 г. СПб., 2009. С. 355–359.
8. *Миронов Е.У., Смирнов В.Н., Никитин В.А., Порубаев В.С.* Основные результаты пятилетних ледовых исследований для обеспечения проектирования объектов обустройства нефтегазовых месторождений в северо-западной части Каспийского моря // Труды 7-й международной конференции РАО'05. 13–15 сентября Санкт-Петербург 2005 г. СПб., 2005. С. 293–298.
9. *Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В.* Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта. Патент № 2153070 от 20 июля 2000 г.
10. *Смирнов В.Н.* Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 162 с.
11. *Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М.* Система для определения времени и координат места образования айсбергов выводных ледников. Патент № 84999 от 25 ноября 2008 г.

12. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Яцкевич А.А. Устройство для измерения характеристик прочности ровного льда и ледовых образований. Патент № 65224 от 20 июля 2007 г.
13. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Никитин В.Н., Ковалев С.М. Способ определения сцепления и угла трения частично разрушенного объема льда с ненарушенным ледяным покровом. Патент № 2365885 от 10 декабря 2007 г.
14. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Яцкевич А.А., Никитин В.А. Устройство для измерения прочности торосов и стамух на всю их толщину. Патент № 73075 от 4 февраля 2008 г.
15. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Никитин В.А., Шейкин И.Б., Шушлебин А.И. Новые технологии изучения механики и динамики морского льда для получения исходных данных для оценки сил ледового воздействия на берега, дно и сооружения // Труды 9-й международной конференции RAO'09. Санкт-Петербург 15–18 сентября 2009 г. СПб., 2009. Т. 2. С. 288–293.
16. Шейкин И.Б., Смирнов В.Н., Шушлебин А.И. Воздействие припая на буровую платформу в Печорской губе: натурные измерения и оценка полномасштабных ледовых нагрузок // Труды 9-й международной конференции RAO'09. Санкт-Петербург 15–18 сентября 2009 г. СПб.: 2009. Т. 2. С. 103–112.
17. 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. P. 147–153.
18. Mironov Ye., Poplin J.P., Wang A.T., Klyachkin S.V., Speransky D.A. Winter 1998 study of ice ridge geometry offshore Sakhalin Island // Proceedings of the 15th International Conference on POAC'99, Helsinki. 1999. Vol. 1. P. 60–69.
19. Mironov Ye.U., Porubayev V.S. Structural peculiarities of ice features on the offshore of the Caspian Sea, the Sea of Okhotsk and the Pechora Sea. // Proceedings of the 18th International Conference on POAC'05, Potsdam, USA, June 26–30, 2005. Vol. 1. P. 670–679.
20. Morev V., Kharitonov V. Definition of the Internal Structure of Large Ice Features by Thermal Drilling Methods // Proceedings of the 16th International Conference on POAC'01, Ottawa, Ontario, Canada. 2001. Vol. 3. P. 1465–1472.
21. Poplin J.P., Ralston T.D., St. Lawrence W. A thermal ice drill for profiling thick multiyear ice // Cold Regions Science and Technology. 1987. Vol. 14. P. 1–11.
22. Smirnov V.N., Korostelev V.G., Shushlebin A.I. Monitoring of the dynamics of fast ice and icebergs. // Proceedings of the 17th International Conference on POAC'03. Trondheim, Norway. 2003. P. 709–713.
23. Smirnov V., Sheikin I., Shushlebin A., Kharitonov V., Croasdale K.R., Metge M., Ritch R., Polomoshnov A., Surkov G., Wang A., Beketsky S., Weaver J.S. Large scale strength measurements of ice ridges; Sakhalin 1998. // Proceedings of International Conference on ICETECH-2000, S.-Petersburg, 2000. P. 512–520.

V.N.SMIRNOV, YE.U.MIRONOV

### INVESTIGATIONS OF STRENGTH, MORPHOMETRY AND DYNAMICS OF ICE IN ENGINEER'S TASKS AT DEVELOPMENT OF SHELF IN FREEZING SEAS

*New and improved methods of study of sea ice properties and definition its physical-mechanical parameters as initial data for evaluation of normative values of ice loads at design of marine engineer structures are considered. Evaluation of morphometry characteristics of ice using thermal drilling devices increased essentially effectiveness of study of internal structure of ridged features. Approaches to definition of the ice strength in its natural state with techniques of borehole jack are performed. Dynamic events connected with an impact of ridges and icebergs onto sea bottom are studied. The obtained data can be used for practical application in the tasks of dynamic effect of ice onto marine structures, bottom and coast.*

*Keywords:* Arctic and freezing seas, measurement methods, morphometry, strength and dynamics of ice features.