

**Наумов Алексей Кирович**

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

Специальность 25.00.28 – океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Государственном учреждении «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Научный руководитель:

Доктор географических наук,  
старший научный сотрудник

Горбунов Юрий Александрович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

Сазонов Кирилл Евгеньевич

Доктор географических наук,  
профессор

Гудкович Залман Маркович

Ведущая организация: Российский Государственный Гидрометеорологический Университет

Защита состоится «11» ноября 2010 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д.327.002.01 при ГУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» по адресу: 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Арктического и антарктического научно-исследовательского института.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат географических наук

В.Ф. Радионов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

В последнее десятилетие высокими темпами идет освоение прибрежных и морских месторождений в Российской Арктике. В настоящее время в отдельных районах Баренцева моря на различных нефтегазоносных структурах проводятся изыскательские и проектные работы.

### **Актуальность темы**

Ледяной покров арктических морей России является важной составляющей природных условий. Без его учета невозможно строительство и безаварийная эксплуатация сооружений и коммуникационных линий на шельфе, рациональное планирование и проведение грузовых и транспортных операций, организация природоохранных мероприятий.

Проектирование сооружений на шельфе арктических морей требует решения проблемы учета ледовых нагрузок на конструкцию. Для расчета ледовых нагрузок необходима информация о морфометрических характеристиках ледяного покрова, физико-механических свойствах льда, о наличии на акватории айсбергов и их обломков. Освоение и обустройство месторождений, расположенных на побережье арктических морей, связано с проблемой вывоза нефтепродуктов. Поскольку наиболее дешевым является вывоз нефтепродуктов морским путем с использованием выносных терминалов, то очевидна необходимость строительства трубопроводов от месторождений, например Варандейского, к береговым резервуарным паркам и далее в море к отгрузочному терминалу. В замерзающих морях главной опасностью для трубопроводов, проложенных по дну моря, являются кили торосистых образований. Они могут создавать как динамические, так и статические нагрузки на подводные трубопроводы и вызывать их повреждения. Динамические нагрузки возникают во время дрейфа всторощенных ледяных полей при воздействии на трубопровод килей торосов, осадка которых соизмерима с глубиной моря. Статические нагрузки возникают в результате формирования стамух непосредственно над трубопроводом.

Таким образом, исследование ледяных образований является необходимым условием проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на шельфе арктических морей. Однако до настоящего времени ледяные образования, включая торосы, стамухи и айсберги, на акватории Баренцева моря были изучены недостаточно полно. В связи с этим представляется актуальным на основании экспедиционного материала, полученного Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ) за последние годы, оценить морфометрические характеристики ледяных образований и их внутреннюю структуру, а также оценить опасность для сооружений на шельфе Баренцева моря, вызванную айсбергами.

### **Цели и задачи**

Основная цель работы состоит в изучении морфометрических характеристик ледяных образований и их внутренней структуры на основе экспедиционных исследований АНИИ в Баренцевом море и модельных расчетов.

Работа направлена на обеспечение освоения нефтегазовых месторождений в Печорском море, где находятся более 20 перспективных структур, и в северо-восточной части Баренцева моря, где расположено гигантское Штокмановское газоконденсатное месторождение (ШГКМ), а также ряд других перспективных месторождений (Адмиралтейское, Пахтусовское и др.).

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- выполнен статистический анализ материалов экспедиционных наблюдений (1996–2007 гг.) за ледяными образованиями и получены распределения морфометрических характеристик;
- исследована внутренняя структура торосистых образований в северо-восточной части Баренцева моря и в Печорском море, выявлены особенности их строения;
- по усовершенствованной модели и результатам натурных исследований выделены районы экзарации дна и получены оценки вероятной глубины борозд в Печорском море;
- выполнены оценки распределения айсбергов в Баренцевом море и проведены модельные расчеты вероятности столкновения айсберга с сооружением для конкретных месторождений.

### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

- впервые на основе материалов экспедиционных наблюдений и расчетов исследованы морфометрические характеристики и внутреннее строение торосов и стамух в Печорском море и в северо-восточной части Баренцева моря;
- впервые на основе расчетов различными способами получены оценки вероятности сближения айсбергов, их обломков и кусков с сооружениями на ШГКМ и на лицензионных участках.

### **Практическая ценность работы**

Результаты выполненной работы могут быть использованы для:

- адекватного описания ледовых условий в районах месторождений с детальным освещением наиболее важных морфометрических свойств ледяных образований;
- выполнения проектных работ при выборе типов сооружений в зависимости от ледовых условий;
- выбора трасс планируемых трубопроводов;
- выбора структуры ледового менеджмента при обслуживании транспортных операций осваиваемых месторождений;
- оценки безопасности эксплуатации шельфовых месторождений.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследований ледяных образований, их внутреннего строения, а также оценки параметров торосов, возможные 1 раз в N лет для двух районов Баренцева моря.
2. Оценки глубины экзарации дна киллями ледяных образований по расчетным и натурным данным в Печорском море.
3. Оценки вероятности столкновения айсберга с сооружением в северо-восточной части Баренцева моря.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации опубликованы в виде статей (порядка 30 наименований) в «Трудах АНИИ», журналах «Проблемы Арктики и Антарктики», «Метеорология и гидрология», «Физика атмосферы и океана», «Материалы гляциологических исследований», «Метеоспектр» и др., а также представлены на российских и международных конференциях:

- Освоение шельфа арктических морей (РАО) в 1995, 1997, 2001, 2003 гг.;
- International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE) в 2004, 2005, 2007 гг.;
- Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC) в 2005 г.;
- International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) в 2006 г.

В виде отдельных разделов результаты исследований вошли в монографию «Ледяные образования морей Западной Арктики» (под редакцией Г.К. Зубакина, СПб., ААНИИ, 2006 г.).

Материалы работы использовались при выполнении более 40 научно-исследовательских тем, в частности при подготовке Локальных технических условий для обустройства Приразломного нефтяного месторождения и ШГКМ.

### **Структура и объем работы**

Настоящая диссертационная работа состоит из Введения, шести глав, Заключение, Списка используемых литературных источников. Общий объем работы составляет 175 страниц, включая 65 рисунков и 20 таблиц. Список литературных источников – 115 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обоснована актуальность выбранной темы, излагаются цели и задачи диссертационной работы, показана научная новизна и практическая значимость. Дается краткое описание структуры работы.

**Первая глава** состоит из двух подразделов. В первом подразделе дается краткое описание физико-географических условий двух исследуемых районов Баренцева моря. В настоящей работе рассмотрены северо-восточный район Баренцева моря и Печорское море – акватории, в которых проводились экспедиционные исследования ААНИИ в последние годы. Печорским морем принято называть акваторию в юго-восточной части Баренцева моря, расположенную между о. Колгуев с запада, арх. Новая Земля с севера, о. Вайгач с востока и материком с юга в диапазоне от 68° до 71° с.ш. и от 49° до 61° в.д. Северо-восточный район Баренцева моря с юга ограничен широтой 72° с.ш., с севера – арх. Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), с востока – арх. Новая Земля. Западная граница района проходит по меридиану 40° в.д.

Во втором подразделе первой главы приводится обзор исследований по морфометрии ледяных образований, выполненных в различное время, как в нашей стране, так и за рубежом.

Исследование морфометрии ледяных образований имеет большую историю. Еще в 1899 г. во время плавания на л/к «Ермак» адмиралом С.О. Макаровым было проведено бурение торосов в Баренцевом море для определения их внутренней структуры и оценки осадки килей торосов. На основе этих измерений С.О. Макаровым была предложена схема полярного тороса. В 1930-х гг. началось производство регулярных авиационных ледовых разведок на акватории Баренцева моря, в дальнейшем в 1970-е гг. стали использоваться инструментальные методы ледовой разведки (Миронов и др., 2001).

Исследования ледяного покрова Баренцева моря активизировались в 1990 гг. Это были работы в основном направленные специально на обеспечение добычи углеводородов на акватории ШГКМ.

Необходимо отметить комплексные экспедиционные исследования, проведенные ААНИИ в 1996–2007 гг. в районах нефтегазоносных структур Баренцева моря. По материалам этих исследований были выполнены (с участием автора) работы, посвященные как характеристикам торосистых образований и айсбергов, так и организации комплексных ледовых исследований, а также подготовлен ряд докладов на различные конференции (Бужин И.В. и др., 2008), (Гудошиков Ю.П. и др., 1997; 1998; 2003; 2004; 2006), (Зубакин Г.К. и др., 2000; 2004; 2005; 2006), (Наумов А.К. 2004; 2006; 2007), (Наумов и Виноградов, 2009), (Наумов и др., 2003), (Naumov A. et al., 2007), (Zubakin et al., 2004; 2005; 2006).

**Вторая глава** также состоит из двух подразделов. В первом описаны используемые в работе материалы.

Для анализа морфометрических характеристик ледяного покрова использованы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований ААНИИ в 1996–1999, 2001, 2003–2007 гг. Экспедиционные работы носили комплексный характер и выполнялись с борта НЭС «Михаил Сомов» (за исключением 1998 и 1999 гг., когда работы производились с береговой базы). Использование бортового вертолета МИ-8 позволяло проводить аэрофотосъемку ледяных образований, выполнять работы с удалением от судна (Зубакин Г.К. и др., 2004 а). В ходе работ с 2001 г. для оценки рельефа нижней поверхности торосистых образований применялся гидролокатор бокового обзора.

Для исследования распределения айсбергов на акватории Баренцева моря использовались данные авиационных разведок и судовых наблюдений, выполненных в период с 1888 по 1991 гг. (Abramov V, 1996), экспедиционных исследований ААНИИ и исследований, выполненных по программам ICEBASE и IDAP.

Во втором подразделе рассмотрены методы исследования морфометрических характеристик ледяных образований, которые можно разделить на прямые (контактные) и дистанционные измерения.

К прямым методам измерения относятся: сквозное бурение ледяного покрова, топографическая съемка, измерение блоков льда, слагающих торос.

В наиболее характерных местах верхней поверхности льда расставляются вешки, обозначающие точки для сквозного бурения. В намеченных точках осуществляется сквозное бурение как участков ровного льда, так и торосистых образований. По результатам бурения определялись толщина ледяных образований от верхней до нижней поверхности, превышение верхней границы ледяного образования над уровнем моря в скважине, расположение и размер пустот и шуги, высота снежного покрова. Последующий анализ построенных разрезов торосистых образований позволял определить распределение пустот и шуги в торосе, а также оценить коэффициенты заполнения надводной и подводной частей торосов. Бурение льда в торосистых образованиях и зонах деформированного льда выполнялось с помощью шнекового мотобура, шнекового электробура и установки термического бурения (Зубакин Г.К. и др., 2004 а).

В задачи топогеодезического обеспечения ледовых изысканий входило: координирование и высотная привязка точек бурения льда на станциях, топографическая съемка ледовых образований. На всех ледовых станциях принималась условная система координат. Система высот выбиралась относительно мгновенного уровня моря.

Дистанционные методы – это аэрофотосъемка (АФС) ледяного покрова, гидролокационная съемка нижней поверхности торосистых образований, фото- и видеосъемка верхней и нижней поверхностей ледяных полей, радиолокационная толщиномерная съемка ледников и айсбергов, получение ледовой информации по снимкам, принятым с искусственных спутников Земли. В результате использования этих видов измерений также были получены материалы, необходимые для исследования (Бородулин В.П. и др., 2004).

Для определения морфометрических характеристик нижней поверхности ледяного покрова был использован гидролокатор кругового обзора (ГКО) «СОНИК-5ПМ», разработанный специалистами ФГУП «ВНИИОкеангеология». Сонограмма, получаемая в результате гидроакустической съемки нижней поверхности ледяного покрова, дает возможность получить светотеневую картину исследуемого объекта.

Для получения данных по топографии нижней границы льда и динамике дрейфующих льдов в двух точках Печорского моря, в районе пос. Варандей и в районе м. Горелка, была осуществлена постановка донных станций. Гидролокатор верхнего обзора был установлен на дне моря для регистрации параметров осадки проходящих над ним льдин. В результате наблюдений (2001–2003 гг.) были получены данные об осадке около 20 тыс. торосов.

Помимо использования гидролокационной съемки для изучения нижней поверхности ледяного покрова были организованы водолазные спуски. Также в исследованиях применялись управляемые подводные телевизионные аппараты «Интершельф-105М» и «Video Ray». Визуальный осмотр нижней поверхности ледяного покрова позволил уточнить информацию о подводной части ледяных образований, полученную с помощью бурения, сонарной съемки и пр., определить степень консолидации килей торосов, формы их составных элементов.

Для изучения торосистых образований полезным является комплексный подход. Комплексная технология была разработана во время проведения ледоисследовательских экспедиций ААНИИ. Суть этой технологии заключается в том, что для исследования ледяного образования используется целый набор имеющихся в распоряжении методов (Зубакин и др., 2004 а).

**В третьей главе** рассматриваются распространение и морфометрические особенности стамух Печорского моря.

*Подраздел 3.1* посвящен распространению стамух в Печорском море. Данные о распространении стамух на акватории Печорского моря получены по материалам ледовой авиаразведки Северного Управления Гидрометеослужбы в 1964–1991 гг. и ААНИИ в 1972–1991 гг. За эти годы на ледовых картах было зафиксировано положение 695 стамух. Кроме того, в некоторых районах учтены результаты аэрофотосъемки, выполненной в 1997–1999, 2001–2003 гг. и визуальные наблюдения с вертолета в районе Приразломного нефтяного месторождения.

Обширным районом формирования стамух являются Печорская и Паханчская губы и прилегающая к ним акватория моря. Стамухи отмечаются и на мелководье в юго-восточной части Печорского моря. По данным гидролокационной съемки дна, можно заключить, что стамухи в указанных районах могут образовываться до глубин порядка 20 м.

В результате оцифровки плановых аэрофотоснимков в районе п. Варандей и к северо-востоку от него было выявлено 138 стамух, оценены их горизонтальные размеры. Большая часть всех обнаруженных стамух (74 %) зафиксирована в прибрежной зоне, где они вытянуты полосой между изобатами 3–5 м. Остальные стамухи дислоцируются в зоне, где глубина, в основном, составляет 5–12 м. Они нередко расположены группами в виде цепочек длиной 500–1000 м (Горбунов и др., 2006 б).

*В подразделе 3.2* описаны морфометрические характеристики исследованных стамух и их внутреннее строение. По результатам топографической съемки на ледовых станциях и фотограмметрической обработки стереоснимков были оценены горизонтальные размеры надводной части и высота стамух.

Средние горизонтальные размеры стамух составили  $32 \times 89.7$  м, максимальные –  $550 \times 1200$  м при высоте паруса 10.3 м. Большинство стамух имело малые размеры: 50 % исследованных стамух имели размеры надводной части, не превышающие  $9 \times 12$  м. Средние горизонтальные размеры изменяются в различные годы незначительно. Четкой зависимости между горизонтальными размерами стамух и глубиной места не наблюдалось, однако стамухи, имеющие большие плановые размеры, располагались, в основном, на глубинах более 12 м.

Распределение высоты паруса стамух может быть описано логнормальным распределением с параметрами масштаба  $m = 7.54$  и формы  $\sigma = 0.34$ . Наибольшая высота зафиксирована в 2003 г., она составила 16 м. Межгодовые изменения средних значений высоты незначительны. Средние высоты стамух по районам отличаются существенно. Наибольшие по высоте стамухи наблюдались в районе о-вов Гуляевские Кошки, что вызвано, по-видимому, большей динамичностью этого района и морфометрическими особенностями дна (наличием многочисленных отмелей).

Важной характеристикой является глубина внедрения стамухи в грунт. Она определялась следующим образом: измерялась глубина моря вокруг стамухи в нескольких точках (до 30), топографической съемкой устанавливалась высота точки бурения над водой, затем по результатам бурения находилась общая толщина льда, из которой вычитались высота точки бурения над уровнем моря и глубина моря в данном месте (интерполированная из точек измерения глубины). Для всех точек бурения, расположенных на стамухе, выбиралось максимальное значение величины проникновения в грунт, которое и считалось глубиной внедрения стамухи в грунт.

Максимальная измеренная глубина внедрения стамухи в грунт составила 1.7 м (стамуха в районе п. Варандей, 2003 г., глубина моря – порядка 8 м), средняя глубина внедрения – порядка 1 м.

По результатам бурения на станциях помимо осадки киля и глубины внедрения киля стамухи в грунт, определялся коэффициент заполнения. Эта величина имеет достаточно большие межгодовые отличия. Есть основания считать, что она зависит от гидрометеорологических условий конкретного года. Средние значения коэффициента изменялись от 0.93 (1998 г.) до 0.7 (2003 г.). Наибольший вертикальный размер пустот, заполненных водой и шугой, достигал 3.0 м, его среднее значение составило 0.5 м.

В некоторых точках бурения вся толща стамухи более чем на 60 % состояла из провалов. Содержание шуги в толще стамухи достигало 43 %. В то же время встречались скважины, вообще не содержащие включений пустот. Наиболее часто это явление отмечалось в 1998 и 1999 гг. на стамухах в районе п. Варандей.

В расположении пустот четкой закономерности не выявлено, хотя можно отметить, что в большинстве случаев они располагались в подводной части стамухи.

Зависимость особенностей внутреннего строения стамухи от района ее образования не выявлена (сравнивались стамухи, исследованные в двух районах – п. Варандей и о-ва Гуляевские Кошки), хотя можно отметить, что в среднем коэффициент заполнения выше у стамух, исследованных в районе п. Варандей. Припай в этом районе образуется несколько раньше, чем в районе о-вов Гуляевские Кошки, и возраст стамух здесь несколько больше.

Есть основания считать, что главными факторами, определяющими строение стамухи, являются ее «возраст» и гидрометеорологические условия конкретного года.

Консолидированная часть стамухи определяется на основе анализа выполненных разрезов, на каждом из которых выделяются области, заполненные воздухом, водой или шугой. За толщину консолидированного слоя обычно принимают вертикальный размер ближайшего к ватерлинии участка плотного льда. Сложность определения размеров консолидированного слоя вызвана достаточно ограниченным количеством точек бурения и большим расстоянием между ними.

В исследуемых стамухах консолидированный слой в точке бурения выделялся с учетом не только рассматриваемой скважины, но и с учетом результатов бурения в соседних скважинах. В тех случаях, когда расположение нижней границы консолидированного слоя в какой-либо точке имело большие отличия от нижней границы в соседних точках, за нижнюю границу принималось ее положение, осредненное по данным соседних точек.

В результате такого подхода выявлено, что средняя толщина участков плотного льда в 1998 и 1999 гг. намного превосходит толщины, обнаруженные в 2001 и 2003 гг.

Длины профилей, на которых проводилось выделение консолидированного слоя, изменялись от 8 до 150 м. По этой причине была рассмотрена относительная протяженность консолидированного слоя – это длина консолидированного слоя, выделенного на профиле, деленная на длину самого профиля. Из полученных данных следует, что с увеличением толщины слоя его относительная протяженность вдоль профиля сильно уменьшается. При анализе данных о внутреннем строении стамухи в каждом ее профиле определялось процентное содержание консолидированного слоя различной толщины. Затем полученные величины усреднялись (рис. 1).

В результате анализа данных было получено, что консолидированный слой толщиной 1.5 м в среднем составляет 70 % длины разреза, слой толщиной 6 м составляет не более 20 % от длины анализируемого профиля. Разницы между относительной протяженностью консолидированного слоя для различных районов исследований не выявлено. Наиболее развитый консолидированный слой наблюдался в 1998 и 1999 гг., что согласуется с результатами оценки коэффициента заполнения стамух.

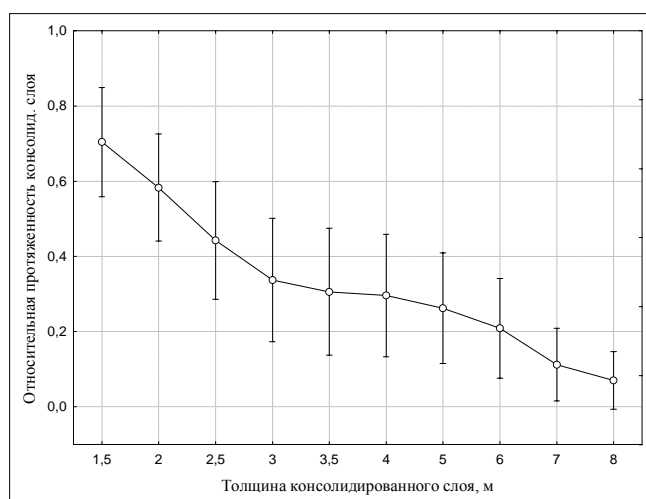


Рис. 1. Относительная протяженность консолидированного слоя стамух

**Четвертая глава** посвящена процессам экзарации дна киями торосистых образований и состоит из двух подразделов.

В первом подразделе рассматриваются характеристики борозд пропашки дна киями торосистых образований по данным экспедиционных наблюдений. Начиная с 1999 г. ежегодно в рамках летних экспедиционных исследований ААНИИ в Печорском море в районе п. Варандей выполнялась подробная гидролокационная съемка с целью определения геометрических характеристик борозд пропашки дна киями торосов и стамух. Данные гидролокационной съемки представляют собой изображение морского дна вдоль галса; ширина охватываемой полосы составляет от 100 до 300 м, в зависимости от глубины места. Оценка геометрических характеристик борозд выполнялась при помощи специализированного программного обеспечения Sonar Navigator, разработанного во ФГУП «ВНИИОкеангеология».

Результаты сонарной съемки указывают на активное динамическое воздействие морских льдов на рельеф дна (борозды, углубления, валы и т.д.) в прибрежной зоне Печорского моря (Гудошников и др., 2006 в).

Наибольшее количество борозд экзарации было зафиксировано на глубинах 10–12 м. Отдельные борозды были обнаружены на глубинах до 18 м.

Большая часть следов экзарации (до 95 %) в проекции на горизонтальную плоскость представляют собой прямые. Коэффициент извилистости остальных борозд отличается от единицы на 10–15 %. В некоторых случаях торосистое образование имеет сложную форму кия («многокилевые» ледяные образования). При динамическом взаимодействии этих объектов с дном образуется система строго параллельных борозд.

Из рассматриваемых параметров борозд экзарации большей изменчивостью обладает длина борозд (85 %), максимальное значение длины борозды составляет 1016 м, относительное рассеяние значений ширины – 58 %. К основным факторам, влияющим на длину пропашки, можно отнести величину и соотношение сил, действующих на льдину, высоту уровня моря, массу льдины, ее геометрические характеристики, величину сопротивления грунта, угол наклона дна. Ширина борозды, в первую очередь, зависит от площади сечения нижней части торосистого образования. Таким образом, количество факторов, влияющих на длину борозды, больше, чем количество факторов, влияющих на ее ширину. Этим и объясняется большая величина изменчивости длины борозд по сравнению с изменчивостью ширины (Нестеров и др., 2003).

Распределение длины и ширины борозд пропашки по данным за 5 лет могут быть аппроксимированы теоретическим логнормальным законом.

Совместное распределение длины и ширины борозд, в силу очень слабой зависимости между собой этих характеристик, можно представить в виде произведения граничных распределений:

$$\Phi(b, l) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot a_b \cdot a_l} \int_0^l \int_0^b \frac{1}{b \cdot l} \exp\left(-\frac{(\ln b - \mu_b)^2}{2 \cdot a_b^2} - \frac{(\ln l - \mu_l)^2}{2 \cdot a_l^2}\right) db dl. \quad (1)$$

Используя функцию двумерного распределения борозд по длине и ширине, можно рассчитать геометрические характеристики борозд различной обеспеченности, в частности 50 % (медиана), 10 % и 1 %.

Кроме ширины и длины борозд в 2002 и 2003 гг. в некоторых случаях удалось определить такой важный параметр как глубина борозды пропашки. Средняя величина глубины пропахивания составила 0.15 м, максимальная зафиксированная глубина – 0.8 м, более 60 % борозд имели глубину 0.1 м.

Можно полагать, что в течение безледного периода, который в среднем длится 4.5 месяца, практически полностью исчезают следы экзарации, и на гидролокационных снимках борозды предыдущего года практически не встречаются. Такую ситуацию следует считать характерной для мелководных прибрежных районов, открытых для волнения.

Во втором подразделе приводятся некоторые результаты оценки максимальной глубины пропашки дна с использованием модифицированной энергетической модели. Оценка максимальной глубины пропахивания дна киллями движущихся ледяных образований является одной из наиболее важных характеристик для определения величины заглубления подводных нефте- и газопроводов. Главными параметрами, которые влияют на глубину проникновения ледяного образования в грунт, являются его масса, скорость движения, ширина килля, прочностные характеристики льда, из которого оно состоит, свойства грунта и угол уклона дна. Для оценки максимальной глубины пропахивания за основу была взята довольно простая энергетическая модель, примененная в свое время для айсбергов (Prasad and Chari, 1986).

Энергетическую модель движущегося ледяного образования можно записать следующим образом:

$$\frac{MV^2}{2} = \frac{MV_0^2}{2} - \int_0^l Pdl + \int_0^l \frac{C_d \rho A |V_0 - V| (V_0 - V)}{2} dl, \quad (2)$$

где  $M$  – масса образования;  $V_0$  – начальная скорость движения;  $V$  – скорость в момент пропахивания;  $A$  – проекция площади подводной части на плоскость по нормали к влекущему течению;  $\rho$  – плотность воды;  $l$  – текущая длина борозды. Первый член правой части уравнения (2) – начальная энергия, второй описывает сопротивление грунта, третий – энергию действия течения.

Второе уравнение модели описывает равенство объемов вытесненного грунта и борозды:

$$\frac{1}{2} lbd = \frac{l_1^2 (tg\alpha + tg\beta)^2}{3l} (l + l_1)^2 ctg\alpha + \frac{l_1^2 (tg\alpha + tg\beta) b}{2}. \quad (3)$$

Сопротивление грунта, согласно (Chari, 1979; Prasad and Chari, 1986), можно записать как:

$$P = \frac{\gamma(h+d)^2}{2} b + 2\tau db + \sqrt{2}\tau d^2, \quad (4)$$

где  $h$  – высота насыпи перед движущимся ледяным образованием;  $d$  – глубина пропашки;  $\gamma$  – удельный вес грунта;  $\tau$  – сопротивление грунта на сдвиг;  $b$  – ширина борозды;  $l$  – длина борозды;  $l_1$  – длина вытесненного грунта;  $\alpha$  – угол наклона вытесненного грунта;  $\beta$  – угол уклона дна. При этом  $d = l tg \beta$  и  $h = l_1 (tg \alpha + tg \beta)$ . Это позволяет переписать уравнения через  $l_1$  и  $l$ .

Следует отметить, что прямоугольная форма килля является идеализированной. Поэтому в дальнейших расчетах нами произведен переход от прямоугольной формы килля к более общей – трапециевидной. Таким образом, в одном предельном случае мы имеем тот же прямоугольник, а в другом – получаем треугольник (Наумов, 2006 а). Переход от прямоугольной формы к трапеции повлек за собой некоторые изменения в уравнении (3) модели:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{3} h^2 l (ctg\alpha + ctg\varphi) + \frac{1}{3} \left[ \frac{l_1 + l}{l} (h (ctg\alpha + ctg\varphi) + d ctg\varphi) + h (ctg\alpha + ctg\varphi) \right] l_1 h + \\ & + \frac{1}{3} l_1 h (b + 2d ctg\varphi) = \frac{1}{3} d^2 l ctg\varphi + \frac{1}{2} bdl; \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\varphi$  – угол наклона при основании трапеции.

Видно, что при  $\varphi = 90^\circ$ , т.е. при прямоугольной форме, получаем уравнение (3). Уравнение (4), а, следовательно, и (2) также подвергаются небольшим изменениям. Уравнение (4) запишется как:

$$P = \frac{\gamma(h+d)^2}{6} \left( b - \frac{2}{3}(d+h) \right) + \tau d (b + d ctg\varphi) + \frac{\sqrt{2}}{3} \tau d^2. \quad (6)$$

Поскольку торосистые образования обычно окружены ледяными полями достаточно большой площади, то представляется необходимым включение в уравнение (2) дополнительного члена – касательного напряжения ветра:

$$F = c_1 \rho_a U^2; \quad c_1 = \frac{\kappa}{\ln(z_h/z_0)}, \quad (7)$$

где  $\kappa$  – постоянная Кармана,  $z_h$  – высота, на которой измерялся ветер (принята равной 10 м),  $z_0$  – параметр шероховатости (в данном случае выбираем равным 0.193 м, учитывая тем самым восторошенность верхней поверхности льдины).

Проводя расчеты для Печорского моря с фактическим ветром и скоростями течений для льдины площадью 1 км<sup>2</sup> на ровном дне получим борозду протяженностью порядка 1360 м. При отсутствии влияния касательного напряжения ветра рассчитанная протяженность борозды составляет порядка 900 м. Таким образом, влияние касательного напряжения ветра весьма значительно и обязательно должно быть учтено при моделировании процессов экзарации. При увеличении площади льдины количество килей, которые могут вступать в контакт с дном, возрастает. Это учитывается при расчете силы сопротивления грунта.

По результатам расчетов максимальная длина борозды, которая образуется киллями ледяных образований, движущихся под действием чисто приливоотливных течений, сравнительно невелика и составляет 200–250 м.

**В пятой главе** рассматриваются характеристики торосов на дрейфующем льду в двух районах Баренцева моря.

В первом подразделе пятой главы рассмотрены геометрические характеристики торосов. Морфометрические характеристики ледяного покрова являются весьма важными параметрами природной среды, которые необходимо учитывать для обеспечения эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений.

Используемый экспедиционный материал показывает, что характеристики парусов торосов Печорского моря и северо-восточной части Баренцева моря в области медианы и в интерквартильной области близки между собой. Различие между районами проявляется в области значений большей обеспеченности. Средние значения характеристик парусов незначительно отличаются от данных по Берингову, Балтийскому морям и по морю Лабрадор.

Линейная зависимость высоты паруса от его плановых характеристик весьма слабая для обоих районов. Зависимость между плановыми характеристиками паруса выражена несколько больше как для Печорского моря, так и для северо-восточной части Баренцева моря.

Геометрические характеристики килей торосов Печорского моря и северо-восточной части Баренцева моря, также как и характеристики паруса, достаточно близки между собой в области медианы. Различия проявляются в области большой обеспеченности. Средние значения характеристик килей не сильно отличаются от данных, полученных для Берингова, Балтийского морей и моря Лабрадор, и значительно отличаются от данных по Арктическому бассейну и морю Бофорта.

Совместный анализ данных бурения и гидролокации о параметрах надводной и подводной частей торосов позволили получить регрессионные зависимости параметров килей от параметров паруса тороса. Согласно имеющимся данным, осадка килей связана в большей степени с высотой паруса, чем с его плановыми характеристиками.

К вертикальным характеристикам тороса, полученным прямыми методами наблюдения, относится также и общая толщина льда в торосе. Распределение общей максимальной толщины льда в торосах описывается логнормальным законом распределения для обоих районов моря.

Имеющиеся данные позволяют установить, что максимальная толщина льда в торосах составляет в среднем 90 % от суммы высоты паруса и осадки килей. Причем это отношение характерно для обоих районов. Также можно сделать вывод, что толщина льда в торосах в среднем в 4 раза больше толщины ровного льда, причем это соотношение справедливо для обоих исследуемых районов Баренцева моря.

Следует отметить, что с данными прямыми измерений и гидролокации в Печорском море хорошо согласуются данные, полученные с помощью донных сонаров. Донные сонары были установлены в районе п. Варандей и м. Горелка. Данные сонаров п. Варандей относятся к периоду 2001–2002 гг., данные м. Горелка – к 2003 г. При обработке материалов, полученных в районе п. Варандей, были измерены кили около 12 000 торосов, в районе м. Горелка – около 8 500.

Данные по осадке килей торосов, полученные с помощью донных сонаров на двух станциях, хорошо совпадают друг с другом. Результаты сканирования нижней поверхности ледяного покрова дают возможность проследить сезонное изменение осадки килей торосов. Анализ показал, что средняя осадка килей достигает максимума в апреле и мае, затем снижается в июне. Наибольшие значения осадки килей также наблюдались в апреле–мае.

Полученные с помощью донных сонаров данные позволили определить плотность торосов на единицу длины профиля. Оценка этой величины осложнялась тем, что на дрейф сильно влияет прилив, и траектория дрейфа является достаточно сложной. Пороговым значением осадки килей торосов для обеих станций было выбрано значение, равное удвоенной толщине ровного льда. Плотность торосов, рассчитанная с использованием данных о дрейфе льда, для апреля–мая изменялась от 6 до 12 и в среднем составила 9.2 тороса на 1 км для района п. Варандей и 10 торосов на 1 км для м. Горелка, что достаточно хорошо совпадает с результатами, полученными при обработке аэрофотосъемки.

После исследования основных геометрических характеристик торосов в двух рассматриваемых районах стала возможной оценка параметров редкой повторяемости. Для этого использовались два подхода: 1 – статистика экстремумов (использование первого предельного распределения), 2 – расчет по распределению.

Экстремальные значения исследовались с помощью первого предельного распределения:

$$F(y) = \exp(-e^{-y}); \quad f(y) = \exp(-y - e^{-y}). \quad (8)$$

Для каждого параметра тороса мы имеем 7 годовых максимумов для Печорского моря и 5 – для северо-восточной части Баренцева моря.

Осадку килей торосов Печорского моря можно оценить также и другим способом. По данным сканирования нижней поверхности ледяного покрова оценивается количество килей торосов, прошедших через точку в районе п. Варандей за весь ледовый период. Кроме того, известно, что осадка килей подчиняется распределению Вейбулла. Исходя из этого, искомую осадку килей можно оценить из уравнения:

$$\int_h^{\infty} f(x) dx = \frac{1}{n}, \quad (9)$$

где  $n$  – количество торосов, проходящих через данную точку за  $N$  лет,  $f(x)$  – плотность распределения (в нашем случае – распределение Вейбулла),  $h$  – искомая осадка килей.

*Второй подраздел* пятой главы посвящен внутреннему строению торосов.

Между внутренним строением торосов Печорского моря и северо-восточной части Баренцева моря существует ряд различий.

В отличие от Печорского моря, где в торосах в основном присутствуют блоки серо-белого и тонкого однолетнего льда, в торосах северо-восточной части Баренцева моря каждый год отмечались блоки однолетнего льда средней толщины, часто блоки толстого однолетнего льда, а иногда и блоки двухлетнего льда.

Отношение ширины к длине блоков для обеих частей моря составляет 0.71. Эта величина очень слабо изменяется от года к году и от района к району. Постоянство данной характеристики, по-видимому, объясняется тем, что подавляющая часть исследованных торосов относилась к одному типу торосения и являлась торосами раздробления. Интересно, что очень близкие отношения были получены при выполнении исследований в Охотском море.

Коэффициенты заполнения торосов и консолидированная часть торосов относятся к характеристикам внутреннего строения. При смерзании обломков льда (которые имеют различную форму и размеры) в «теле» тороса образуется сложная пространственная структура, которая, как можно полагать, имеет случайный характер. Для анализа внутреннего строения обычно используются такие характеристики как: заполнение, коэффициент заполнения, пустотелость и т.д.

Методов непосредственного определения коэффициента заполнения в натуральных условиях не существует. В работе (Грищенко, 1988) рассматриваются некоторые методы определения коэффициента заполнения торосов, приведена зависимость коэффициента заполнения от формы элементов сыпучей (кусковой) среды, т.е. от соотношения длины и толщины обломков льда. Коэффициент заполнения свежих гряд торосов Арктического бассейна, образованных из тонкого однолетнего льда, принят равным 0.75 для надводной части и 0.8 – для подводной. Для старых гряд эти показатели равны 0.75 и 0.90 соответственно. Однако в работе подчеркивается, что такой метод справедлив лишь для сравнительно свежесформированных гряд; для старых торосов коэффициент заполнения должен определяться в каждом случае отдельно.

Оценка коэффициента заполнения торосов в настоящей работе основывалась на результатах сквозного бурения торосистых образований и определении в каждой точке бурения положения и размеров пустот, заполненных воздухом, снегом, водой или шугой. Основным понятием при таком подходе является «линейный коэффициент



заполнения», который определяется как отношение общей длины участков льда без пустот к общей длине скважины. Величина коэффициента заполнения торосов изменялась от 38 % до 98 % в Печорском море и от 60 % до 98 % – в северо-восточной части Баренцева моря.

Максимум заполнения торосов наблюдался в 2003 г. в северо-восточной части Баренцева моря. Это объясняется наличием торосов, содержащих обломки двухлетнего льда, и старых торосов, образованных, скорее всего, севернее района исследования в Баренцевом и Карском морях. По имеющимся данным заполнение торосов в северо-восточной части Баренцева моря выше, чем в Печорском море, при этом содержание пустот практически одинаково. Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициент заполнения торосов северо-восточной части Баренцева моря больше за счет меньшего содержания шуги. Иными словами, вероятность наличия значительных слоев шуги в киле тороса в Печорском море выше, чем в северо-восточной части Баренцева моря, что подтверждается полученными распределениями. Коэффициенты заполнения в исследованных районах близки к аналогичным коэффициентам для торосов морей Бофорта, Лабрадор и Берингова (*Burden and Timco, 1995*) и несколько больше, чем коэффициенты заполнения для торосов Балтийского моря (*Keinonen, 1977*).

Межгодовые изменения коэффициента заполнения можно отметить, в основном, для Печорского моря.

Межгодовые изменения относительного содержания пустот незначительны в Печорском море и значимы в северо-восточной части Баренцева моря. В отличие от содержания пустот, заполненных воздухом или водой, межгодовые изменения относительного содержания шуги в толще торосов в Печорском море весьма значительны и малы в северо-восточной части Баренцева моря.

Максимальное содержание пустот достигало в Печорском море 0.18 (18 % от толщи тороса), в северо-восточной части Баренцева моря – 0.29 (29 %). Максимальное содержание шуги в толще тороса, по данным наблюдений, в Печорском море достигало 0.55 (55 % от общей толщи тороса), в северо-восточной части Баренцева моря – 0.23 (23 %).

Анализ распределения пустот, заполненных воздухом или водой, и шуги в торосе напрямую связан с понятием консолидированной части, которая формируется в результате воздействия отрицательных температур в районе ватерлинии тороса. Образующийся здесь лед связывает обломки, слагающие торос, между собой.

В настоящее время нет единой общепризнанной методики определения размеров консолидированной части. В настоящей работе выделение консолидированной части тороса было сделано на основе анализа построенных по данным сквозного бурения разрезов, на которых выделены области пустот и шуги. Консолидированный слой выделялся следующим образом. Для рассмотрения были выбраны только те точки сквозного бурения, которые расположены в торосе. Для каждой из выбранных точек выделялся участок льда без включений в районе ватерлинии. В качестве такого участка чаще всего были отмечены следующие варианты:

- участок между провалами: 1 – ближайший к ватерлинии, 2 – следующий за ним (или до нижней поверхности льда);

- участок от верхней границы льда до первого провала.

Необходимо отметить, что указанные случаи не являются единственно возможными. Все зависит от конкретной точки и полученных данных сквозного бурения. Кроме того, для определения консолидированного слоя в точке обязательно надо учитывать данные, полученные в соседних точках.

Таким образом, в процессе совместного анализа построенных разрезов для каждого тороса в отдельности были выделены участки, содержащие слои льда без включения пустот и шуги: данные участки выделялись сначала на отдельных разрезах, а затем по всем разрезам тороса был определен плановый размер и толщина консолидированного слоя. В четырех торосах Печорского моря консолидированный слой выделить не удалось.

Анализ имеющихся данных показал, что, несмотря на достаточную близость средних и экстремальных значений толщины консолидированного слоя в двух исследуемых районах Баренцева моря, их распределения несколько различаются смещением модальных значений.

Зависимость толщины консолидированного слоя от геометрических характеристик тороса прослеживается для высоты паруса и осадки киля, в основном, для северо-восточной части Баренцева моря.

Существенное различие во внутреннем строении торосов Печорского моря и северо-восточной части Баренцева моря заключается в протяженности и расположении консолидированного слоя в торосе. Консолидированный слой торосов в северо-восточной части Баренцева моря более развит, чем у торосов в Печорском море. Более низкие температуры воздуха в северо-восточной части Баренцева моря создают более благоприятные условия для формирования консолидированного слоя.

Необходимо заметить, что в пределах тороса консолидированный слой не является непрерывным, а может состоять из отдельных участков – «ядер» консолидированного льда. На рис. 2 (как пример) в плане показана толщина консолидированного слоя в торосе, в котором можно отчетливо выделить три «ядра».

Количество таких «ядер» в исследованных торосах достигало 5 в Печорском море и 3 в северо-восточной части Баренцева моря. Среднее значение этой характеристики для Печорского моря составляет 2.5 «ядра» в одном торосе и для северо-восточной части Баренцева моря – 1.5.

В Печорском море лишь в 12 % случаях наблюдалось одно консолидированное ядро, в то время как в северо-восточной части Баренцева моря непрерывный консолидированный слой наблюдался в 60 % случаев.

По-видимому, в течение существования тороса при отрицательных температурах отдельные «ядра» консолидированного льда могут «сливаться». Следовательно, количество «ядер» уменьшается, а площадь консолидированного слоя увеличивается.

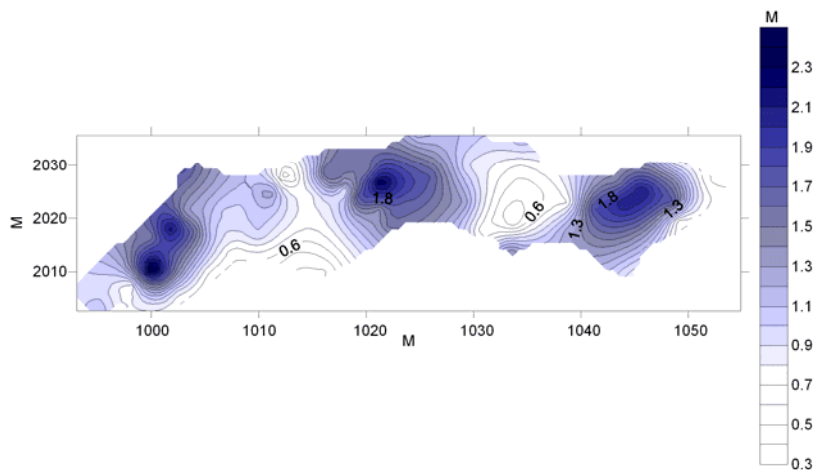


Рис. 2. Толщина консолидированного слоя тороса, содержащего три «ядра» (Печорское море)

Следует упомянуть, что площадь всех исследованных торосов была различной. Проведя нормировку на общую площадь тороса, можно получить распределение толщины консолидированного слоя в зависимости от площади. Согласно проведенным исследованиям, слой толщиной 1–2.5 м в Печорском море составляет 50 % общей площади тороса, тогда как в северо-восточной части Баренцева моря эта величина равна 61 %. Отметим, что в северо-восточной части Баренцева моря наблюдалась консолидированная часть толщиной 5.5 м, имеющая площадь около 12 м<sup>2</sup>.

**Шестая глава** состоит из четырех подразделов и посвящена айсбергам Баренцева моря и оценкам вероятности сближения айсберга с сооружением.

Айсберги являются одним из наиболее опасных элементов природной среды, как для судоходства, так и для функционирования инженерных сооружений и коммуникаций, расположенных в шельфовой зоне арктических и субарктических морей. Потенциальными источниками местных айсбергов в Баренцевом море являются ледники арктических архипелагов: Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, Новая Земля, а также некоторых арктических островов.

*В первом подразделе* рассмотрены формы айсбергов северо-восточной части Баренцева моря.

Регулярные авиаразведки и специальные программы, посвященные исследованию айсбергов (IDAP, ICEBASE), проведенные в период с 1988 по 1992 гг., а также исследования ААНИИ последних лет показали, что в Баренцевом море могут встречаться следующие формы: обломок айсберга, кусок айсберга, столообразный айсберг, пирамидальный айсберг, куполообразный айсберг, разрушающийся айсберг.

Имеющиеся данные показывают, что обломки айсбергов составляют более 70 % от общего числа наблюдений, в которых определялась форма; столообразные айсберги – порядка 15 %; куски – более 4 %; пирамидальные – около 5 % на долю остальных форм приходится 5.4 %.

*Во втором подразделе* приведены морфометрические характеристики надводной части айсбергов северо-восточной части Баренцева моря.

Визуальные наблюдения за айсбергами позволяют оценить размеры их надводной части. Измерения айсбергов с помощью технических средств (например, аэрофотосъемка) позволяют определить значения высоты, длины и ширины надводной части, построить ее трехмерную модель, а также оценить общий объем, массу и осадку айсберга.

Следует особо отметить, что при изучении айсбергов наибольший интерес, как правило, представляют не куски и обломки, а более крупные формы. Кроме того, проведение измерений вблизи айсбергов небольших размеров или непосредственно на их поверхности представляет опасность. При выборе аэрофотоснимков для фотограмметрической обработки определение кусков и обломков затруднительно, особенно если они находятся во восторженном поле (поскольку размеры этих форм айсбергов сравнимы с размерами больших торосов). Поэтому данных о размерах и массах, характерных для кусков айсбергов и их обломков, меньше, чем для других форм.

Согласно результатам наблюдений, в основном, айсберги имеют ширину до 50 м и длину до 100 м, средние плановые размеры составляют 77×52 м. Максимальная зафиксированная длина составила 933 м. Однако, из имеющегося массива наблюдений при обработке было исключено одно наблюдение: 9 сентября 1992 г. в заливе Елены Гульд (юго-восточное побережье Земли Вильчека) был обнаружен айсберг, длина которого по оценкам составляла около 1200 м, ширина – 300–400 м, высота над водой – около 20 м. Этот айсберг был исключен из наблюдений, так как находился на мели, и не было уверенности, что он представляет собой единое целое.

Коэффициент корреляции, определяющий степень линейной зависимости между длиной и шириной айсбергов, достаточно большой и составляет 0.88. Линия регрессии задается уравнением:

$$L = 1.913 \cdot B - 5.03,$$

где  $L$  – длина,  $B$  – ширина айсберга.

В тех случаях когда, данные о плановых размерах айсбергов базируются на материалах аэрофотосъемки, по результатам их фотограмметрической обработки можно построить модели надводных поверхностей и оценить такие характеристики как высота айсберга, объем надводной части и площадь по ватерлинии. В случае, когда выполнено условие гидростатического равновесия, можно оценить объем подводной части, массу айсберга в целом и его осадку.

Согласно имеющимся данным, в 50 % случаев высота надводной части дрейфующего айсберга лежит в пределах от 4 до 13 м, максимальное значение высоты равно 35 м. Распределение высоты айсбергов над водой может быть описано трехпараметрическим распределением Вейбулла.

Максимальная масса среди всех обследованных айсбергов превышала 5 млн. тонн. По оценкам, полученным в 1992 г. (*Liukkonen and Salmela, 1992*) и уточнениям (*Kvambekk, 1992*), масса одного айсберга достигала 8 млн. тонн. Хотя данная оценка весьма приближительна, исключить возможность появления в северо-восточной части Баренцева моря айсбергов с такой массой нельзя.

Более 60 % айсбергов имело площадь по ватерлинии до 10000 м<sup>2</sup>. Согласно имеющимся данным и результатам расчетов, эта величина связана с массой айсберга. Линейная регрессия между ними задается уравнением:

$$M = 0.08S_w - 92.2,$$

где  $M$  – масса айсберга,  $S_w$  – площадь по ватерлинии. Коэффициент корреляции между этими величинами составляет 0.96. Таким образом, оценка массы айсберга с большой точностью может быть получена по известной площади по ватерлинии. Можно также предложить следующие уравнения, полученные для определения массы по известной длине или ширине:

$$M = 0.64L^{1.44} - 209, R^2 = 0.88;$$

$$M = 0.6B^{1.67} - 202.6, R^2 = 0.78;$$

где  $M$ ,  $L$ ,  $B$  – масса, длина и ширина айсберга соответственно.

В третьем подразделе рассматривается осадка айсбергов.

Число измерений параметров подводной части (осадки) значительно меньше числа измерений надводной части, и, как правило, они характеризуют не куски и обломки, а более крупные формы айсбергов. Согласно данным измерений, большая часть айсбергов имела осадку от 40 до 80 м при среднем значении 49 м и максимальном 81 м.

Как уже указывалось выше, оценку объема подводной части дрейфующих айсбергов можно провести по известным параметрам надводной части. Полагая далее, что форма подводной части близка к форме определенных геометрических тел, можно вычислить осадку айсберга. В качестве геометрических тел для описания подводной части айсберга были выбраны: призма, шаровой сегмент, сегмент эллипсоида вращения, конус и эллиптический параболоид. Размеры перечисленных тел определяются объемом подводной части айсберга и размерами его сечения по ватерлинии.

По результатам сравнения натуральных данных с результатами расчетов можно сделать вывод о том, что для столбовидных айсбергов наилучшим является описание подводной части с помощью призмы, а для айсбергов неправильной формы лучше использовать сегмент эллипсоида вращения. Аппроксимация конусом и эллиптическим параболоидом сильно завышает величину осадки (в этих двух случаях максимальная площадь горизонтального сечения находится на ватерлинии), причем аппроксимация конусом завышает осадку почти в три раза.

Согласно расчетам около 50% айсбергов имеют осадку до 50 м. Максимальная расчетная осадка достигает 116 м (столбовидный айсберг с высотой 24 м). Осадку айсбергов, полученная путем расчетов, может быть аппроксимирована распределением Вейбулла.

Рассматривая отдельно осадку обломков и кусков айсбергов и полагая, что их подводная часть описывается сегментом эллипсоида вращения, можно сказать, что она не превышает 22 м при среднем значении 11 м.

Линейная взаимосвязь между высотой надводной части айсберга и его осадкой достаточно значима. Коэффициент корреляции составляет порядка 0.80. Множественная регрессия имеет вид:

$$D = a_1H + a_2B + a_3,$$

$$\text{где: } a_1 = 2.76; a_2 = 0.15; a_3 = 0.04; R^2 = 0.78.$$

Датский Гидравлический Институт рекомендует использовать для нахождения осадки айсберга следующую формулу:  $D = 2H + 90$ . Однако данная формула подходит, по-видимому, для крупных айсбергов моря Баффина и вряд ли может быть использована для айсбергов Баренцева моря.

В четвертом подразделе приведены оценки вероятности сближения айсберга с сооружением.

В северо-восточной части Баренцева моря находятся месторождения углеводородов, которые в самое ближайшее время будут интенсивно осваиваться. В связи с этим необходимо провести оценки безопасности эксплуатации сооружений на шельфе исследуемого района. Оценки были произведены для ШГКМ и для Пахтусовского и Адмиралтейского лицензионных участков. Для оценки вероятности сближения айсберга с платформой использовались три методики.

1. *Метод ячеек.* Разобьем рассматриваемый район на отдельные ячейки с линейным размером  $l_1$ . Значение  $l_1$  выбираем с учетом размеров сооружения и ширины полосы траектории дрейфа. В результате район будет разбит на  $N$  ячеек. Оценив длину траектории дрейфа айсберга в пределах интересующего района, можно определить количество ячеек, которые пройдет айсберг в процессе дрейфа через район ( $n$ ). Предполагая дрейф различных айсбергов независимым один от другого, считаем, что опасное сближение (столкновение) с платформой происходит тогда, когда айсберг и платформа находятся в одной ячейке. В случае если имеется одна платформа, вероятность попадания в нее айсберга может быть определена как:

$$P(n, k) = C_n^k \left( \frac{1}{N} \right)^k \left( 1 - \frac{1}{N} \right)^{n-k}, \quad (10)$$

где  $k$  – количество попаданий в платформу.

Вероятность непопадания, соответственно, можно оценить как:

$$q = \left( 1 - \frac{1}{N} \right)^n. \quad (11)$$

Это, очевидно, следует из (10) при  $k = 0$ .

Таким образом, для одного айсберга и одной платформы вероятность столкновения можно оценить как  $1 - q$ .

Для нахождения вероятности столкновения айсберга с платформой в течение периода  $T$  лет, будем считать столкновение произошедшим, если его вероятность превышает 0.99 (т.к. в данной постановке вероятность, равная 1, на конечном интервале  $T$  недостижима).

Из данных по фиксации айсбергов можно определить количество айсбергов, возможное 1 раз в  $T$  лет. Зная число айсбергов, возможное 1 раз в  $T$  лет, оценивается количество айсбергов ( $M_s$ ), побывавших в данном районе за рассматриваемый период.

Период лет, за который произойдет столкновение с платформой (с вероятностью 0.99) можно найти из условия:

$$q^{M_s} = 0.01. \quad (12)$$

Левая часть уравнения представляет собой вероятность избежать события столкновения и, очевидно, стремится к нулю при стремлении  $M_s$  к бесконечности, что равносильно бесконечному интервалу времени  $T$ . Разумеется, величина  $M_s$  есть целое число, и это надо учитывать при вычислениях. Таким образом, находим период лет  $T$ , за который вероятность столкновения превышает 0.99.

Необходимо отметить, что данный подход справедлив для большого количества айсбергов и произвольного расположения сооружений внутри рассматриваемой области.

2. *Метод случайных блужданий.* Рассмотрим теперь другой подход к этой проблеме. Возьмем тот же район, только в виде круга радиусом  $R$  км, выбранным таким образом, чтобы круг имел приблизительно площадь расчетной

области из методики 1. В центре круга расположим платформу. Через границы выделенной области будут проникать айсберги.

Предположим, что движение айсбергов представляет собой чисто случайный процесс. Для простоты примем скорость движения айсберга постоянной –  $V$  м/с. Пусть на протяжении  $l$  км айсберг движется в одном направлении, затем случайным образом направление его движения меняется. Дрейф айсберга рассматривается до тех пор, пока он либо не покинет границы района, либо не выполнит определенное количество шагов.

Таким образом, движение айсбергов в районе рассматривается как случайное блуждание, ограниченное во времени, при этом окружность играет роль пропускающего экрана.

Ограничим блуждания айсберга во времени  $N$  днями, и проведем расчеты для очень большого числа айсбергов (порядка  $10^6$ ).

Далее необходимо выбрать критические расстояния  $L_k$  между геометрическим центром сооружения  $(x_0, y_0)$  и центром айсберга  $(x_a, y_a)$ . В процессе расчетов определяем количество айсбергов, сблизившихся с сооружением на расстояние, меньшее заданного критического. Затем определяем относительную частоту таких айсбергов и находим интервал времени, соответствующий данной вероятности.

Необходимо указать, что данный подход не может полностью описать вероятность столкновения айсберга с платформой, т.к. движение айсберга в большой степени является детерминированным и его описание с помощью случайных блужданий не совсем правомерно (хотя есть основания полагать, что суммарное движение большого числа айсбергов в достаточной степени случайно). Данная методика позволяет грубо оценить искомую вероятность.

3. *Использование фрактальной размерности траектории айсберга.* Оценку опасного сближения айсберга с платформой можно также получить, используя фрактальную размерность траектории дрейфа айсберга. Данная методика уже применялась для подобной оценки (*Mathiesen et al, 1992*).

Вероятность столкновения айсберга с объектом, при условии нахождения айсберга в заданном районе, оценивается как:

$$P(L) = (C/k)(L/L_0)^{2-D}, \quad (13)$$

где:  $C$  – константа,  $k$  – количество ячеек области,  $L$  – характерные размеры объекта,  $L_0$  – размер ячейки,  $D$  – фрактальная размерность траектории. Размеры выбираются из тех же соображений, что и в методике 1, приведенной выше.

Фрактальную размерность траекторий дрейфа айсбергов можно определить по данным о дрейфе айсбергов, полученным с помощью буев, или по данным модельных расчетов. В нашем случае использовались данные модельных расчетов.

Таким образом, выбрав величину  $L_0$  и определив  $L$ , мы получаем количество ячеек  $k$ . По траекториям определяем фрактальную размерность  $D$ . Затем, с учетом  $L$ , определяем константу  $C$  и оцениваем вероятность столкновения с объектом  $P(L)$  – вероятность столкновения при условии нахождения айсберга в данном районе, так называемая «локальная вероятность столкновения».

Далее, как и в предыдущей методике, пересчитываем вероятность в период времени  $T$ .

В результате проведенных расчетов для района  $72^{\circ}15' - 74^{\circ}30'$  с.ш.;  $39^{\circ} - 48^{\circ}$  в.д. (ШГКМ) по трем методикам были получены следующие оценки:

1. Событие нахождения айсберга и платформы в одной ячейке размером  $1 \times 1$  км имеет повторяемость 1 раз в 98 лет.
2. Оценка повторяемости сближения между центрами айсберга и сооружения менее чем на 1 км один раз за 91 год.
3. Для сооружения размером  $200 \times 200$  м повторяемость сближения составит 1 раз в 105 лет.

Таким образом, по различным методикам мы имеем период повторяемости интересующего нас события приблизительно 90–100 лет. Как сказано выше, подавляющую часть зафиксированных айсбергов составляют обломки и куски, иными словами (согласно Номенклатуре морских льдов) – айсберги, высота которых над уровнем моря не превышает 5 м, площадь по ватерлинии –  $300 \text{ м}^2$ , масса – 11 тыс. тонн.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что повторяемость столкновения сооружения с более крупным айсбергом (не обломком или куском) составит величину порядка 450–500 лет.

Аналогично можно определить опасность столкновения айсберга с сооружением для Адмиралтейского и Пахтусовского лицензионных участков.

Оценки вероятности столкновения айсберга с сооружением для этих участков дали следующие результаты:

- столкновение с любым айсбергом приблизительно 1 раз в 70–90 лет;
- столкновение сооружения с более крупным айсбергом (не обломком или куском) – 1 раз в 350–400 лет.

### **В Заключение** сформулированы основные результаты и выводы работы

• Исследованы характеристики торосов в Печорском море и в северо-восточной части Баренцева моря. Установлено, что геометрические характеристики торосов в исследованных районах близки между собой. Межгодовая изменчивость геометрических характеристик торосов в двух районах практически не выражена.

• При анализе внутреннего строения торосов установлено, что в торосах Печорского моря, по сравнению с торосами северо-восточной части Баренцева моря, больше вероятность наличия значительных слоев шуги.

• Установлено, что консолидированный слой не является непрерывным, а представлен в виде консолидированных «ядер». Число этих «ядер» в торосах Печорского моря больше, чем в торосах северо-восточной Баренцева моря.

• Межгодовые изменения размеров консолидированной части торосов отчетливо выражены в Печорском море. При большой продолжительности отрицательных значений температуры воздуха в Печорском море могут встречаться торосы с достаточно развитой консолидированной частью.

• Анализ материалов наблюдений борозд ледовой экзарации приводит к следующим выводам: борозды ледовой экзарации обнаруживаются повсеместно в районе формирования стамух; в ориентации борозд преобладает северо-западное и западное направление; максимальная глубина пропахивания достигается, по-видимому, при продавливании грунта после «остановки» стамухи.

• В результате проведения вероятностных расчетов оценена вероятность столкновения айсбергов с платформой на ШГКМ, а также на Адмиралтейском и Пахтусовском лицензионных участках. Оценена также вероятность столкновения сооружения с более крупным айсбергом (не обломком или куском).

- Оценка айсберговой опасности для отдельных районов Баренцева моря // Тезисы докл. II межд. конф. «Освоение шельфа арктических морей России». СПб.: СПГТУ, 1995. С. 110–111. (Совместно с Г.К. Зубакиным, Ю.П. Гудошниковым).
- Вероятностная модель распределения высоты торосов в Печорском море // Тез. докл. III межд. конф. «Освоение шельфа арктических морей России», 23–26 сентября 1997 г. СПб., 1997. С. 207. (Совместно с Ю.П. Гудошниковым, С.А. Колесовым).
- Статистическое моделирование распределения высот торосов // Метеорология и гидрология. 1998. № 5. С. 80–86. (Совместно с Ю.П. Гудошниковым, С.А. Колесовым).
- Термодинамическая модель океана со льдом: описание и эксперименты // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 1. С. 51–58. (Совместно с И.В. Поляковым, И.Ю. Кулаковым, Н.Е. Дмитриевым, Р.С. Притчардом, Д. Драйвером).
- Оценки экзарации дна ледовыми образованиями по данным экспедиционных исследований // Тез. докл. межд. конф. «Комплексное управление прибрежными зонами и его интеграция с морскими науками», 25–30 сентября 2000 г. СПб., 2000. С. 93. (Совместно с Ю.П. Гудошниковым, Г.К. Зубакиным, А.В. Нестеровым).
- Льды и айсберги в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения // Труды конф. РАО-03, 16–19 сентября 2003 г. СПб., 2003. С. 337–342. (Совместно с Г.К. Зубакиным, Ю.П. Гудошниковым, И.В. Бузиным, А.А. Скутиным).
- Морфометрические характеристики ледяных образований Печорского моря по многолетним экспедиционным данным // Труды РАО-03, 16–19 сентября 2003 г. СПб., 2003. С. 295–299. (Совместно с Ю.П. Гудошниковым, Г.К. Зубакиным).
- Оценка воздействия торосистых образований на дно Печорского моря в связи с проектированием трубопроводов // Труды конф. РАО-03, 16–19 сентября 2003 г. СПб., 2003. С. 186–189. (Совместно с А.В. Нестеровым, Ю.П. Гудошниковым, Г.К. Зубакиным).
- Аэрофотосъемка льдов и айсбергов на перспективных нефтегазоносных структурах Баренцева моря // Труды ААНИИ. 2004. Т. 449. С. 211–228. (Совместно с В.В. Бородулиным, Г.К. Зубакиным, Ю.П. Гудошниковым, Г.В. Забродиным, Е.Н. Кузнецовой).
- Вероятностные оценки распределения гряд торосов в Печорском море, необходимые для планирования транспортных операций // Труды 5-й научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (НО – 2004), 10–12 марта 2004 г. СПб., 2004. Т. 2. С. 141–146. (Совместно с Ю.А. Горбуновым, Ю.П. Гудошниковым, Г.К. Зубакиным, С.М. Лосевым).
- Комплексная оценка воздействия ледовых образований на дно Печорского моря // Технология ТЭК. 2004. № 2 (15). С. 74–81. (Совместно с Ю.П. Гудошниковым, Г.К. Зубакиным, А.В. Нестеровым).
- Особенности строения и свойств торосов в восточной части Баренцева моря по данным экспедиции 2003 г. // Труды ААНИИ. 2004. Т. 449. С. 180–196. (Совместно с Г.К. Зубакиным, Ю.П. Гудошниковым, И.В. Степановым, Н.В. Кубышкиным).
- Распределение айсбергов в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения и оценки столкновения айсберга с платформой // Труды ААНИИ. 2004. Т. 449. С. 140–152.
- Технология сбора и анализа данных о ледяном покрове шельфовых районов Арктических морей // Труды ААНИИ. 2004. Т. 449. С. 196–210. (Совместно с Г.К. Зубакиным, Ю.П. Гудошниковым, Н.Е. Дмитриевым, И.В. Степановым).
- Estimates of ice and iceberg spreading in the Barents Sea // Proceedings of the 14th International Offshore and Port Engineering Conference (ISOPE-2004), May 23–28, 2004. Toulon, France, 2004. P. 863–870. (With G.K. Zubakin, I.V. Buzin).
- Результаты экспедиционных исследований айсбергов в Баренцевом море в 2003 г. // Материалы гляциологических исследований. 2005. Вып. 99. С. 45–49. (Совместно с Г.К. Зубакиным, Ю.П. Гудошниковым, И.В. Бузиным, Н.В. Кубышкиным).
- Icebergs of the Western Sector of the Russian Arctic // Proceedings of the 18th International Conference on Port and Ocean Engineering (POAC'05), June 26–30, 2005. Potsdam, USA, 2005. P. 565–573. (With G.K. Zubakin, E.A. Skutina).
- Peculiarities of the structure and properties of the Ice Ridges in the eastern Barents Sea based on the 2003 expedition data // International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2005. Vol. 15 (1). P. 28–33. (With G.K. Zubakin, Yu.P. Gudoshnikov, I.V. Stepanov, N.V. Kubyshkin).
- Айсберги Баренцева и Карского морей // Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 109–123. (Совместно с Г.К. Зубакиным, Ю.П. Гудошниковым, И.В. Бузиным, А.А. Скутиным, Е.А. Скутиной).
- Морфометрические характеристики стамух по данным прямых измерений и стереосъемки в юго-восточной части Баренцева моря // Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 66–70. (Совместно с Ю.П. Гудошниковым, Г.К. Зубакиным).
- Оценка вероятности столкновения айсберга с платформой // Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 191–196. (Совместно с Н.Е. Дмитриевым).
- Разработка моделей экзарации дна движущимися ледяными образованиями и айсбергами // Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 240–248.
- Результаты исследований экзарации дна ледяными образованиями в юго-восточной части Баренцева моря // Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 150–159. (Совместно с Ю.П. Гудошниковым, Г.К. Зубакиным, А.В. Нестеровым).

Статистические характеристики элементов торосистых образований // Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 88–100. (Совместно с Ю.П. Гудошниковым, Г.К. Зубакиным).

Толщина ровного льда в припае по наблюдениям полярных станций // Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 58–61.

Spreading and Morphometric Peculiarities of Icebergs in the Barents Sea // Proceedings of the 18 IACHR International Symposium on Ice (IAHR-2006), 28 August–1 September, 2006. Sapporo, Japan, 2006. Vol. 2, P. 79–87. (With G.K. Zubakin, E.A. Skutina).

Распространение айсбергов в Баренцевом море и оценка айсберговой опасности для сооружений на шельфе // Метеоспектр. 2007. № 4. С. 146–155.

Determination of the design ice ridge based on data of expedition studies in the northeastern Barents Sea // Proceedings of the 17th International Offshore and Port Engineering Conference (ISOPE-07), June 01–06, 2007. Lisbon, 2007. Vol. 1. P. 735–741. (With Yu. Gudoshnikov, E. Skutina).

Айсберги и ледники Баренцева моря: исследования последних лет. Часть 1. Основные продуцирующие ледники, распространение и морфометрические особенности айсбергов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 66–80. (Совместно с И.В. Бузиным, А.Ф. Глазовским, Ю.П. Гудошниковым, А.И. Даниловым, Н.Е. Дмитриевым, Г.К. Зубакиным, Н.В. Кубышкиным, А.В. Нестеровым, А.А. Скутиным, Е.А. Скутиной, С.И. Шибакиным).

Айсберги и ледники Баренцева моря: исследования последних лет. Часть 2. Дрейф айсбергов по натурным данным и результатам моделирования и вероятностные оценки рисков столкновения айсберга с гидротехническим сооружением // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 81–89. (Совместно с И.В. Бузиным, А.Ф. Глазовским, Ю.П. Гудошниковым, А.И. Даниловым, Н.Е. Дмитриевым, Г.К. Зубакиным, Н.В. Кубышкиным, А.В. Нестеровым, А.А. Скутиным, Е.А. Скутиной, С.И. Шибакиным).

Некоторые результаты аэрофотосъемки фронтальных зон ледников Земли Франца-Иосифа и Новой Земли // Труды ААНИИ. 2009. Т. 450. С. 132–136. (Совместно с В.В. Бородулиным, Г.В. Забродиным).

Сравнение различных методов измерения осадки ледяных образований // Труды ААНИИ. 2009. Т. 450. С. 137–141. (Совместно с Р.А. Виноградовым).