

Исследование динамики и морфометрии ледников и айсбергов и прикладное использование полученных результатов при освоении углеводородных месторождений на континентальном шельфе Российской Арктики*

И.В. Бузин, А.Ф. Глазовский, Р.И. Май, Е.У. Мионов, А.В. Нестеров, А.К. Наумов, Ю.П. Гудошников

Рассматриваются современные методы оценки динамики и продуктивности выводных ледников; приведены оценки айсбергового стока для архипелагов Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, Северная Земля. Описаны методы исследований айсбергов, рассмотрены вопросы их распространения в морях Российской Арктики и влияния на осуществление проектов освоения шельфа. Приведены оценки основных морфометрических параметров айсбергов, показано существующее различие между айсбергами, образовавшимися от ледников Земли Франца-Иосифа/Северной Земли и Новой Земли. Рассмотрен результат моделирования ситуации в ледовый сезон 2002/03 г. в Баренцевом море (вынос большого количества айсбергов в центральную часть моря на акваторию перспективного месторождения углеводородов). Приведен пример расчета айсберговой опасности Карского моря с помощью моделирования генерации айсбергов методом Монте-Карло с последующим численным моделированием их пространственного распределения.

Ключевые слова: ледники, айсберги, арктический шельф, распространение, моделирование.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 05-05-64732, 16-35-00333, 17-55-80107 и 18-0560109).

Введение

Для проектирования гидротехнических сооружений, предназначенных для добычи углеводородов в суровых климатических условиях Арктического шельфа, необходимо сначала определить нормативные значения ледовых нагрузок на эти инженерные сооружения. Поэтому необходимы сбор

и анализ информации о морфометрических характеристиках ледяных образований (торосов и айсбергов), физико-механических свойствах ровного и вострошенного (деформированного) льда, сведений о динамике ледяных полей и айсбергов. Айсберги могут наблюдаться в большинстве районов морей Западной Арктики, и встреча с ними является одной из наиболее серьезных угроз для различных стадий освоения



БУЗИН
Игорь Владимирович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



ГЛАЗОВСКИЙ
Андрей Федорович
Институт географии РАН



МАЙ
Руслан Игоревич
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



МИРОНОВ
Евгений Уарович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



НЕСТЕРОВ
Александр Валерьевич
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



НАУМОВ
Алексей Кирович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



ГУДОШНИКОВ
Юрий Петрович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт

шельфа (сейсмических съемок, разведочного бурения, эксплуатации гидротехнических сооружений).

Для оценки ареала распространения айсбергов, статистического анализа параметров их дрейфа, верификации математических моделей дрейфа необходимы сведения об айсбергопродуктивности ледников, морфометрических параметрах айсбергов в различных районах, траекториях их перемещений. Некоторые из перечисленных вопросов находятся в центре внимания исследований в рамках проекта РФФИ № 18-05-60109 «Формирование и эволюция опасных ледовых явлений и ледяных образований в Арктике при современных изменениях климата» и ряда специализированных исследований айсберговой тематики, выполненных в последние годы.

Методы исследований, динамика ледников и оценка их айсбергопродуктивности

Больше половины ледников на архипелагах Российской Арктики и Шпицбергена достигают моря и продуцируют айсберги. Интенсивность и объем поступления айсбергов и их размеры непосредственно зависят от сочетания трех групп взаимосвязанных факторов, а именно:

1. скорости движения ледников и их стабильность, сезонные и/или многолетние изменения этих скоростей;
2. положение фронтов ледников в море и их изменения, а также форма поверхности самих ледниковых языков;
3. форма залива/фьорда/подледниковой долины, рельеф их дна и прилегающей акватории.

Следовательно, надежная оценка айсбергопродуктивности ледников определяется полнотой, достоверностью и актуальностью сведений об этих факторах. Добыча таких знаний опирается на развитие современных методов и технологий, позволяющих получать достаточно однородные по качеству массовые данные.

Для определения скоростей движения ледников используют как наземные полевые методы (GPS, замедленная фотосъемка, геодезия и метод псевдопараллакса), повторная дальномерная/лазерная съемка), так и дистанционные космические методы (отслеживание смещения элементов поверхности ледника по разновременным оптическим или радиолокационным изображениям, спутниковая радиолокационная интерферометрия) [1].

Наш опыт показывает, что для массовых измерений скоростей в целом предпочтительнее дистанционные методы, поскольку они не требуют расхода физических ресурсов, рабочий процесс автоматизирован и позволяет оперативно определить скорость движе-

ния ледника в труднодоступных местах. Плотность измерений скорости с их использованием гораздо выше, а это значит, что отображение поля распределения скоростей ближе к реальности. Погодные условия и темное время суток/года препятствуют определению скоростей только по оптическим, но не радарным изображениям.

Для правильной оценки айсберговой продуктивности важно знать скорости движения ледников в их фронтальной части как в холодный, так и в теплый периоды года, так как, по нашим данным, летом они могут быть выше более чем в два раза, особенно возрастая к концу теплого периода. Скорости могут иметь не только сезонный ход, но и в целом более продолжительный многолетний тренд, который требует регулярного мониторинга. Более того, некоторые ледники являются динамически неустойчивыми, то есть иногда они резко ускоряются, что сопровождается подвижкой больших масс льда в море (как, например, в западной части купола Вавилова на Северной Земле (СЗ) или бассейне № 4 на Северо-Восточной Земле Шпицбергена). Такие подвижки практически невозможно заблаговременно предсказать, но можно оперативно отслеживать их зарождение и развитие по космическим изображениям, где они проявляются в возникновении и усилении аномалий поля скоростей, развитии зон трещин и активном продвижении фронта.

При неизменном положении ледникового фронта весь поток льда, поступающий к нему, равен расходу льда в море. Но в настоящее время подавляющее число ледников на архипелагах Арктики отстывает. Поэтому, вследствие сокращения площади ледников в их фронтальных частях, происходят дополнительные потери льда в море, которые составляют, по нашим оценкам, от 30% до 70% от общих потерь льда в море, тем самым являясь важным компонентом в формировании айсбергового стока. Поэтому, чтобы правильно оцени-

вать реальные объемы айсбергообразования, необходимо с помощью космических изображений следить за сезонными и многолетними изменениями положения фронта ледников, заканчивающихся в море.

Сведения о форме поверхности ледников важны в двух отношениях. Во-первых, для крутопадающих сильно трещиноватых ледников характерно образование большого количества мелких айсбергов и айсблоков, тогда как пологие плоские и широкие ледниковые лопасти обычно производят самые крупные айсберги, примером чему служит ледник Знаменитый на Земле Франца-Иосифа (ЗФИ). Крайним предельным случаем являются плавучие языки и шельфовые ледники, которые, обламываясь, производят айсберги особо крупных размеров. Новейшим примером этому служит обширное разрушение шельфового ледника Матусевича на Северной Земле в конце первой декады августа 2020 г., приведшее к образованию айсберга объемом около 0.4 км^3 (площадью более 10 км^2 и толщиной не менее 40 м). Во-вторых, сведения о высоте поверхности ледников, дополненные сведениями об их толщине, необходимы для оценки глубины ложа ледников относительно уровня моря.

Для расчета объемов льда, сбрасываемого ледником в море, надо знать, кроме скорости потока льда во фронтальной части, площадь его сечения на поперечном створе у фронта, то есть необходимы сведения о толщине льда. В самом первом приближении эту толщину можно косвенно оценить, если есть данные батиметрии перед фронтом. Кроме того, есть модельные способы расчета этой толщины по данным о топографии поверхности ледника, которые сейчас обеспечиваются современными цифровыми моделями рельефа (ЦМР) высокого разрешения (наподобие ArcticDEM), но дающие зачастую очень грубые оценки. Самым достоверным методом, как показывает наш многолетний опыт, служит воздушное зондирование

ледников с помощью радиолокаторов, работающих на частотах $20\text{--}40 \text{ МГц}$. Эти данные позволяют с высокой точностью оценить не только поперечное сечение ледников во фронтальной части, но и форму ложа ледниковой долины выше по течению. Зная ее форму не только в плане (сужения и расширения), но и по глубине (поднятия и переуглубления), можно прогнозировать на длительный период вариации выброса айсбергов и отступления ледников – с замедлением (на участках сужения и/или поднятия) и ускорением (на участках расширения и/или переуглубления) при их сокращении. По данным о толщине льда и глубине ложа оценивается общий потенциал айсбергообразования ледника в большом временном масштабе; рассчитываются размеры и положение участков ледника, достигших или близких к состоянию гидростатического всплывания; оцениваются максимально возможные при этих условиях размеры айсбергов и их осадка. Так, например, с учетом морфологии ложа ледника Вершинского на Новой Земле нами сделан вывод, что, при сохранении современных темпов отступления его фронта, он в ближайшие 30 лет будут формировать айсберги с осадкой до 100 м ; затем темпы продуцирования несколько снизятся, но при расширении бухты отёла в сторону западной ветви через $60\text{--}75$ лет снова возрастут. При этом вновь увеличится осадка айсбергов, а фронт, продуцирующий их, станет шире.

Средняя скорость айсбергопродуктивности ледников, исследованных нами в течение ряда экспедиций с помощью воздушной радиолокации в российской Арктике, оценивается как:

- $2.05 \text{ км}^3/\text{год}$ на Новой Земле (12 ледников), в том числе $0.51 \text{ км}^3/\text{год}$ на восточном побережье (4 ледника) и $1.54 \text{ км}^3/\text{год}$ на западном побережье (8 ледников);
- $1.66 \text{ км}^3/\text{год}$ на Земле Франца-Иосифа (11 ледников);
- $3.07 \text{ км}^3/\text{год}$ на Северной Земле (8 ледников без учета разрушения шельфового ледника Матусевича).

Отступление ледников приводит к тому, что оно составляет заметную долю в айсбергопродуктивности: 28% на Новой Земле (32% восточное побережье и 26% западное побережье), 27% на Земле Франца-Иосифа и 24% на Северной Земле [2].

Наша оценка годовой айсбергопродуктивности выходных ледников в российской Арктике в объеме около 7 км^3 льда в год является минимальной, потому что в ней использованы только данные прямых радиолокационных измерений толщины льда на 31 леднике. В их число входит менее четверти ледников, продуцирующих айсберги на Новой Земле и Северной Земле, и даже менее – на Земле Франца-Иосифа. Но простое увеличение нашей оценки пропорционально количеству или площади всех ледников, произво-

дящих айсберги, не даст правильной общей оценки. Вклад изученных ледников в сделанную оценку очень неодинаков. Около 60% вычисленных нами потерь обеспечивают всего лишь 6 ледников из 31 изученных. Это ледники №7, 8 (купол Академии Наук) и ледник Исследователей на Северной Земле, ледники Иностранцева и Вершинского на Новой Земле, ледник Знаменитый на Земле Франца-Иосифа (1.04, 0.63, 0.76, 0.71, 0.3, и 0.69 км³/год соответственно).

Методы исследований айсбергов

В настоящее время существуют следующие основные методы исследования айсбергов:

1. *Визуальные наблюдения* с судов и ледоколов – определяются координаты айсберга, их количество, форма, линейные размеры и высота айсбергов. При этом используются как судовые навигационные приборы, так и лазерные дальнометры и тахеометры.

2. *Дистанционное зондирование ледяных образований из космоса* – на основе снимков высокого разрешения оптического диапазона или радиолокационных определяются координаты айсбергов, их количество и линейные размеры. Обнаружение айсбергов с помощью спутниковых радиолокаторов (РЛ) основано на том, что обратный РЛ-сигнал от айсберга, как правило, выше, чем интенсивность обратного рассеивания от водной поверхности и ледяного покрова.

3. *Аэрофотосъемка айсбергов с вертолета или беспилотного летательного аппарата* – дает точное фотографическое изображение с высокой детализацией рельефа верхней (надводной) поверхности айсбергов. Последующая фотограмметрическая обработка изображений позволяет получать данные о линейных размерах и высоте зафиксированных объектов. Метод дает возможность охватить большую площадь исследуемой акватории в сравнительно короткие сроки. Использование аэрофотосъемки позволяет с большой точностью получать трехмерные модели надводной части отснятых объектов.

4. *Определение формы и глубины килей айсбергов с помощью гидролокаторов кругового обзора (или многолучевого эхолота)*. Применение этих комплексов позволяет получать морфометрические характеристики объектов, находящихся в зоне действия акустического поля, создаваемого антенной комплекса. Данные гидролокационной съемки нижней поверхности айсбергов дают возможность определить максимальные значения осадки килей (подводной части айсберга) на всей площади сканирования, а также форму килей айсберга.

5. *Определение характеристик дрейфа айсбергов* – используются автономные радиомаяки различных спутниковых систем (Inmarsat-C, ARGOS,

Iridium, «Гонец»), оснащенные модулем глобальной навигационной системы GPS. Траектория движения ледяного объекта с установленным радиомаяком определяется по результатам измерения координат встроенным приемником GPS (а также на базе эффекта Доплера) с последующей передачей результатов определения местоположения через спутниковую систему.

6. *Измерение температуры льда айсберга с помощью забуриваемых термокос*. Исследования айсбергов [3] показывают, что значения температуры льда в слоях ниже слоя ее сезонных колебаний достаточно точно отражают ход среднегодовых значений температуры в ледниках различных арктических архипелагов, что позволяет со значительной долей уверенности определять, где именно образовался тот или иной айсберг. Знание температуры айсбергового льда позволяет оценить «запас холода» и время существования этого опасного ледяного образования в морских условиях, оно необходимо в современных моделях дрейфа и эволюции айсбергов [4].

Говоря о методах исследований айсбергов, отметим, что комбинация аэрофотосъемки и гидролокационной съемки дает наиболее полную информацию о размерах верхней (надводной) и нижней (подводной) частей айсберга, что позволяет оценить его общий объем и массу. К сожалению, вследствие объективных трудностей одновременного выполнения этих видов работ такие наблюдения редки.

Ареал распространения айсбергов

Распространение айсбергов в морях Российской Арктики неравномерно, и районы, где они наиболее часто встречаются, тяготеют к выводным ледникам айсбергопродуцирующих архипелагов (ЗФИ, Новая Земля, Северная Земля), поэтому с удалением от них повторяемость встречи с айсбергами уменьшается. Плотность распределения айс-

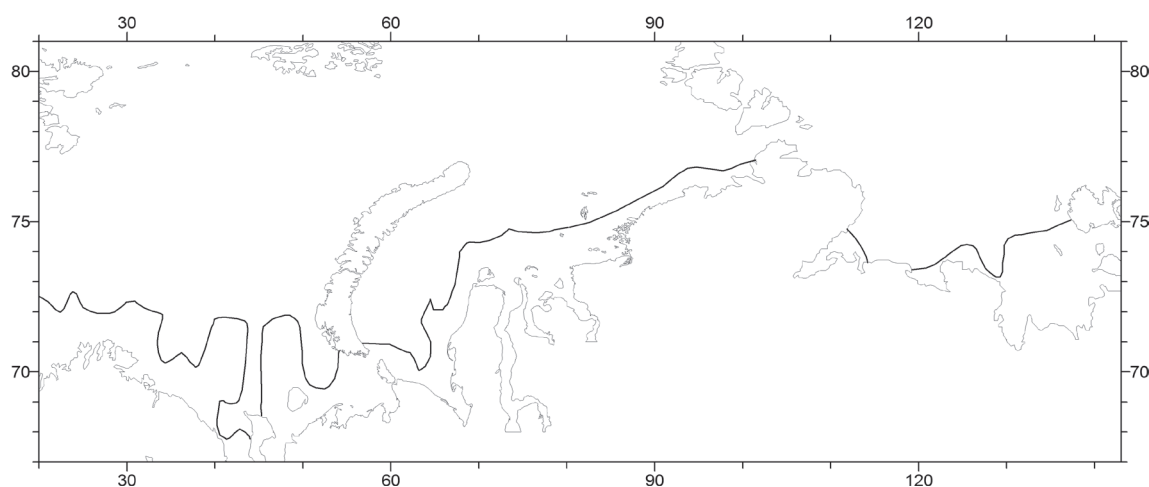


Рис. 1. Южная граница распространения айсбергов в морях Российской Арктики [6].

бергов по акватории арктических морей имеет выраженную сезонную зависимость – зимой айсберги встречаются относительно недалеко от источника их образования, а летом распространяются на акватории моря, свободные ото льда.

Исторические данные о распространении айсбергов в российской Арктике получены в основном на материалах авиационных ледовых разведок с 1928 по 1991 гг. [5], имевших определенную географическую привязку и дискретность, поэтому они не могут дать полностью объективную оценку распространения айсбергов. Тем не менее, учитывая многолетний характер наблюдений, эти данные, дополненные современной информацией, дают общее представление о возможном характере распространения айсбергов и их повторяемости (рис. 1).

Как видно из рис. 1, границы распространения айсбергов ($\geq 1\%$ повторяемость встречи с айсбергом в течение года) простираются далеко на юг от мест их зарождения, достигая местами побережья материка. Для двух морей (Баренцева и Карского) известны задокументированные случаи фиксации айсбергов у материкового берега (побережье Мурмана в 1929 г., Байдарацкая губа в 2006 г.; подробнее см. [7–8]). Таким образом, на большей части акватории российских арктических морей существует ненулевая вероятность встречи с айсбергом (и внештатной ситуацией, вызванной такой встречей).

Айсберги представляют значительную опасность для любых морских операций (проведения геолого-разведочных работ, добычи углеводородов с надводных сооружений). Повреждение или даже разрушение айсбергом стационарной платформы и ее коммуникаций (стоимостью в сотни миллионов долларов) приведет к огромным экономическим убыткам, возможен также значительный урон окружающей среде. В случае использования нестационарной платформы и других плавучих сооружений (FPSO, FPU), способных в критических ситуациях покинуть места своей эксплуатации, ущерб будет определяться прерыванием добычи углеводородов на срок отвода платформы на безопасное расстояние и последующим восстановлением производственного цикла [9].

В мае 2003 г. в центральной части Баренцева моря экспедицией ФГБУ «Арктический и антарктический

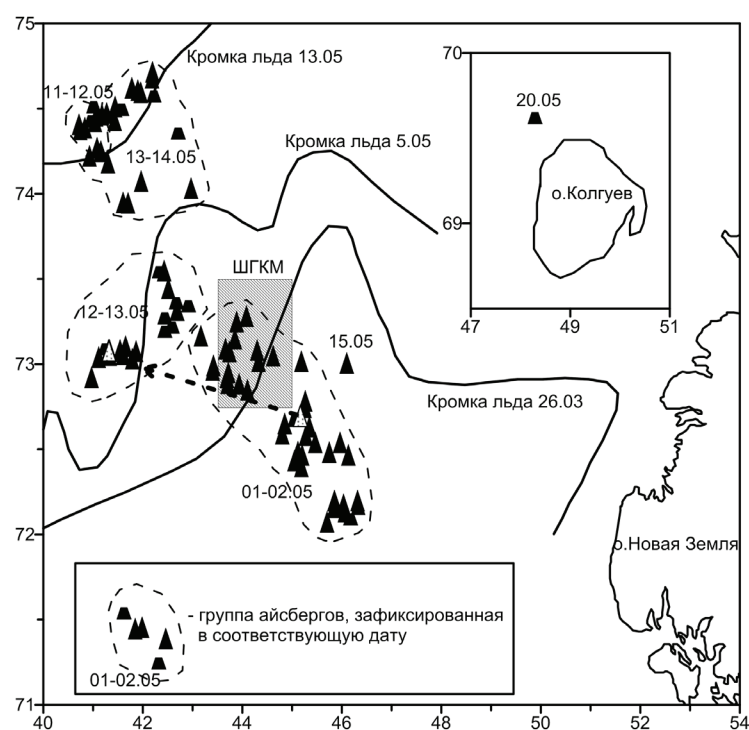


Рис. 2. Местоположение в районе ШГКМ айсбергов, зафиксированных в мае 2003 г. [10].

научно-исследовательский институт» (ААНИИ), проводящей работы по изучению ледового и гидрометеорологического режима акватории планируемого к освоению Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ), было обнаружено большое количество айсбергов [10], что является редким природным явлением (рис. 2).

Проведенное вслед за этим исследование случаев максимального распространения айсбергов в Баренцевом море [9] позволяет предположить, что подобные явления обуславливаются достаточно редкими синоптическими процессами, выражающимися в сильных и долговременных воздушных переносах с северной и северо-восточной составляющими.

«Аномалия 2003 г.» послужила своего рода «спусковым крючком» к изучению айсбергов российской Арктики и их возможного влияния на реализацию шельфовых арктических проектов. Все последовавшие за 2003 г. экспедиции в рамках проекта обустройства ШГКМ имели в программе работ блок изучения айсбергов и ледников, что позволило собрать уникальный для нашей страны материал. Сбор данных о ледниках и айсбергах проводился также в период Международного Полярного Года (2007/08) в рамках выполнявшегося проекта «Образование, динамика и разрушение айсбергов в Западном секторе Российской Арктики» [11]. Программы исследований лицензионных участков Арктического шельфа, разработанные и осуществленные ФГБУ «ААНИИ» в интересах ПАО «Роснефть» в 2012–2019 гг., также имели мощную компоненту, направленную на изучение айсбергов и порождающих их ледников (см., например, [12]).

Можно отметить, что учет данных 2003 г. изменил оценки повторяемости появления айсбергов в районе ШГКМ в три раза [13]. Увеличение вероятности столкновения айсберга с добывающей платформой привело к переработке концепции проекта (TLP/SPAR) в пользу варианта ледостойкого технологического добывающего судна (FPU) [14–15], что серьезно усложнило проект и повлияло на его дальнейшую реализацию.

Морфометрия айсбергов

Между морфометрическими параметрами айсберга и ледником, его породившим, существуют определенные зависимости, впервые описанные Дж. Даудсвеллом на примере ледников архипелага Шпицберген [16]. В наиболее общем виде эти закономерности таковы: самые крупные столообразные айсберги (несколько сотен метров в поперечнике) порождаются шельфовыми ледниками и ледяными куполами (число таких айсбергов, как

правило, невелико). Расположенные во фьордах выводные ледники продуцируют айсберги меньших размеров и зачастую неправильной формы. Активные ледники производят большое количество айсбергов малых размеров и неправильной формы; количество айсбергов от малоактивных ледников меньше, но их размеры могут быть большими, чем от активных. Ледники, подверженные сёрджам, в короткий период фазы сёрджа производят очень большое количество малых айсбергов (менее 50 м в длину) неправильной формы.

Систематизация и обобщения, сделанные Даудсвеллом для ледников Шпицбергена, представляются чрезвычайно важными для понимания морфометрических особенностей образующихся айсбергов и могут быть применимы ко всем источникам айсбергов Евразийской Арктики [9]. Эти обобщения хорошо согласуются с различными описаниями айсбергов, выполненными в разное время у Шпицбергена, ЗФИ и Новой Земли [17–18]. Согласно визуальным наблюдениям, выполненным в 2000–2010 гг., выводные ледники заливов Русская Гавань и Иностранцева (в северной части Новой Земли), имеющие сильную трещиноватость фронта, образуют умеренное количество малых и средних айсбергов неправильной формы. Для ледяных куполов ЗФИ и Северной Земли характерно образование столообразных айсбергов [19–20].

Опубликованные оценки [19–20] дают следующие средние/максимальные размеры длины и ширины айсбергов для северо-восточной части Баренцева моря (архипелаги ЗФИ, Новая Земля) и моря Лаптевых (архипелаг Северная Земля): 140/526 м и 77/210 м (Баренцево море) и 311/616 м и 179/360 м (море Лаптевых), соответственно. По данным экспедиционных наблюдений 2014 г. средняя длина айсбергов у Новой Земли и Северной Земли составляет 49/301 м, а ширина –

Таблица 1. Статистические характеристики длины (м) айсберга, измеренные в экспедициях ААНИИ в 2012–2017 гг. [22].

Статистические параметры		Районы исследований			
		Все районы	Новая Земля	Северная Земля и ЗФИ	
				Нестолообразные	Столообразные
Среднее		121	61	93	205
Среднее квадратическое отклонение		95	36	53	109
Квантиль (с вероятностью P)	$p=0.05$	22	12	30	63
	$p=0.25$	56	34	55	121
	$p=0.50$	90	57	79	177
	$p=0.75$	157	80	120	280
	$p=0.95$	344	118	198	410

30/133 м соответственно [21]. Анализ собранного массива данных аэрофотосъемки айсбергов, выполненной в экспедиционных исследованиях ФГБУ «ААНИИ» в интересах ПАО «НК РОСНЕФТЬ» в 2012–2017 гг., полностью подтверждает описанную выше закономерность [22]. Анализ плановых размеров (длины) айсбергов для выборок из разных районов демонстрирует существенные различия этой характеристики для нестолообразных и столообразных айсбергов Новой Земли, ЗФИ и СЗ (таблица 1).

Как видно из таблицы 1, средняя длина нестолообразных айсбергов района Новой Земли составляет 61 м, что примерно в 1.5 раза меньше айсбергов аналогичной формы для районов ЗФИ и СЗ и более чем в 3.3 раза меньше столообразных айсбергов из этих районов. Эта зависимость выдерживается и для 5% наиболее крупных айсбергов ($p=0.05$) – соотношения составляют примерно 1.7 и 3.5 (то есть 198:118 и 410:118). На основании вышеуказанного можно вполне обоснованно утверждать, что форма и размер айсбергов, порожденных выводными ледниками Новой Земли, коренным образом отличаются от формы и размеров айсбергов, образовавшихся на архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля.

Моделирование режимных характеристик пространственного распределения айсбергов

Моделирование дрейфа айсбергов в Баренцевом море

Обнаружение большого количества айсбергов в центральной части Баренцева моря весной 2003 г. поставило вопрос об их происхождении. Учитывая значительное количество среди них крупных столообразных, местом их образования с большой вероятностью можно считать ЗФИ. Для проверки этого предположения в лаборатории «Арктик-шельф» (ФГБУ «ААНИИ») был проведен модельный эксперимент по расчету дрейфа айсбергов в ледовый сезон 2002/03 г. Использовалась трехмерная гидродинамическая модель [23] с подключенным к ней блоком перемещения айсбергов как автономных объектов без обратной связи. Горизонтальный шаг модели составлял 7.5 миль. При проведении модельных расчетов в качестве формы айсбергов была выбрана призма с эллиптическим основанием. Модельный эксперимент проводился для 10 айсбергов с массой от 9.6 до 8 150.5 тыс. тонн, массы выбирались случайным образом на основе эмпирического распределения масс айсбергов в Баренцевом море [24]. Начальной точкой выброса айсбергов являлась область в окрестностях Земли Вильчека (ЗФИ), ледники которого являются продуцентами крупных столообразных айсбергов, наиболее опасных для планируемых гидротехнических сооружений. Координаты данной точки: 79.72184° с. ш., 53.36120° в. д. Исходя из предпосылки о времени выброса, датированной окончанием летнего периода, за точку начального отсчета выбрано 1 сентября 2002 г. Общая продолжительность расчетов – 8 месяцев (01.09.2002–30.05.2003 гг.). Траектории движения айсбергов по результатам модельных расчетов приведены на рис. 3.

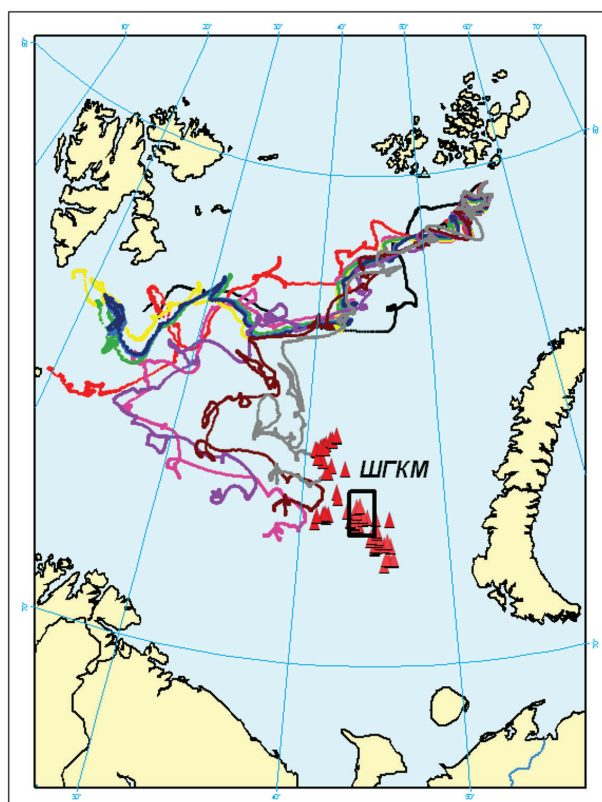


Рис. 3. Траектории движения айсбергов по результатам модельных расчетов за период сентябрь 2002 – май 2003 г. (значками изображено реальное положение айсбергов в мае 2003 г.) [24].

Проведенные модельные расчеты показали, что дрейф крупных айсбергов, образовавшихся от ледников ЗФИ, в сентябре 2002 г. – мае 2003 г. происходил преимущественно в юго-западном и южном направлениях и существовали все предпосылки к проникновению данных объектов в район ШГКМ. Данный пример хорошо демонстрирует применение средств математического моделирования для решения важной практической задачи – оценки возможности проникновения айсбергов на акваторию шельфового месторождения.

Моделирование айсберговой опасности Карского моря

Одна из задач проекта «Формирование и эволюция опасных ледовых явлений и ледяных образований в Арктике при современных изменениях климата» (проект РФФИ № 18-05-60109 «Арктика») заключалась в оценке пространственного распределения айсбергов и оценке вероятности встречи с айсбергами на основе численного моделирования. Для решения этой задачи была создана численная модель генерации, распространения и разрушения айсбергов. В основе модели дрейфа айсберга лежит уравнение (1):

$$M \frac{du}{dt} = F_{A_{\parallel}} + F_{A_{\perp}} + F_W + F_I + F_R + F_L + F_C, \quad (1)$$

где M – масса айсберга, u – скорость дрейфа айсберга, $F_{A_{\parallel}}$ – сила тангенциального воздействия ветра,

$F_{A_{\perp}}$ – сила нормального воздействия ветра, F_W – сила воздействия течений и сопротивление воды, F_I – сила воздействия морского льда, F_R – сила волнового воздействия, F_L – сила, обусловленная наклоном уровня моря, F_C – сила Кориолиса.

Для расчета в модели движения айсберга необходимо знать площадь лобового сопротивления ($S_{A_{\perp}}$) и площадь горизонтального сечения (площадь айсберга по ватерлинии) надводной части айсберга ($S_{A_{\parallel}}$); для силы сопротивления воды – площадь поперечного (вертикального) сечения подводной части айсберга (S_W). Для сил, обусловленных воздействием ледяного покрова и ветрового волнения, площади рассчитываются в зависимости от линейных размеров айсберга и толщины льда (h_I) или высоты волны (h_R) (2):

$$S_I = 0.5 \cdot (L + W) \cdot h_I, \quad (2)$$

$$S_R = 0.5 \cdot (L + W) \cdot h_R,$$

где L – длина айсберга, W – ширина айсберга.

И, наконец, на дрейф айсберга накладываются ограничения в зависимости от глубины моря и осадки айсберга (D). Таким образом, для выполнения прогностического или диагностического расчета дрейфа айсберга необходимо знать массу айсберга (M) и следующие его геометрические параметры: L , W , D , $S_{A_{\perp}}$, $S_{A_{\parallel}}$, S_W .

Специальное исследование по нахождению регрессионных соотношений между параметрами айсбергов описано в работе [22]. Предиктором в этих эмпирических зависимостях служит длина айсберга – параметр, который наиболее просто измерить по обзорным спутниковым снимкам, инструментальным и визуальным судовым или авиационным наблюдениям. Значения коэффициентов регрессионных соотношений, а также оценка качества зависимостей (коэффициент детерминации R^2 и среднеквадратическая ошибка σ_e), выявленных для айсбергов Карского моря, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры регрессионного уравнения $Y=kL^n$, связывающие длину (L) с массой и геометрическими параметрами новоземельских айсбергов Карского моря (по работе [22]).

Параметры уравнения	Параметры айсберга					
	Ширина W	Масса M	Осадка D	Площадь вертикального сечения надводной части $S_{A\perp}$	Площадь по ватерлинии $S_{A\parallel}$	Площадь вертикального сечения подводной части S_W
Степень, n	1	3	1	2	2	2
Регрессионный коэффициент, k	0.6400	$0.1975 \times \rho^*$	0.5200	0.04720	0.3828	0.3652
Коэффициент детерминации, R^2	0.81	0.71	0.37	0.68	0.85	0.76
Среднеквадратическая ошибка, σ_e	11	75480	19	125	5590	1562

*Плотность айсберга.

Так как регрессионные соотношения, представленные в таблице 2, определялись методом наименьших квадратов, то ошибки аппроксимации имеют нормальное распределение. Следовательно, математическим ожиданием будет восстановленное по регрессионному уравнению значение параметра айсберга, а разброс значений параметров относительно среднего будет определяться величиной среднеквадратической ошибки регрессионного уравнения (σ_e). Исходя из этого, в модели реализован расчет геометрических параметров по формуле (3):

$$Y = k \times L^n + U(p) \cdot \sigma_e \cdot \sqrt{L/\bar{L}} \quad (3)$$

где $U(p)$ – квантиль стандартного нормального распределения для вероятности p , вероятность p воспроизводится генератором случайных чисел в диапазоне от 0 до 1, σ_e – среднеквадратическая ошибка регрессионного уравнения, $\bar{L}$ – средняя длина айсберга ($\bar{L}=61$ м [22]). Очевидно, что при длине айсберга, близкой к нулю, среднее и среднеквадратическое отклонение всех параметров айсберга также должны стремиться к нулю. Множитель $\sqrt{L/\bar{L}}$ в уравнении (3) позволяет симитировать отмеченные в [22] изменения разброса параме-

тров айсберга от регрессионного значения в зависимости от длины айсберга. Вероятность p в уравнении (3) определяется для каждого параметра отдельно, что позволяет для айсбергов одинаковой длины получить набор всевозможных комбинаций массы и геометрических параметров. Такой же подход был использован в работе [25] для расчета погрешности модельного расчета траектории движения отдельного айсберга.

Если осадка моделируемого объекта превышает глубину моря в данной точки модели, то скорость айсберга, ортогональная критической изобате, приравнивается к нулю, и дрейф останавливается до тех пор, пока равнодействующая вынуждающих сил не позволит айсбергу переместиться в точку, где его осадка будет меньше глубины. После этого айсберг снова включается в дрейф.

В данной модели используется учет разрушения айсберга под воздействием волновой эрозии и бокового таяния, которые, по оценкам [26], описывают более 75% от возможных потерь объема айсберга. По формулам, приведенным в [26], раз в сутки рассчитывается изменение длины айсберга за счет разрушения. Полученное изменение вычитается из длины айсберга, и по измененному значению длины происходит перерасчет всех параметров по формуле (3).

Описанная модель дрейфа айсбергов реализована на языке программирования в виде отдельных модулей, которые можно подключить к данным любых атмосферных и океанских реанализов или же интегрировать их в различные модели океана. Модель может работать как в прогностическом, так и в диагностическом режиме. Для исследования режимных характеристик дрейфа айсбергов целесообразно использовать доступные данные атмо-

сферного и океанского реанализов. Ветер задавался по данным атмосферного реанализа погоды ERA-5 (<https://www.ecmwf.int>), созданного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды ECMWF. Параметры океана и ледяного покрова брались из реанализа Северного Ледовитого океана TOPAZ (<http://marine.copernicus.eu>), созданного Центром экологического и дистанционного зондирования имени Фритьофа Нансена (NERSC). Так как в данных TOPAZ отсутствуют приливы, в модель добавлен расчет приливных течений и уровня по гармоническим постоянным восьми основных волн прилива, взятых из модели AOTIM-5 [27].

Расчет режимных характеристик дрейфа айсберга проводился следующим образом: в начале модельного расчета для каждой точки генерации айсбергов по известному закону распределения длины айсбергов генератором случайных чисел рассчитывается длина моделируемого айсберга. По полученной длине айсберга при помощи регрессионных соотношений по формуле (3) воссоздаются масса и все геометрические параметры айсберга. Моделируемый айсберг «передвигается» в модели под действием вынуждающих сил либо до тех пор, пока он не выйдет за пределы расчетной области модели, либо пока его длина за счет таяния и волновой эрозии не уменьшится до 16 м и айсберг не перейдет в категорию обломков. При этом для каждого ледника рассчитывается время между отёлами как отношение объема сгенерированного айсберга и продуктивности ледника: $t = \frac{M}{A_p \cdot \rho}$, где A_p – айсберговая продуктивность, выраженная в м³/с. Следующий айсберг в точке ледника появится

после того, как время, отсчитываемое от последней генерации айсберга, превысит значение T . То есть мы пренебрегаем потерями льда у ледника при обрушении айсберга или при формировании кусков или обломков – весь лед, который имеется в леднике, уходит за время T на формирование одного айсберга без погрешностей и потерь.

Так как закон распределения длины айсберга возле каждого ледника неизвестен, то воспользуемся статистической информацией об айсбергах Карского моря и сделаем допущение, что такая же статистическая закономерность характеризует и только что отколовшиеся от ледника айсберги. В работе [22] эмпирическая функция распределения длины новоземельских айсбергов Карского моря была аппроксимирована распределением Вейбулла с параметрами $\lambda=68$ (коэффициент масштаба) и $k=1.76$ (коэффициент формы).

Для расчета режимных характеристик распределения дрейфа созданная модель была реализована в течение четырех лет (2016–2020). В качестве точек генерации были выбраны координаты трех выводных ледников на северо-восточном побережье Новой Земли:

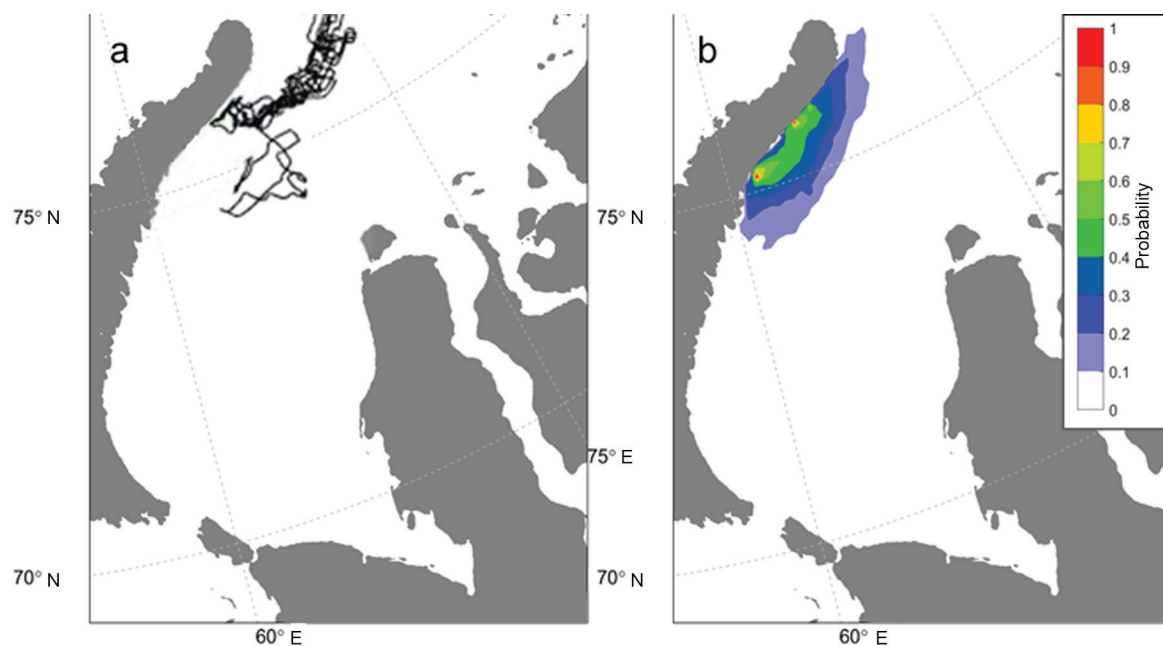


Рис. 4. Примеры модельных расчетов дрейфа айсбергов: а – траектории дрейфа айсбергов, сгенерированных ледником Вершинского с 13.04.2016 по 31.12.2016, б – оценка вероятности встречи с айсбергами, отколовшимися от ледников Розе, Вершинского и Рождественского.

ледники Розе (76.05° с. ш.; 67.00° в. д.), Вершинского (75.72° с. ш.; 65.00° в. д.) и Рождественского (75.77° с. ш.; 65.50° в. д.), для которых известны оценки продуктивности: 0.040, 0.124 и $0.013 \text{ км}^3/\text{год}$, соответственно [28].

В ходе реализации модели происходит запись траектории дрейфа каждого айсберга с часовой дискретностью. На *рис. 4а* приведены примеры траекторий дрейфа айсбергов.

Анализ траекторий и скоростей моделируемого дрейфа показал, что изменчивость скоростей дрейфа преувеличивает над скоростью среднемесячного переноса айсбергов. В этой части акватории Карского моря средний перенос айсбергов происходит преимущественно в северо-восточном направлении. Такие результаты моделирования совпадают с оценками генерального направления дрейфа, сделанными в работе [29].

После выполнения расчета ежечасные координаты сортировались в ячейки сеточной области с пространственным шагом 12.5 км , по этим данным оценивалось суммарное время нахождения айсбергов в каждой ячейке сеточной области. Айсберговая опасность (вероятность встречи с айсбергом) определялась как отношение суммарного времени нахождения айсбергов в каждой ячейке сеточной области модели к общему времени реализации модели. Полученные таким образом оценки вероятности встречи с айсбергом представлены на *рис. 4б*. Максимальные значения вероятности отмечаются в точках двух выводных ледников, ледяной сток которых содержит максимальные значения: ледники Розе (0.98) и Вершинского (0.96). У ледника Рождественского вероятность появления айсберга составила 0.59. Области с высокой вероятностью встречи с айсбергами располагаются вдоль побережья Новой Земли (у самого побережья вероятность превышает 0.4), при этом заметна вытянутость таких областей в направлении на северо-восток, что также свидетельствует о генеральном выносе айсбергов в этом направлении.

На данный момент не для всех ледников известны оценки продуктивности айсбергов, поэтому полученные значения айсберговой опасности представляются несколько заниженными. Отсутствие информации о продуктивности ледников до некоторой степени можно восполнить с помощью метода оценки айсберговой опасности через расчет по модели условной вероятности, предложенного в работе [30]. В этом методе прописывается условие, что в модели в точке генерации всегда присутствует айсберг, то есть если силы выносят айсберг из начальной ячейки, то на его месте помещается новый. При таком расчете в точке ледника условная вероятность встречи айсберга всегда равна единице. С удалением от начальной точки этот показатель уменьшается, а его пространственное распределение обуславливается режимом гидрометеорологических условий. Полученное распределение условной вероятности умножается на вероятность появления айсберга в точке генерации, а затем поля полных вероятностей суммируются. Слабое место этого метода – необходимость оценок вероятности появления айсберга в районе ледника.

Возможно, что комбинация расчетов айсберговой опасности по продуктивности ледников и через условную вероятность позволит нивелировать недостатки обоих методов.

Предложенный алгоритм расчета айсберговой опасности основан на расчете скорости генерации айсбергов и их параметров методом Монте-Карло и последующем численном моделировании дрейфа и разрушения айсбергов. Метод был апробирован для условий юго-западной части Карского моря, но может быть применен для других акваторий.

Выводы:

1. Айсберги представляют значительную опасность для любых морских операций на российском арктическом шельфе и могут серьезно влиять на реализацию проектов по добыче углеводородов здесь. Анализ исторических источников и результаты современных исследований свидетельствуют о том, что айсберги выводных ледников архипелага Новая Земля существенно отличаются формой и размерами от айсбергов архипелагов Земля Франца-Иосифа и Северная Земля, что обуславливается в основном типами существующих там ледников.

2. Для оценки айсбергообразования ледников Новой Земли, Северной Земли и Земли Франца-Иосифа были использованы новые данные о толщине льда и подледном рельефе, полученные в результате воздушных радиолокационных съемок на этих архипелагах. Также для этого привлекались данные об изменениях фронтов этих ледников, полученные нами на основе

космических изображений, и данные о поверхностных скоростях движения ледников, полученные по космическим изображениям и GPS-измерениям. В результате использования этих данных и расчетов, выполненных по приведенной выше схеме, установлено, что фронтальная абляция изученного 31 ледника составляет: $-2.0 \text{ км}^3/\text{год}$ на Новой Земле (12 ледников); $-1.9 \text{ км}^3/\text{год}$ на Земле Франца-Иосифа (11 ледников); $-3.2 \text{ км}^3/\text{год}$ на Северной Земле (8 ледников).

3. Современные методы исследований позволяют собрать значительное количество информации о динамике наземного оледенения, айсбергообразовании, морфометрических характеристиках айсбергов и параметрах их дрейфа. Для оценки динамики наземного оледенения и айсбергообразования перспективным комплексом методов служит: воздушное зондирование ледников с помощью видеоимпульсных радиолокаторов, работающих на частотах 20–40 МГц; идентификация положения фронтов выводных ледников по космическим изображениям и их дешифрирование в ручном или полуавтоматическом режиме; определение скоростей движения поверхности ледников посредством распознавания положения одинаковых элементов на разновременных космических изображениях с шагом по времени от нескольких дней до года и более. Отработка технологии дистанционного мониторинга ледников открывает широкие возможности для наблюдения за процессами, влияющими на образование айсбергов вблизи районов размещения объектов нефтегазовой инфраструктуры на морском шельфе.

4. Наиболее подробная информация об общем объеме и массе отдельного айсберга достигается пу-

тем сочетания аэрофотосъемки и гидролокационной съемки. Установка на айсберги радиомаяков с функцией GPS позволяет получать сведения о параметрах индивидуального дрейфа этих опасных ледяных образований. Контроль потенциально возможного распространения айсбергов может быть осуществлен с помощью регулярного спутникового радиолокационного мониторинга.

5. Развитие методов математического моделирования позволяет в настоящее время достаточно успешно оценивать перемещение отдельных айсбергов в диагностическом и прогностическом режиме. Выявленные закономерности между линейными размерами и остальными геометрическими параметрами и массой айсбергов позволяют учесть в модели региональные особенности айсбергов морей Российской Арктики. Моделирование методом Монте-Карло генерации айсбергов и последующее численное моделирование пространственного распределения и разрушения айсбергов позволяют восполнить недостаток наблюдений за айсбергами при оценках айсберговой опасности и режимных характеристик дрейфа айсбергов.

Литература

1. О.Я. Сочнев, К.А. Корнишин, П.А. Тарасов, А.Л. Сальман, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев, Я.О. Ефимов, Т.Э. Мамедов *Нефтяное хозяйство*, 2018, № 10(1140), 92. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-10-92-97.
2. A. Glazovsky, N. Elagina, E. Vasilenko, I. Lavrentiev *In IASC Workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers & proglacial marine ecosystems (Austria, Oberurg, 22-24 January, 2018)*, 2018, pp. 19-21.
3. S. Løset *J. Geophys. Res.*, 98(C6), 1993, 10001. DOI: 10.1029/93JC00138.
4. I. Kubat, M. Sayed, S.B. Savage, T. Carrieres, G. Crocker *In Proc. 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (Portugal, Lisbon, 1-6 July, 2007)*, 2004, p. 652.
5. V. Abramov *Atlas of Arctic Icebergs*, USA, NJ, Paramus, Backbone Publ. Comp., 1996, 70 pp.
6. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике, под ред. Е.У. Миронова, РФ, С.-Пб, Изд. ААНИИ, 2010, 320 с.
7. В.Ю. Визе *Известия Гос. Гидрологич. Инст.*, 1930, 29, 77.
8. А.В. Марченко, С.А. Огородов, А.С. Цвезинский, А.С. Шестов *В Тр. 9-й Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2009) (РФ, С.-Петербург, 15-18 сентября, 2009)*, в 2 тт., т. 1, РФ, С.-Петербург, Химиздат, 2009, с. 91–96.
9. И.В. Бузин *Дис. канд. геогр. наук*, ААНИИ, РФ, С.-Пб., 2008 г., 202 с.
10. А.К. Наумов, Г.К. Зубакин, Ю.П. Гудошников, И.В. Бузин, А.А. Скутин *В Тр. 6-й Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO-03/CIS Offshore 2003) (РФ, С.-Петербург, 16-19 сентября, 2003)*, РФ, С.-Петербург, 2003, с. 337-342.
11. А.И. Данилов, В.Г. Дмитриев, В.А. Мартыщенко *В Тр. 9-й Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2009) (РФ, С.-Петербург, 15-18 сентября, 2009)*, в 2 тт., т. 1, РФ, С.-Петербург, Химиздат, 2009, с. 8–11.

12. «Кара-зима-2015» стала самой масштабной арктической экспедицией в мире за последние 20 лет, Управление информационной политики ОАО «НК «Роснефть», 16.06.2015. (<https://www.rosneft.ru/press/news/item/174202/>).
13. А.К. Наумов
Труды ААНИИ, 2004, **449**, 140.
14. С.Л. Карлинский, А.А. Малютин, В.А. Чернецов
В Тр. 10-й Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2011) (РФ, С.-Петербург, 13–16 сентября, 2011), РФ, С.-Петербург, 2011, с. 456–461.
15. Морской добычной комплекс.
(<http://www.shtokman.ru/project/about/offshore/>).
16. J.A. Dowdeswell
J. Glaciol., 1989, **35**(120), 224.
DOI: 10.3189/S002214300000455X.
17. Н.Н. Зубов
Льды Арктики, СССР, Москва, Изд. Главсевморпути, 1945, 350 с.
18. K.S. Sandford
Geograph. J., 1955, **121**, 164. DOI: 10.2307/1791701.
19. И.В. Бuzин, А.Ф. Глазовский, Ю.П. Гудосников, А.И. Данилов, Н.Е. Дмитриев, Г.К. Зубакин, Н.В. Кубышкин, А.К. Наумов, А.В. Нестеров, А.А. Скутин, Е.А. Скутина, С.И. Шибакин.
Проблемы Арктики и Антарктики, 2008, №1(78), 66.
20. И.А. Бычкова, В.Г. Смирнов
Лёд и Снег, **59**(3), 2019, 377.
DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-411.
21. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики: обобщение фондовых материалов и результаты экспедиционных исследований ООО «АНПЦ» в 2012–2014 гг., РФ, Москва, Нефтяное хозяйство, 2015, 128 с.
22. R.I. May, R.B. Guzenko, Y.U. Mironov, A.K. Naumov, A.A. Skutin, E.A. Skutina, D.I. Sobotuk, G.A. Zamarin, K.A. Kornishin, Ya.O. Efimov, T.E. Mamedov
IJOPE, 2019, **29**(4), 375. DOI: 10.17736/ijope.2019.jc770.
23. I.V. Polyakov, I.Yu. Kulakov, S.A. Kolesov, N.Eu. Dmitriev, R.S. Pritchard, D. Driver, A.K. Naumov
J. Mech. Arct. Eng., 1998, **120**(2), 77. DOI: 10.1115/1.2829527.
24. N.Ye. Dmitriev, A.V. Nesterov
B Proc. of the 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE-2007) (Portugal, Lisbon, July 1–6, 2007), USA, CA, Cupertino, ISOPE Publ., 2007, pp. 633–638.
25. K. Allison, G. Crocker, H. Tran, T. Carrieres
Cold Regions Sci. Tech., 2014, **108**, 1.
DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.08.007.
26. S.B. Savage
B Geomorphological Fluid Mechanics, Ser. Lecture Notes in Physics, Eds N.J. Balmforth, A. Provenzale, 2001, **582**, pp. 279–318.
DOI: 10.1007/3-540-45670-8_12.
27. L. Padman, S. Erofeeva
Geophys. Res. Lett., 2004, **31**(2), L02303.
DOI: 10.1029/2003GL019003.
28. P.A. Tarasov, K.A. Kornishin, I.I. Lavrentiev, T.E. Mamedov, A.F. Glazovsky, E.S. Bagorian, Ya.O. Efimov, I.V. Buzin, P.A. Salman
B Proc. of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference (USA, Hawaii, Honolulu, 16–21 June, 2019), USA, CA, Cupertino, ISOPE Publ., 2019, pp. 671–678.
29. I.V. Buzin, A.V. Nesterov, Yu.P. Gudoshnikov, A.A. Pashali, K.A. Kornishin, Ya.O. Efimov, D.S. Stragnikov
IJOPE, 2019, **29**(4), 391. DOI:10.17736/ijope.2019.jc772.
30. A. Tiugaleva, R. Guzenko, S. Klyachkin, R. May
B Proc. 19th Int. Multidisc. Sci. GeoConf. "SGEM 2019" (Bulgaria, Albena, 30 June – 6 July, 2019), Bulgaria, Sofia, 2019, pp. 977–984.
DOI: 10.5593/sgem2019/1.2/S06.124.

English

Study of Dynamics and Morphometry of Glaciers and Icebergs and Application of the Results for the Development of the Hydrocarbon Deposits on the Continental Shelf of the Russian Arctic*

Igor V. Buzin

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
buzin@aari.ru

Ruslan I. May

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
may@aari.ru

Alexander V. Nesterov

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
nest@aari.ru

Alexei K. Naumov

Arctic and Antarctic Research
Institute
38 Bering Str., St. Petersburg,
199397, Russia
nmv_alex@rambler.ru

Andrey F. Glazovsky

Institute of Geography, RAS
29 Staromonetny, Moscow, 119017,
Russia
glazovsky@igras.ru

Yevgeny U. Mironov

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
mir@aari.ru

Yury P. Gudoshnikov

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
gup@aari.ru

Abstract

The article is dealing with the main results of glacier and icebergs studies performed in the Russian Arctic and their practical applications. The modern methods of the dynamics estimation and iceberg productivity of the Arctic tidewater glaciers are described, as well as the iceberg production rate for Novaya Zemlya, Franz-Josef Land and Severnaya Zemlya archipelagoes. The methods of icebergs surveys are discussed, and the problems of iceberg distribution in the Russian Arctic seas and impact on the development of the major oil and gas offshore projects are described. The estimations of the main morphometric parameters of icebergs are given, the difference between icebergs from Franz-Josef Land/Severnaya Zemlya Land archipelagoes and Novaya Zemlya is demonstrated. The result of iceberg drift modelling for the 2002/03 ice season (the flux of icebergs to the central part of the Barents Sea, to the water area of the promising hydrocarbon deposit) is demonstrated. An example of iceberg threat calculation for the Kara Sea with the help of modelling of generation of icebergs by the Monte-Carlo method and further numerical simulations of their spatial distribution is given.

Keywords: glaciers, icebergs, Arctic Shelf, distribution, modelling.

*The work was financially supported by RFBR (projects 05-05-64732, 16-35-00333, 17-55-80107 and 18-0560109).

Images & Tables

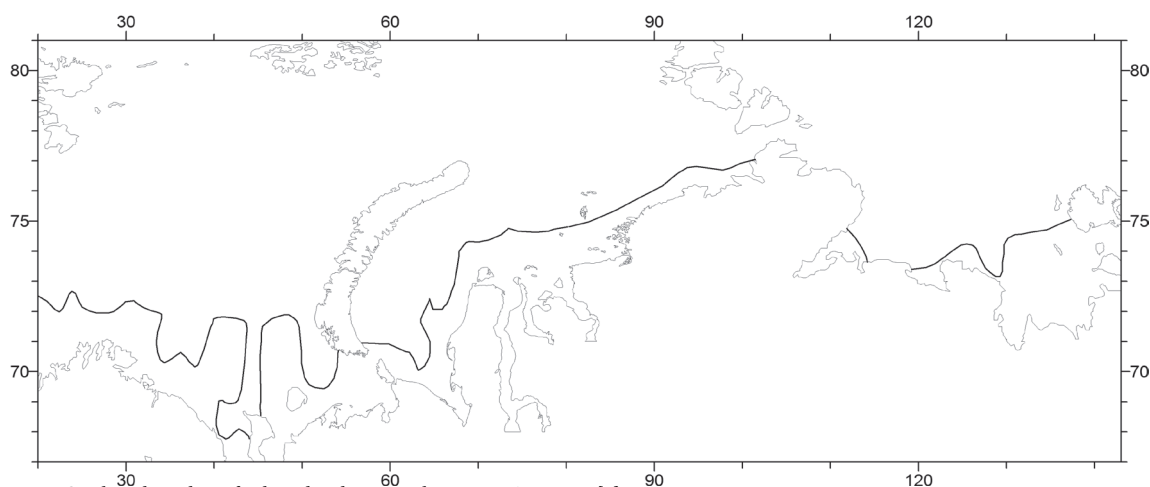


Fig. 1. Southern boundary of iceberg distribution in the Russian Arctic seas [6].

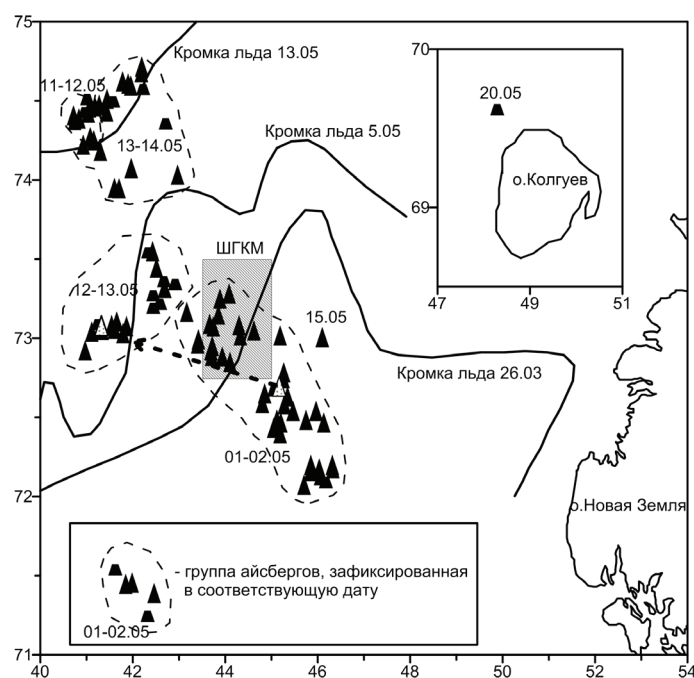


Fig. 2. Position of icebergs in area of Shtokman Gas Condensate Field in May, 2003 [10].

Table 1. Statistical characteristics of the iceberg length (m) according to the data of AARI’s expeditions in 2012–2017 [22].

Statistic indexes		All regions	Arch. Novaya Zemlya	Arch. Severnaya Zemlya and the Franz-Josef Land	
				Non-tabular	Tabular
Mean		121	61	93	205
Standard deviation		95	36	53	109
Quantile (with probability P)	$p=0.05$	22	12	30	63
	$p=0.25$	56	34	55	121
	$p=0.50$	90	57	79	177
	$p=0.75$	157	80	120	280
	$p=0.95$	344	118	198	410

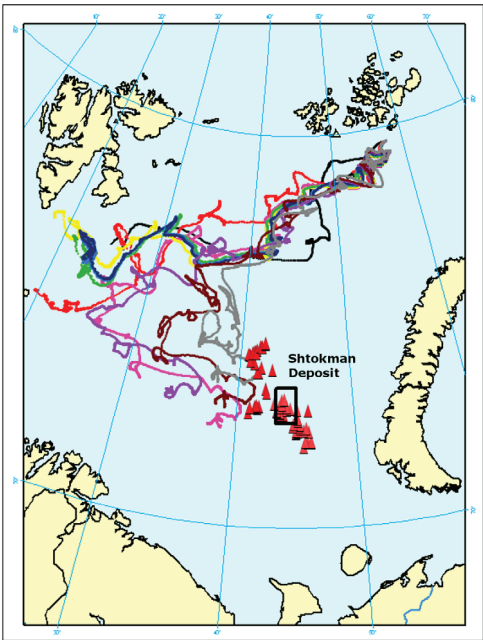


Fig. 3. Iceberg drift trajectories according to numerical simulations for the period of September 2002 – May 2003 (triangles mark the real positions of icebergs in May 2003) [24].

Table 2. Parameters of regression $Y=kL^n$, linking the length (L) with the mass and geometrical parameters of the Novaya Zemlya icebergs in the Kara Sea (according to [22]).

Equation parameters	Iceberg parameters					
	Width W	Mass M	Draft D	Area of the vertical cross-section of the above-water part $S_{A\perp}$	Area on the waterline area $S_{A\parallel}$	Area of the vertical cross-section of the under-water part S_W
Power, n	1	3	1	2	2	2
Regression coefficient, k	0.6400	$0.1975 \times \rho^*$	0.5200	0.04720	0.3828	0.3652
Determination coefficient, R^2	0.81	0.71	0.37	0.68	0.85	0.76
Root mean square error, σ_e	11	75480	19	125	5590	1562

* Iceberg ice density.

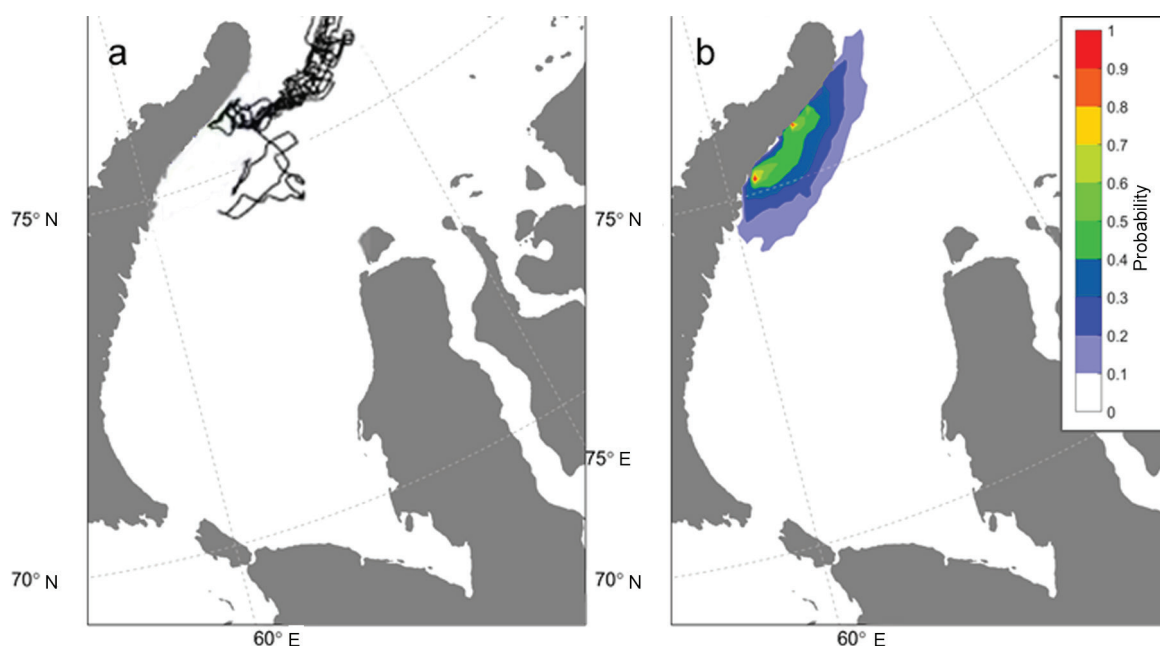


Fig. 4. Examples of simulations of the icebergs drift: a – trajectories of icebergs generated at Vershynsky glacier in the period 13 Apr. 2016 – 31 Dec. 2016; b – estimation of probability of encountering the icebergs calved from glaciers Roze, Vershynsky and Rozhdestvensky.

References

1. O.Ya. Sochnev, K.A. Kornishin, P.A. Tarasov, A.L. Salman, A.F. Glazovsky, I.I. Lavrentiev, Ya.O. Efimov, T.E. Mamedov Oil Industry [Neftyanoe Khozyaystvo], 2018, № 10(1140), 92 (in Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2018-10-92-97.
2. A. Glazovsky, N. Elagina, E. Vasilenko, I. Lavrentiev In Proc. IASC Workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers & proglacial marine ecosystems (Austria, Obergurgl, 22-24 January, 2018), 2018, pp. 19-21.
3. S. Loset J. Geophys. Res., 98(C6), 1993, 10001. DOI: 10.1029/93JC00138.
4. I. Kubat, M. Sayed, S.B. Savage, T. Carrieres, G. Crocker In Proc. 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (Portugal, Lisbon, 1-6 July, 2007), 2004, p. 652.
5. V. Abramov Atlas of Arctic Icebergs, USA, NJ, Paramus, Backbone Publ. Comp., 1996, 70 pp.
6. Ice Phenomena Threatening Arctic Shipping [Opasnyye ledovyye yavleniya dlya sudokhodstva v Arktike], Ed. E.U. Mironov, RF, St. Petersburg, AARI Publ., 2010, 320 pp. (in Russian).
7. V.Yu. Vieze Izvestia Gos. Gidrol. Inst. [Letters of the State Hydrological Institute], 1930, 29, 77 pp. (in Russian).
8. A.V. Marchenko, S.A. Ogorodov, A.S. Tsvetsinskiy, A.S. Shestov In Proc. Int. Conf. RAO/CIS Offshore 2009 (RF, Snt. Petersburg, 15-18 September, 2009), in 2 Vols, Vol. 1, RF, Snt. Petersburg, Khimizdat, 2009, pp. 91-96 (in Russian).
9. I.V. Buzin PhD Thes. (Geography) [Dissertation for the degree of a Candidate of Geographic Sciences], AARI, RF, Snt. Petersburg, 2008, 202 pp. (in Russian).
10. A.K. Naumov, G.K. Zubakin, Yu.P. Gudoshnikov, I.V. Buzin, A.A. Skutin In Proc. Int. Conf. RAO-03/CIS Offshore 2003 (RF, Snt. Petersburg, 16-19 September, 2003), RF, Snt. Petersburg, 2003, pp. 337-342 (in Russian).
11. A.I. Danilov, V.G. Dmitriev, V.A. Martyshchenko In Proc. Int. Conf. RAO/CIS Offshore 2009 (RF, Snt. Petersburg, 15-18 September, 2009), in 2 Vols, Vol. 1, RF, Snt. Petersburg, Khimizdat, 2009, pp. 8-11 (in Russian).
12. Kara-Winter-2015 has become the largest arctic expedition in the world in recent 20 years, Rosneft Information Division 16.06.2015. (<https://www.rosneft.ru/press/news/item/174202/>).
13. A.K. Naumov AARI Proc. [Trudy AANII], 2004, 449, 140 (in Russian).
14. S.L. Karlinsky, A.A. Malyutin, V.A. Chernetsov In Proc. Int. Conf. RAO/CIS Offshore 2011 (RF, Snt. Petersburg, 13-16 September, 2011), RF, Snt. Petersburg, 2011, pp. 456-461 (in Russian).
15. Offshore Facilities. (<http://www.shtokman.ru/en/project/about/offshore/>) (in Russian).
16. J.A. Dowdeswell J. Glaciol., 1989, 35(120), 224. DOI: 10.3189/S002214300000455X.
17. N.N. Zubov Arctic Ice, USSR, Moscow, Glavsevmorput Publ. House, 1945, 350 pp. (in Russian).
18. K.S. Sandford Geograph. J., 1955, 121, 164. DOI: 10.2307/1791701.
19. I.V. Buzin, A.F. Glazovsky, Yu.P. Gudoshnikov, A.I. Danilov, N.E. Dmitriev, G.K. Zubakin, N.V. Kubyshev, A.K. Naumov, A.V. Nesterov, A.A. Skutin, E.A. Skutina, S.I. Shibakin Arctic and Antarctic Research [Problemy Arktiki i Antarktiki], №1(78), 66 (in Russian).
20. I.A. Bychkova, V.G. Smirnov Ice and Snow, 2019, 59(3), 377 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-411.
21. Atlas of Hydrometeorological and Ice Conditions of Russian Arctic Seas: Summary of Archived Materials and Results of the Field Surveys of LLC "APSC" in 2012-2014 [Atlas gidrometeorologicheskikh i ledovykh usloviy morey rossiyskoy Arktiki: obobshcheniye fondovykh materialov i rezultaty

- ekspeditsionnykh issledovaniy OOO "ANPTS" v 2012–2014 gg.], RF, Moscow, Oil Industry Publ., 2015, 128 pp. (in Russian).
22. **R.I. May, R.B. Guzenko, Y.U. Mironov, A.K. Naumov, A.A. Skutin, E.A. Skutina, D.I. Sobotuk, G.A. Zamarin, K.A. Kornishin, Ya.O. Efimov, T.E. Mamedov**
IJOPE, 2019, **29**(4), 375. DOI: 10.17736/ijope.2019.jc770.
23. **I.V. Polyakov, I.Yu. Kulakov, S.A. Kolesov, N.Eu. Dmitriev, R.S. Pritchard, D. Driver, A.K. Naumov**
J. Mech. Arct. Eng., 1998, **120**(2), 77. DOI: 10.1115/1.2829527.
24. **N.Ye. Dmitriev, A.V. Nesterov**
In *Proc. of the 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE-2007)* (Portugal, Lisbon, July 1–6, 2007), USA, CA, Cupertino, ISOPE Publ., 2007, pp. 633–638.
25. **K. Allison, G. Crocker, H. Tran, T. Carrieres**
Cold Regions Sci. Tech., 2014, **108**, 1.
DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.08.007.
26. **S.B. Savage**
In *Geomorphological Fluid Mechanics, Ser. Lecture Notes in Physics*, Eds N.J. Balmforth, A. Provenzale, 2001, **582**, pp. 279–318.
DOI: 10.1007/3-540-45670-8_12.
27. **L. Padman, S. Erofeeva**
Geophys. Res. Lett., 2004, **31**(2), L02303.
DOI: 10.1029/2003GL019003.
28. **P.A. Tarasov, K.A. Kornishin, I.I. Lavrentiev, T.E. Mamedov, A.F. Glazovsky, E.S. Bagorian, Ya.O. Efimov, I.V. Buzin, P.A. Salman**
In *Proc. of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference (USA, Hawaii, Honolulu, 16–21 June, 2019)*, USA, CA, Cupertino, ISOPE Publ., 2019, pp. 671–678.
29. **I.V. Buzin, A.V. Nesterov, Yu.P. Gudoshnikov, A.A. Pashali, K.A. Kornishin, Ya.O. Efimov, D.S. Stragnikov**
IJOPE, 2019, **29**(4), 391. DOI:10.17736/ijope.2019.jc772.
30. **A. Tiugaleva, R. Guzenko, S. Klyachkin, R. May**
In *Proc. 19th Int. Multidisc. Sci. GeoConf. «SGEM 2019»* (Bulgaria, Albena, 30 June – 6 July, 2019), Bulgaria, Sofia, 2019, pp. 977–984.
DOI: 10.5593/sgem2019/1.2/S06.124.