

АЙСБЕРГИ И ЛЕДНИКИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ: ИССЛЕДОВАНИЯ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

ЧАСТЬ 1. ОСНОВНЫЕ ПРОДУЦИРУЮЩИЕ ЛЕДНИКИ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЙСБЕРГОВ

*И.В.БУЗИН¹, А.Ф.ГЛАЗОВСКИЙ², Ю.П.ГУДОШНИКОВ¹, А.И.ДАНИЛОВ¹,
Н.Е.ДМИТРИЕВ¹, Г.К.ЗУБАКИН¹, Н.В.КУБЫШКИН¹, А.К.НАУМОВ¹,
А.В.НЕСТЕРОВ¹, А.А.СКУТИН¹, Е.А.СКУТИНА¹, С.И.ШИБАКИН³*

¹ – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

² – Институт географии РАН, г. Москва

³ – ООО «Севморнефтегаз», г. Москва

Айсберги являются продуктом деятельности выводных ледников и наиболее опасным элементом природной среды для судоходства и функционирования инженерных сооружений и коммуникаций, расположенных в шельфовой зоне арктических и субарктических морей. Без учета данного феномена освоение природных ресурсов сопряжено с повышенным риском как с точки зрения безопасной добычи полезных ископаемых на материковом шельфе и транспортировки сырья, так и с точки зрения минимизации ущерба, наносимого природной среде при последствиях возможных столкновений айсбергов с сооружениями в море. Исследования айсбергов в Баренцевом море, результаты которых представлены в данной статье, выполнены ААНИИ в последнее десятилетие. Они базируются на анализе архивных данных об обнаруженных айсбергах за период 1891–1991 гг. и на данных, полученных в результате проведения специализированных наблюдений в экспедициях 1992, 2003–2007 гг.

В силу большого объема исследований работа разделена на две части. В первой характеризуются ледники, описываются распространение и морфометрия айсбергов. Во второй части рассмотрены вопросы динамики айсбергов по натурным данным и модельным расчетам, оценки вероятностей появления айсбергов в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ) и столкновения айсбергов с платформой, а также опыт ААНИИ по реализации методики активного воздействия на айсберги. Примыкает к данному исследованию статья настоящего сборника (Н.В.Кубышкина и др.) о физико-механических свойствах айсбергов и ледников.

В 2003 г. было обнаружено вторжение аномально большого количества айсбергов в центральную и юго-восточную часть Баренцева моря. Данное обстоятельство послужило толчком для проведения специализированных исследований для оценки вероятности и частоты появления айсбергов на акватории Штокмановского газоконденсатного месторождения. В период 2003–2007 гг. в рамках ледовых изыскательских работ для обеспечения освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения ААНИИ выполнил большой объем работ по исследованиям айсбергов Баренцева моря и ледников архипелагов Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. В результате анализа собранных материалов наблюдений были получены новые данные о пространственном распределении айсбергов, размерах и их динамике, прочностным свойствам. Анализ профилей температуры в толще ледников и айс-

бергов позволил идентифицировать источники происхождения айсбергов с различных архипелагов. Для некоторых ледников был обнаружен факт ускорения их деградации. При этом изменились географические очертания берегов, появились новые объекты на картах, изменилась гидрографическая и навигационная обстановка.

Кроме перечисленных экспедиционных исследований, в ААНИИ запланирован и выполняется большой объем работ по исследованиям ледников и айсбергов в рамках Международного полярного года. Данные, полученные в ходе проведения экспедиционных работ 2007–2008 гг., наряду с другой информацией, собранной мировым сообществом в полярных регионах, позволят более точно оценить влияние эффекта современного потепления на поведение ледников, изменения в пространственном распределении айсбергов, времени их существования, риски и экологическую безопасность в районе ШГКМ и на акватории моря в целом, организацию мониторинга опасных ледяных образований и их менеджмента.

Источниками айсбергов, распространяющихся на акватории Баренцева моря, являются арктические архипелаги Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, Новая Земля (о. Северный) и некоторые арктические острова (о. Ушакова и о. Виктория). В качестве отдаленного источника айсбергов может выступать Северная Земля [9, 25]. В настоящее время на всех архипелагах баренцевоморского региона продолжается сокращение ледяного покрова, начавшееся на Шпицбергене и Новой Земле примерно с конца XIX – начала XX вв., а на ЗФИ – со второго десятилетия XX в. Сокращение оледенения выражается в отступании кромок ледников и понижении поверхности куполов, уменьшении скорости движения и толщины выводных ледников [6, 20, 29].

Образование айсбергов происходит от ледников трех типов – ледниковых куполов, выводных и шельфовых ледников. Ледниковые купола наиболее распространены на ЗФИ и Шпицбергене (преимущественно о. Северо-Восточная Земля), о. Ушакова и Виктория. Выводные ледники присутствуют на всех трех архипелагах. Шельфовые ледники в бассейне Баренцева моря имеются в настоящее время только на ЗФИ (2 ледника – на о. Земля Георга и о. Джексона) [6, 15, 20]. В краевых прибрежных частях куполов, обрывающихся в море, скорости движения льда составляют до 6–8 м/год. В выводных ледниках скорость движения льда лежит в диапазоне от нескольких десятков (Новая Земля, ЗФИ) до нескольких сотен метров в год (Шпицберген) [6, 15, 20, 26]. Протяженность ледниковых фронтов архипелага Шпицберген, образующих айсберги, составляет порядка 1000 км [15, 16]. Для Новой Земли протяженность ледниковых фронтов составляет на 2001 г. – 229,9 км, из них 164,3 км для Западного берега и 65,6 км для Восточного берега соответственно. Для ЗФИ общая протяженность заканчивающихся в море ледниковых фронтов составила 2510 км, из которых 1606 км на 2001 г. являлись айсбергопродуцирующими. Суммарная протяженность тех их участков, где за последние 50 лет отмечены заметные изменения (наступление или отступление более чем на 200 м), оказалось равным 820 км [14]. Острова Виктория и Ушакова имеют почти исключительно ледяные берега [6].

Для ледников Шпицбергена известно явление т.н. сёрджа (*surge* – подвижка, англ.). Сёрджи характеризуются увеличением скорости ледника на несколько порядков и обычно сопровождаются его быстрым наступлением и переносом массы льда из верхней зоны ледника (зона аккумуляции) в нижнюю зону. В случае, если ледник приливной (т.е. оканчивается в море), сёрдж проявляется в увеличении количества образующихся айсбергов. Отметим, что согласно исследованию Даудсвелла и Вильямса [18] в Российской Арктике следы прошлых сёрджей ледников обнаружены только на Новой Земле (для 3-х ледников) и Северной Земле (для 2-х ледников).

Последняя оценка айсбергообразования на Шпицбергене выполнена в работе [20]. В соответствии с этим источником, поток льда на продуцирующих фронтах оценивается как $3 \pm 1 \text{ км}^3/\text{год}$, а годовое отступление ледников составляет порядка 1 км^3 . Таким образом, полная потеря льда за счет айсбергообразования равна $4 \pm 1 \text{ км}^3/\text{год}$, что близко к оценкам работы [11]. Айсберговый сток Земли Франца-Иосифа по данным А.Ф.Глазовского [23] составляет порядка $4,4 \text{ км}^3/\text{год}$ ($4,0 \text{ км}^3/\text{год}$ – поток льда на продуцирующих ледниковых фронтах, $0,4 \text{ км}^3/\text{год}$ – годовое отступление ледников). Согласно оценкам этого исследователя, общие потери льда на образование новоземельских айсбергов составляют около $1,5 \text{ км}^3/\text{год}$ ($1,0 \text{ км}^3/\text{год}$ – поток льда на продуцирующих фронтах; $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$ – годовое отступление ледников). Необходимо уточнить, что приведенные выше оценки айсбергового стока несколько превышают значения, опубликованные А.Ф.Глазовским и Ю.Я.Мачеретом в монографии [14] – $4 \text{ км}^3/\text{год}$ и $1 \text{ км}^3/\text{год}$, соответственно. Значения айсбергового стока островов Ушакова и Виктория, приведенные в работе [6], невелики и составляют $0,01$ и $0,001 \text{ км}^3/\text{год}$ соответственно. Оценки айсбергового стока с Северной Земли дают величину в пределах $0,4\text{--}0,8 \text{ км}^3/\text{год}$ [6, 10, 11]. Согласно исследованиям Даудсвелла и др. [19], эта величина для Северной Земли может быть не менее $0,7 \text{ км}^3/\text{год}$.

Значительный интерес представляет вопрос изменчивости айсбергового стока внутри года. Известно, что для российских арктических архипелагов и островов наибольший айсберговый сток наблюдается в июле–августе [6]. При этом для ЗФИ максимальный айсберговый сток отмечается в августе, а для Новой Земли – с июня по август. Максимальный айсберговый сток на ледниках Шпицбергена, согласно общепринятым оценкам, наблюдается в августе–сентябре (А.Ф.Глазовский, личное сообщение, 2007).

Говоря об айсберговом стоке с различных архипелагов, следует иметь в виду, что распространение айсбергов от мест образования может быть серьезным образом затруднено и ограничено местной батиметрией (глубины у ледников и во фьордах, наличие отмелей и подводных порогов, отделяющих фьорды от моря). Крупные айсберги могут сесть на мель в прибрежных мелководных районах и оставаться там длительное время, вплоть до разрушения. По мнению Даудсвелла, большинство небольших айсбергов, обломков и кусков айсбергов, отколовшихся во фьорды Шпицбергена, разрушаются там же, не доходя до открытого моря [15]. Наблюдения в заливе Русская Гавань (Новая Земля) показали, что открытого моря достигают лишь единичные экземпляры (т.е. менее 1 % от образовавшихся айсбергов, обломков айсбергов и более мелких фракций) [4]. Таким образом, количество айсбергов, достигших моря и реально вовлеченных в свободный дрейф, существенно меньше, чем общее количество образовавшихся айсбергов.

Между морфометрическими параметрами айсберга и ледником, его породившим, существуют определенные зависимости. В самом общем виде эти закономерности можно описать так: наиболее 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 [15, 17]. Эти обобщения хорошо согласуются с различными описаниями айсбергов, выполненными в разное время у Шпицбергена, ЗФИ и Новой Земли [8, 25], а также собственными исследованиями авторов.

В настоящее время в АНИИ собрана база данных наблюдений за айсбергами, описывающая около 23700 айсбергов различной формы. Массив наблюдений охватывает период с 1928 по 2007 г., который можно разделить на 2 группы:

– данные 1928–1991 гг. содержат в основном информацию о дате обнаружения, количестве айсбергов и их местоположении; большая часть сведений, относящихся к данному периоду, – результаты авиаразведок, регулярно проводившихся вплоть до 1991 г.;

– данные 1992, 2002–2007 гг., которые помимо сведений о дислокации айсбергов и их обломков содержат информацию об их морфометрических особенностях, полученную с помощью современных методов в ходе проведения экспедиционных исследований и организации мониторинговых наблюдений.

Таким образом, массив данных по фиксациям охватывает периоды 1928–1992 гг., 2002–2007 гг. и насчитывает около 23500 записей, причем основой служит информация, полученная в ходе проведения авиаразведок.

Массив морфометрических наблюдений охватывает периоды 1991–1992 гг., 2003–2007 гг. и содержит информацию о характеристиках более 1800 исследованных айсбергов различных форм. Особо отметим, что данные, относящиеся к 2003–2007 гг., – материалы экспедиционных исследований АНИИ в северо-восточной части Баренцева моря. За указанный период по данным визуальных наблюдений и материалам аэрофотосъемки, радиолокационной, гидролокационной подводной фото- и видеосъемки была получена информация о морфометрических параметрах почти 1200 айсбергов, зафиксированных в северо-восточной части Баренцева моря [2, 7, 30].

Согласно имеющимся данным, количество айсбергов, зафиксированных в Баренцевом море в течение одного года наблюдений, значительно менялось (рис. 1).

Наибольшее число фиксаций было отмечено в 1989 г. (1384 айсберга, что составляет 5,8 % от общего числа наблюдений), 1992 г. (5,2 % от общего объема данных), 2007 г. (4,9 % от общего числа данных) и в 1960 г. (4,5 % от общего объема наблюдений).

Согласно архивным данным, наблюдения за айсбергами во время проведения авиаразведок и судовых рейсов охватывали практически весь год в период с 1950 по 1991 гг. Для остальных лет сведения носят отрывочный характер, разведки выполнялись лишь в отдельные месяцы без какой-либо периодичности. Среднее

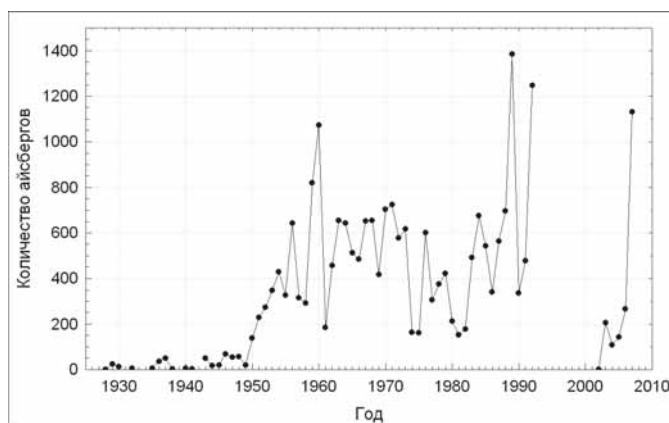


Рис. 1. Многолетняя изменчивость числа айсбергов, обнаруженных на акватории Баренцева моря в период с 1928 по 2007 г.

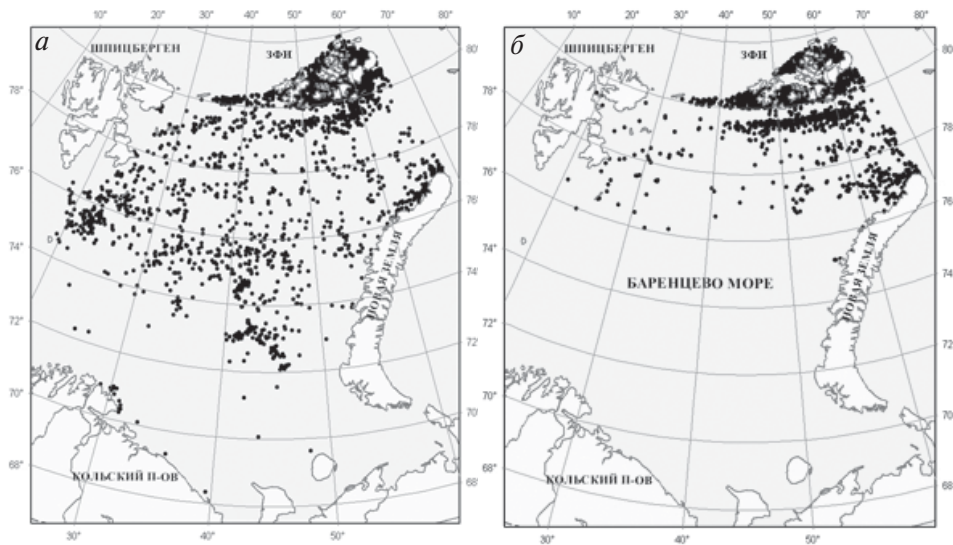


Рис. 2. Местоположение айсбергов, их обломков и кусков, обнаруженных в Баренцевом море в апреле–мае (а) и в сентябре (б) в период с 1928 по 2007г.

число полетов для указанного периода составило 42 при среднем квадратическом отклонении 17 полетов, среднее число зафиксированных в течение года айсбергов – 481 при среднем квадратическом отклонении 255 айсбергов.

Отметим, что в 1989 г. при максимальном числе зафиксированных айсбергов было выполнено максимальное число разведок. В 1960 г. число разведок было близко к среднему за период 1950–1991 гг., в то время как общее количество зафиксированных айсбергов превышало среднее число фиксации в 2,2 раза.

Коэффициент корреляции между числом айсбергов, зафиксированных на акватории Баренцева моря в течение года, и количеством выполненных разведок для периода 1950–1991 гг. составляет 0,8, а между общим числом фиксации и средним числом айсбергов, зафиксированных во время одной разведки, – 0,6.

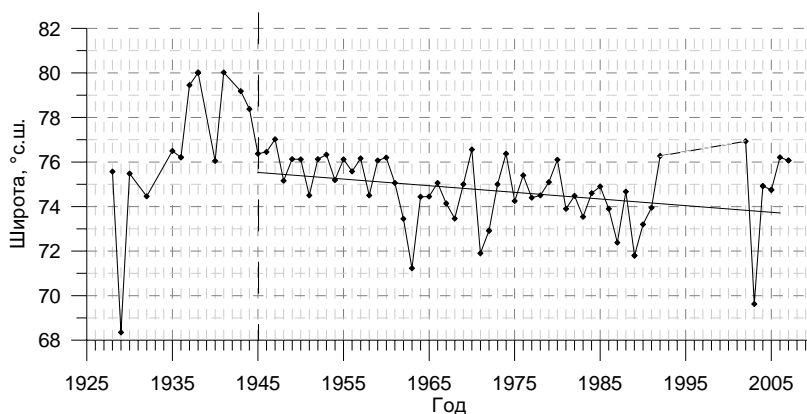


Рис. 3. Многолетняя изменчивость положения южной границы распространения айсбергов, обломков и кусков в Баренцевом море в период с 1928 по 2007 гг.

Для сезонной изменчивости числа айсбергов, обнаруженных на акватории Баренцева моря, характерно 2 пика фиксации: в апреле–мае и в сентябре (рис. 2). Таким образом, можно предположить, что айсберги, находящиеся в сентябре вблизи районов образования, к апрелю–маю распространяются по акватории моря. Небольшое количество разведок с октября по март не позволяет проследить динамику этого процесса, а уменьшение числа айсбергов объясняется их выносом с акватории Баренцева моря между арх. Шпицберген, арх. Земля Франца-Иосифа и о. Новая Земля.

На акватории моря айсберги распространены неравномерно. Максимальное их число наблюдается вблизи очагов образования, с уменьшением широты число зафиксированных айсбергов уменьшается.

Многолетняя изменчивость положения южной границы распространения айсбергов (рис. 3) показывает, что в период с 1928 по 2007 гг. зафиксировано только 2 случая, когда южная граница распространения айсбергов располагалась южнее 70° с.ш. (1929 и 2003 гг.).

В четырех случаях не было обнаружено ни одного айсберга южнее 79° с.ш. (1937, 1938, 1941 и 1943 гг.). Кроме того, в период с 1945 по 2007 г., наблюдается смещение границы распространения айсбергов к югу (рис. 3).

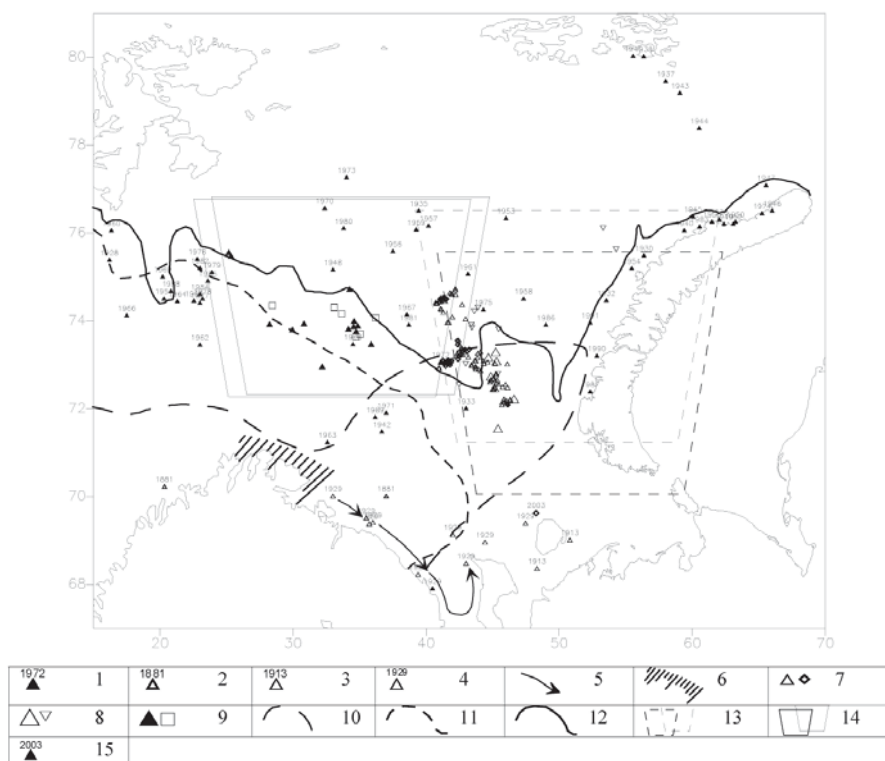


Рис. 4. Случаи наиболее южных фиксаций айсбергов в Баренцевом море по данным различных источников и распределение айсбергов в 2003 г.:

1 – архив данных ААНИИ (1928–1993 гг.); 2 – случаи 1881 г.; 3 – случаи 1913 г.; 4 – случаи 1929 г.; 5 – генеральный дрейф айсбергов в 1929 г.; 6 – район обнаружения айсбергов в 1881 и 1929 гг.; 7 – айсберги и обломки, май 2003 г. (экспедиция ААНИИ); 8 – айсберги по данным RADARSAT за 02 и 12.05.03; 9 – айсберги по данным ENVISAT за 02 и 05.05.03; 10 – кромка льда на 02.06.1881; 11 – кромка льда на 06.05.1929; 12 – кромка льда за 26-29.04.03; 13 – области снимков RADARSAT за 02 и 12.05.03; 14 – области снимков ENVISAT за 02 и 05.05.03; 15 – айсберги, обнаруженные летом и осенью 2003 г.

Известно, что наибольшее количество айсбергов в Баренцевом море отмечается у источников их образования – архипелагов ЗФИ, Шпицберген и Новая Земля. Однако в отдельные годы айсберги могут распространяться далеко на юг и достигать побережья Норвегии и России. Подробное описание таких экстремальных случаев, основанное на анализе различных источников, приведено в работах [3, 31]. На рис. 4 представлены случаи наиболее южного проникновения айсбергов в Баренцевом море до 2005 г., построенные по данным различных источников (опубликованные работы, архив данных ААНИИ, экспедиционные исследования, спутниковые снимки) [3].

Известно, по крайней мере, два надежно документированных случая обнаружения айсбергов у южного побережья Баренцева моря – в 1881 и 1929 гг. (рис. 4). Появление айсбергов в первой половине июня 1881 г. у побережья Финнмарка детально описано в [24]. Авторы сообщают о нескольких айсбергах, наибольший из которых имел длину около 1 км и высоту порядка 25–30 м. Продвижение айсбергов так далеко на юг проходило на фоне исключительно суровой ледовой обстановки – в июне 1881 г. кромка льда достигла экстремально южного положения и находилась на удалении 10–20 км от побережья Восточного Финнмарка. Принимая во внимание свидетельства местных жителей, высаживавшихся на лед, и полагая плотность морского льда равной 900 кг/м^3 , толщина льда была оценена этими авторами в 1,5 м, что соответствует толстому однолетнему льду.

В мае 1929 г. 22 айсберга и огромное количество обломков и осколков было обнаружено у Финнмарка восточнее 23° в.д. Большинство этих айсбергов имело высоту надводной части 6–8 м и горизонтальные размеры около 60×30 м. Максимальная высота айсберга составляла около 23 м [28]. В.Ю. Визе [5] сообщает об айсбергах, количеством более 10 шт., дрейфовавших в апреле–июле на восток вдоль побережья Норвегии и Кольского п-ова. Высота айсбергов была до 12 м над уровнем моря. В апреле айсберги наблюдались на 71° с.ш. и $34,5^\circ$ в.д., в первую декаду мая они оказались у побережья Мурмана. В дальнейшем, занесенные ветрами и течениями в Воронку Белого моря, они удерживались под Канинским берегом в течение июня [8]. В июле 1929 г. один айсберг был обнаружен западнее северной части о. Колгуев [1] (рис. 4).

Экстремальные случаи распространения отдельных айсбергов в южные районы Баренцева моря были зарегистрированы, согласно данным наблюдений ААНИИ, в 1933, 1942, 1963, 1971, 1982 и 1989 гг. Аномальными также следует признать два случая наблюдения айсбергов в районе о. Колгуев (восточнее острова и в Поморском проливе) в июне 1913 г. [1], а также обломка айсберга (высота ~4 м, размеры ~ 10×20 м), обнаруженного 20.05.2003 северо-западнее острова [12] (рис. 4). Мы обладаем крайне скупой информацией относительно случая 1913 г., возможно, небольшие айсберги, достигшие о. Колгуев с севера, были вовлечены существующим течением в циркуляцию по часовой стрелке – и таким образом один из них мог оказаться в Поморском проливе. По сведениям [21], весной 1939 г. с маяка в п. Гамвик (Восточный Финнмарк) были замечены два айсберга.

Говоря об экстремальном распространении айсбергов, следует особо выделить случай 2003 г., когда на акватории Штокмановского ГКМ и вблизи него экспедицией ААНИИ было встречено аномально большое количество айсбергов и их обломков. В период с 1 по 15 мая 2003 г. по результатам ледовых авиаразведок и наблюдений с борта НЭС «Михаил Сомов» было зафиксировано 109 айсбергов и их обломков, причем в течение одного дня был обнаружен 41 айсберг/обломок [12]. Размеры объектов составляли по визуальной и инструментальной оценке от 10–20 до 450 м, а высота – от 3 до 10 м над уровнем моря. Сопоставление экспедиционных данных 2003 г. с данными спутниковых наблюдений для начала

мая 2003 г. показало широкое распространение айсбергов по акватории Баренцева моря в этот период [31] (рис. 4). Интересно отметить, что айсберги оставались в центральной части моря и позднее – по сообщениям «Севморнефтегаз», в июле 2003 г. с судна, выполняющего геофизическую съемку на акватории месторождения, видели гротообразный (разрушающийся) айсберг [3].

Следует отметить, что все исследования отмечают характерную деталь – наиболее южному проникновению айсбергов в Баренцевом море предшествовали продолжительные (3–5 месяцев) периоды с ветрами преимущественно северных направлений.

Айсберги представляют собой физические объекты, исследования которых сопряжены с определенными трудностями. Прямые измерения параметров айсберга возможны только в исключительных случаях, когда высадка специалистов на айсберг безопасна. Контактными измерениями на айсберге могут быть определены температура в его толще, прочностные свойства льда, горизонтальные и вертикальные (надводная часть) размеры.

С помощью дистанционных методов измерений можно получить информацию о морфометрических характеристиках айсбергов, их динамике, распределении на акватории. К таким методам можно отнести аэрофотостереосъемку с последующей фотограмметрической обработкой снимков. Эта методика, наряду с определением горизонтальных размеров, дает возможность построить трехмерные модели надводной поверхности айсбергов [2].

Данные гидролокационной и технической подводной видеосъемки позволяют оценить размеры подводной части айсбергов, построить ее трехмерную модель [7]. Привлечение радиолокационных методов дает возможность оценить общую толщину айсбергов и фронтальных зон ледников.

Таким образом, использование аэрофотосъемки совместно с гидролокацией и радиолокационным зондированием позволяет достаточно точно описать фигуру айсберга, оценить его массу.

Для расчета нагрузок на сооружения кроме морфометрических характеристик айсбергов необходимо иметь данные о прочности айсбергового льда и динамике айсбергов. Прочностные характеристики определяются традиционными в ледотехнике методами.

Наблюдения за перемещением айсбергов при помощи автономных координатных систем позволяют рассчитать скорость движения объекта с достаточной степенью точности. Подобные наблюдения в Баренцевом море активно проводились в 1980–90 гг. XX века с помощью автономных буев «ARGOS». В последние годы для определения координат айсбергов применялись разработанные в АНИИ автоматические буи на базе спутниковой системы связи «ИНМАРСАТ». К достоинствам этих буев можно отнести задаваемую дискретность в определении координат и хорошую точность (50 м в отличие от 200 м для буев «ARGOS»). Недостатком подобных буев является неустойчивая работа на широте выше 78° с.ш.

Наблюдения за формой айсбергов, согласно архивным данным, начали проводиться с 1968 г. В настоящее время имеются данные о форме 5660 айсбергов, зафиксированных на акватории Баренцева моря.

Материалы авиаразведок и судовых наблюдений, а также данные специальных программ, посвященных исследованию айсберговой проблемы (IDAP, ICEBASE), показали, что в Баренцевом море могут встречаться следующие разновидности форм айсбергов: обломок айсберга, кусок айсберга, столообразный айсберг, пирамидальный айсберг, куполообразный айсберг и разрушающийся айсберг [13].

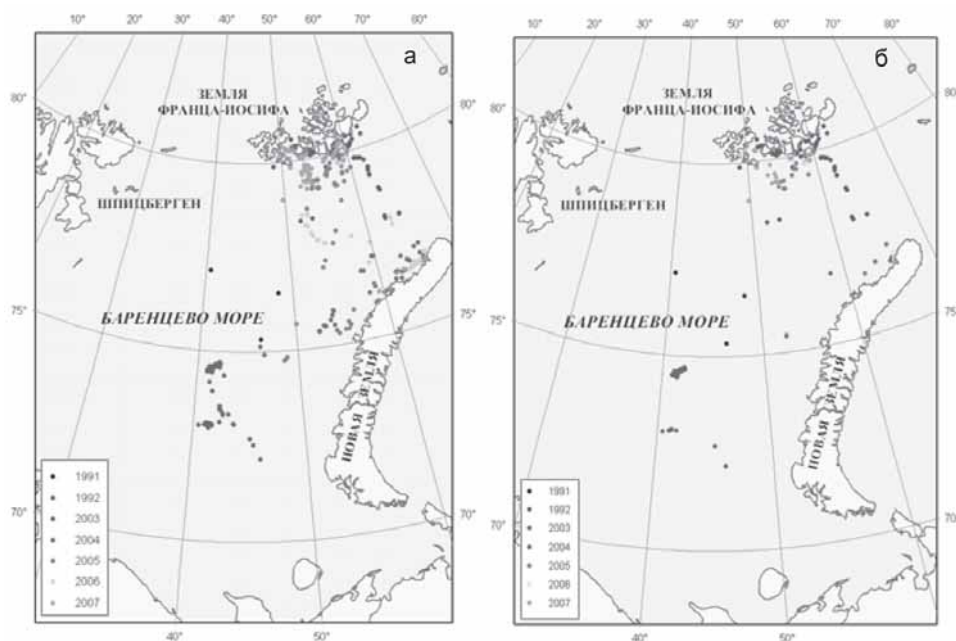


Рис.5.Местоположение айсбергов с известными морфометрическими характеристиками: *а* – по данным визуальных и инструментальных наблюдений; *б* – по данным АФС

Наиболее часто на акватории Баренцева моря встречаются обломки айсбергов (70,2 %). На долю кусков приходится 4,4 % наблюдений [30]. Следует отметить, что в основе имеющегося материала лежат данные авиаразведок (визуальных наблюдений), специфика которых такова, что заметить и зафиксировать куски айсбергов, а, кроме того, отличить их от небольших обломков на чистой воде или выделить на восторженном поле удастся далеко не во всех случаях. Поэтому разумно объединить обломки и куски айсбергов в одну группу. Следовательно, согласно [13] преобладающей группой в Баренцевом море (75 %), является группа айсбергов, высота которых над уровнем моря не превышает 5 м, площадь по ватерлинии – 300 м².

Приведенные ниже оценки различных параметров айсбергов получены по данным специальных программ IDAP, ICEBASE и по результатам экспедиционных исследований ААНИИ в Баренцевом море. Данные охватывают период 1991, 1992, 2003–2007 гг. Местоположение исследованных айсбергов представлено на рис. 5. Измерения, послужившие основой для получения приведенных оценок, выполнены с помощью современных технических средств: аэрофотосъемка надводной части, гидролокационная и техническая подводная видеосъемка подводной части, радиолокационная съемка.

Всего за указанный период были исследованы морфометрические характеристики 1866 айсбергов из которых 1572 – по данным визуальных наблюдений, 294 – по данным аэрофотосъемки. Для 13 айсбергов осадка была измерена по данным гидролокации, для 47 – с помощью радиолокационной съемки была получена оценка толщины.

Наибольший объем данных по морфометрии (сведения о 500 айсбергах, что составляет 47 % от общего числа данных по морфометрии айсбергов) был получен в 2007 г., экспедиционная программа которого была полностью ориентирована на изучение фронтальных зон выводных ледников и мониторинг айсбергов. Большая

часть исследовательских работ экспедиции «Штокман-2007» (период проведения – апрель–май 2007 г.) была выполнена в районе выводных ледников арх. Земля Франца-Иосифа и о. Новая Земля, причем наблюдения охватывали существенно большее число ледников, чем наблюдения 2003–2006 гг.

Кроме того, в сентябре–октябре 2007 г. в рамках Международного полярного года (МПГ) наблюдения за айсбергами проводились в сентябре (экспедиция «Сомов – лето – МПГ – 2007»). В результате этих исследований были определены районы образования и компактного скопления больших столообразных айсбергов: 1) залив Елены Гульд о. Земля Вильчека, 2) проливы между о. Солсбери, Луиджи, Чамп; 3) залив Географов о. Земля Георга. Глубины в этих районах превышают 100 м. Большинство из обнаруженных айсбергов находились на плаву. Следовательно, при благоприятных синоптических условиях до становления припая ничто не препятствует выходу больших айсбергов из данных районов в глубоководные проливы Маркема, Британский Канал и Австрийский пролив, а далее – на акваторию Баренцева моря.

Наибольшее число данных о размерах айсбергов описывает плановые размеры (длину и ширину) надводной части. Вычисление основных статистических характеристик этих параметров по данным визуальных и инструментальных наблюдений показывает, что среднеплановые размеры айсбергов составляют 78×56 м, если учитывать при расчете обломки и куски, и 96×66 м без учета обломков и кусков.

Отметим, что данные визуальных наблюдений – субъективные данные, которые содержат погрешности, вызванные условиями проведения наблюдений. Наиболее достоверная информация – результаты прямых и дистанционных методов измерений. На рис. 5б показано местоположение айсбергов, для которых оценки морфометрических параметров были получены по результатам фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки (АФС), проводившейся в 2003–2007 гг. в северо-восточной части Баренцева моря. Согласно полученным данным, средние плановые размеры айсбергов (как дрейфующих, так и находившихся в момент проведения АФС на мели) составили 147×79 м, при среднем квадратическом отклонении для длины 111 м и для ширины – 48 м.

При изучении айсбергов наибольший интерес, как правило, представляли не куски и обломки, а более крупные формы. Кроме того, проведение измерений вблизи айсбергов небольших размеров или непосредственно на их поверхности небезопасно и рискованно. При выборе аэрофотоснимков для фотограмметрической обработки определение кусков и обломков затруднительно, особенно если они находятся во встороженном поле (поскольку размеры этих форм айсбергов сравнимы с размерами больших торосов). Следовательно, данных о размерах и массах, характерных для кусков айсбергов и их обломков, значительно меньше, чем для других форм. Этим объясняется смещение значений основных статистических характеристик, полученных по данным АФС, от соответствующих значений, полученных по выборке, включающей визуальные наблюдения, в большую сторону. Поэтому еще раз отметим, что приведенные ниже характеристики, полученные по данным АФС, описывают айсберги, форма которых отлична от обломков и кусков.

Согласно имеющимся данным, длина айсбергов может быть аппроксимирована логарифмически нормальным распределением с параметрами масштаба $m = 114,17$ и формы $a = 0,723$; ширина – гамма-распределением с параметрами $\lambda = 0,0365$, $\alpha = 2,877$ (рис. 6).

Максимальное зафиксированное значение длины составило 749 м. Оно было отмечено в экспедиции ААНИИ 25 апреля 2006 г. в точке с координатами $79,99^\circ$ с.ш., $59,82^\circ$ в.д. Айсберг находился на мели.

Коэффициент корреляции, определяющий степень линейной зависимости между длиной и шириной айсбергов, составляет 0,84.

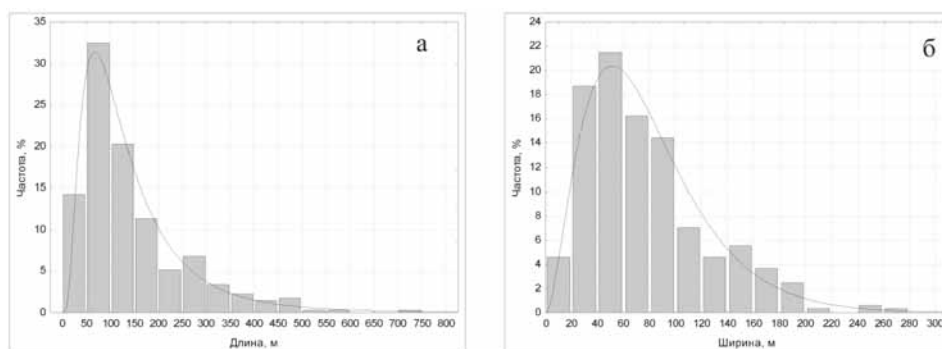


Рис. 6. Распределения длины (а) и ширины (б) айсбергов, полученные по данным АФС

Как описано выше, по результатам фотограмметрической обработки материалов АФС можно оценить такие характеристики, как высота айсберга, объем надводной части и площадь по ватерлинии. В случае, когда выполнено условие гидростатического равновесия, можно по известным значениям плотностей морской воды и айсбергового льда оценить объем подводной части, массу айсберга в целом и его осадку.

Таблица 1

Параметр	Выбор. среднее	Границы среднего		Медиана	Мин.	Макс.	Квартили		СКО
		-95 %	+95 %				25 %	75 %	
Длина*, L (м)	140	124	155	102	15	526	58	197	107
Ширина*, B (м)	77	69	84	64	8	210	40	102	47
Высота, H (м)	11,1	10,2	12,0	10,2	2,0	35,0	6,9	14,9	5,8
Масса, M (тыс.т)	927	663	1190	241	2	8028	56	1121	1382

* – параметры характеризуют плановые размеры айсберга в сечении плоскостью по ватерлинии

В табл. 1 приведены статистические характеристики размеров дрейфующих айсбергов, зафиксированных в северо-восточной части Баренцева моря. Результаты, представленные в таблице, получены по данным АФС и по результатам расчетов.

Отметим, что столообразный айсберг, находившийся в условиях гидростатического равновесия и имеющий максимальные геометрические размеры надводной части, был зафиксирован в районе арх. Земля Франца-Иосифа ($80^{\circ} 50,45'$ с.ш., $61^{\circ} 23,56'$ в.д.) в ходе экспедиционных работ ААНИИ в сентябре 2007 г. (экспедиция «Сомов–МПП–лето–2007»). Длина указанного столообразного айсберга составила 526 м, ширина – 178 м, высота – 8,6 м, масса – 4,2 млн т.

Распределения высоты и массы дрейфующих айсбергов над водой представлено на рис. 7.

Максимальная отмеченная высота (35 м) зафиксирована в 1992 г. [41]. В экспедициях 2003–2007 гг. максимальное значение высоты составило 25 м; плановые размеры этого айсберга составляли 197×74 м, масса – около 960 тыс. т.

Для аппроксимации значений высоты можно использовать гамма-распределение с параметрами $\lambda = 0,326$, $\alpha = 3,626$.

Наибольшая масса (около 8 млн т) была отмечена в 1992 г. [22] в точке $79^{\circ} 45'$ с.ш., $61^{\circ} 32'$ в.д. Столообразный айсберг, обладавший такой массой, имел геометрические размеры 420×140 м и высоту около 19 м.

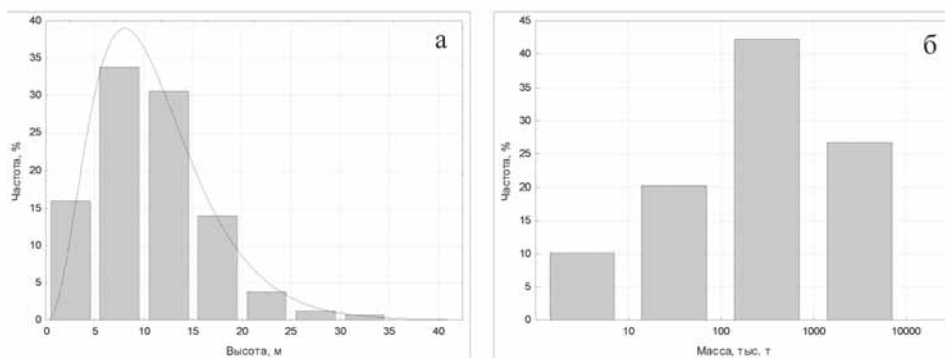


Рис. 7. Распределения высоты (а) и массы (б) дрейфующих айсбергов, полученные по данным АФС

Среди наблюдений за айсбергами число измерений параметров надводной части значительно превышает число измерений подводной части (осадки айсберга или его толщины). Однако осадку можно оценить по известным параметрам надводной части, предполагая, что форма подводной части близка к форме определенных геометрических тел, и учитывая данные батиметрических карт [30].

Как уже указывалось, самая распространенная в Баренцевом море форма айсбергов – обломки и куски. Согласно определениям [13] площадь по ватерлинии таких айсбергов не превосходит 300 м², высота не превышает 5 м, масса – 11 тыс. т. Следовательно, осадка обломков и кусков айсбергов в предположении, что их подводная часть описывается сегментом эллипсоида вращения, не превосходит 22 м.

В результате оценки по известным параметрам надводной части с учетом формы, а также по данным гидролокационной и радиолокационной съемок средняя осадка айсбергов (исключая обломки и куски) составляет 50 м при среднеквадратическом отклонении 28 м, интерквартильная область – от 30 до 70 м. На рис. 8 представлено распределение осадки айсбергов, полученное по результатам обобщения инструментальных данных и расчетов.

Максимальное значение, которое по результатам расчетов может достигать около 137 м, получено из условия гидростатического равновесия для столообразного айсберга, имевшего максимальную массу (около 8 млн т, 1992 г.). Как уже отмечалось, в момент фиксации айсберг находился в точке 79° 45' с.ш., 61° 32' в.д. – в 23 милях

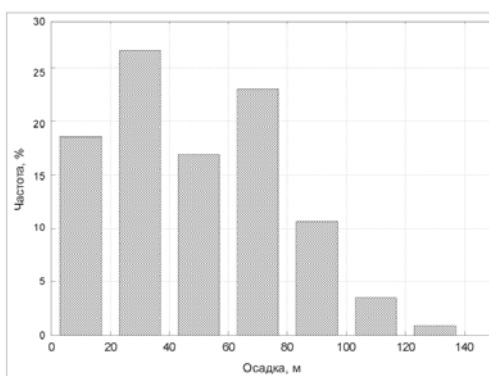


Рис. 8. Распределение осадки айсбергов, полученное в результате обобщения инструментальных данных и расчетов

на юго-восток от о. Сальм, арх. Земля Франца-Иосифа [22]. Глубина моря в этом районе (по данным батиметрической карты) от 130 до 160 м.

Согласно экспедиционным данным 2003–2007 гг., максимальная осадка достигает 115 м. Такая оценка получена для наклонного айсберга, зафиксированного 23.09.2007 в точке 80° 31,72' с.ш., 61° 35,09' в.д; плановые размеры составили 346×182 м, высота – 24,5 м, масса – около 4,6 млн т.

Отношение высоты айсберга к его осадке в среднем составляет 0,26 или 1:4.

Особенности физико-механических свойств льда айсбергов и ледников более подробно рассмотрены в работе [23] и в статье «К вопросу определения районов образования больших баренцевоморских айсбергов по распределению температуры в их толще» Н.В.Кубышкина и др. настоящего сборника.

Вопросам исследования дрейфа айсбергов посвящена вторая часть представленной работы (статья «Движение айсбергов по натурным данным и результатам моделирования и вероятностные оценки рисков столкновения айсберга с гидротехническим сооружением» настоящего сборника). Кроме того, в указанной работе приведены вероятностные оценки столкновения айсбергов с платформой и описывается опыт ААНИИ по активной борьбе с айсбергами с целью предотвращения их воздействия на гидротехнические сооружения.

В результате выполненного исследования определены круг первоочередных задач по проблеме, рассмотренной в данной работе:

- мониторинг поведения ледников и их продуктивности в условиях изменения климата;
- изучение морфометрических особенностей айсбергов с использованием современных методов: по материалам аэрофотосъемки, гидролокационной и подводной технической видеосъемки;
- накопление материалов по оценке физико-механических свойств айсбергов.

Авторы выражают благодарность руководству ООО «Севморнефтегаз» за финансирование экспедиционных работ и поддержку при продвижении результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов В.А., Зубакин Г.К. Русские наблюдения айсбергов. Фонды ААНИИ. СПб. 1992. 33 с.
2. Бородулин В.П., Зубакин Г.К., Гудошников Ю.П., Наумов А.К., Забродин Г.В., Кузнецова Е.Н. Аэрофотосъемка льдов и айсбергов на перспективных нефтегазоносных структурах Баренцева моря // Тр. ААНИИ. 2004. Т. 449. С. 211–228.
3. Бузин И.В. Случаи экстремального распространения айсбергов в Баренцевом море // Ледяные образования морей Западной Арктики. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 116–121.
4. Бузин И.В., Глазовский А.Ф. Айсберги ледника Шокальского, Новая Земля // Мат-лы гляциол. исслед. 2005. Вып. 99. С. 39–44.
5. Визе В.Ю. Айсберги у северных берегов Европы в 1929 г. // Известия Государственного Гидрологического Института. 1930. № 29. С. 77–84.
6. Говоруха Л.С. Современное наземное оледенение Советской Арктики. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 256 с.
7. Зубакин Г.К., Крицкий П.И., Гудошников Ю.П., Гладыш В.А., Виноградов Р.А. Гидролокационная съемка нижней поверхности ледяного покрова // Тр. ААНИИ. 2004. Т. 449. С. 229–237.
8. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: Главсевморпуть, 1945. 108 с.
9. Корякин В.С. Ледники Арктики. М.: Наука, 1988. 160 с.
10. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 288 с.

11. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 638 с.
12. *Наумов А.К., Зубакин Г.К., Гудошников Ю.П., Бузин И.В., Скутин А.А.* Льды и айсберги в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения // Труды RAO-03. 16–19.09.2003. СПб, 2003. С. 337–342.
13. Номенклатура морских льдов: Условные обозначения для ледовых карт. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 90 с.
14. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Отв. ред. В.М.Котляков (ИГ РАН). М.: Наука, 2006. 482 с.
15. *Dowdeswell J.A.* On the nature of Svalbard glaciers // *J. Claciol.* 1989. Vol. 35. P. 224–234.
16. *Dowdeswell J.A., Bamber J.L.* On the glaciology of Edgeoya and Barentsoya, Svalbard // *Polar Research.* 1995. Vol. 14(2). P. 105–122.
17. *Dowdeswell J.A., Whittington R.J., Hodgkins R.* The sizes, frequencies, and freeboards of East Greenland icebergs observed using ship radar and sextant // *Journal of Geophysical Research.* 1992. Vol. 97. № C3. P. 3515–3528.
18. *Dowdeswell J.A., Williams M.* Surge-type glaciers in the Russian High Arctic identified from digital satellite imagery // *Journal of Glaciology.* 1997. Vol. 43. Iss. 145. P. 489–494.
19. *Dowdeswell J.A., Bassford R.P., Gorman M.R., Williams M., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Shepherd A.P., Vasilenko Y.V., Savatyugin L.M., Hubberten H.-W., Miller H.* Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107. № B4. 10.1029/2000JB000129.
20. *Hagen J.O., Kohler J., Melvold K., Winther J-G.* Glaciers in Svalbard: mass balance, runoff and freshwater flux // *Polar Research.* 2003. 22(2). P. 145–159.
21. *Honsi I.* Isfjell i Barentshavet (Icebergs in the Barents Sea) // Report OD-88-75. Norwegian Petroleum Directorate, 1988.
22. Icebergs Expedition to Novaya Zemlya and Franz Josef Land. Barents Sea Gas Project. Technical Research Centre of Finland, Ship Laboratory Helsinki University of Technology, AORC. Espoo, Finland, 1992. 67 p.
23. *Kubyshkin N.V., Buzin I.V., Glazovsky A.F., Skutin A.A.* Determination of the Area of Generation of Big Icebergs in the Barents Sea – Temperature Distribution Analysis // Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. 2006. P. 634–638.
24. *Kvitrud A., Honsi I.* Icebergs in the Norwegian Continental Shelf in 1880–1881, 1991 OMAE // Arctic/Polar Technology ASME. 1991. Vol. IV. P. 131–136.
25. *Sandfor K.S.* Tabular Icebergs Between Spitsbergen and Franz-Josef Land // *Geographical Journal.* 1955. Vol. 121. P. 164–170.
26. *Sharov A.I., Glazovskiy A.F., Meyer F.* Survey of glacial dynamics in Novaya Zemlya using satellite radar interferometry // *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie.* 2003. Vol. 38. № 1. P. 1–19.
27. Study of the Ice Coat at the Shtockman Structure. A Report Based on the Results of the Studies of the Ice Coat in the North-Eastern Part Of the Barents Sea Conducted in 1992. The 2-st Stage: Summer Expedition (August–September 1992). SE AMIGE. Murmansk, 1992. 84 p.
28. *Vinje T.* Icebergs in the Barents Sea, Eight International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, The Hague, March 19–23. 1989. P. 139–145.
29. *Zeeberg J.J., Forman S.L.* Changes in glacier extent on north Novaya Zemlya in the twentieth century // *The Holocene* 11 (2001). P. 161–175
30. *Zubakin G.K., Naumov A.K., Skutina E.A.* Spreading and morphometric peculiarities of icebergs in the Barents Sea // Proceedings of 18th IAHR International Symposium on ice (IAHR-2006), 28 August – 01 September. Sapporo, Japan, 2006. P. 79–87.
31. *Zubakin G.K., Shelomentsev A.G., Onshuus D.K., Eide L.I., Buzin I.V.* Spatial Distribution of Icebergs in the Barents Sea Based on Archived Data and Observations of 2003, Proceedings of the 18th International Conference on Port and Ocean Engineering (POAC-2005), 26–30 June. Potsdam, USA, 2005. P. 575–583.

I.V.BUZIN, A.F.GLAZOVSKY, YU.P.GUDOSHIKOV, A.I.DANILOV, N.E.DMITRIEV,
G.K.ZUBAKIN, N.V.KUBYSHKIN, A.K.NAUMOV, A.V.NESTEROV, A.A.SKUTIN,
E.A.SKUTINA, S.I.SHIBAKIN

**ICEBERGS AND GLACIERS OF THE BARENTS SEA.
RESULTS OF THE MOST RECENT RESEARCH.**

**PART 1. MAIN PRODUCING GLACIERS, THEIR PROPAGATION AND
MORPHOMETRIC PROPERTIES**

Icebergs are produced by the outlet glaciers; these environmental elements represent the greatest danger for navigation, operation of the engineering constructions and service lines situated in the shelf zone of the Arctic and the subarctic seas. Apart from that, development of natural sources is extremely risky considering safety of mineral sources extraction at the continental shelf and transportation operations as well as minimization of damage that the possible collision of icebergs and marine structures can bring about in the environment. Studies of icebergs in the Barents Sea that AARI has performed last decade are based on analysis of archived records on icebergs detected through 1891–1991; they used as well, data obtained in the course of specialized observations in expeditions of 1992 and 2003–2007.

Due to the large scope of material the study was divided into two parts. The first characterizes glaciers, propagation and morphometry of icebergs. The second is devoted to the dynamics of icebergs assessed by filed data and model calculations; estimates of probability of the icebergs appearance in the SGCF region and their collision with a platform. It considers the AARI experience in methods of the active icebergs management as well. Article of N.V. Kubyshkin on the physical and mechanical properties of icebergs and glaciers included in the present volume is close to this study.