

К ВОПРОСУ ПРИМЕНИМОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКОЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ОСВОЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

И. В. Бузин¹, Д. А. Онищенко²

¹ ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2024 г.

Для цитирования

Бузин И. В., Онищенко Д. А. К вопросу применимости и эффективности отдельных элементов системы управления ледовой обстановкой при реализации проектов освоения арктического шельфа // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 205—216. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-205-216.

Для снижения вероятности опасных воздействий ледяного покрова и айсбергов на морские нефтегазопромысловые сооружения, а также для защиты связанных с ними морских операций необходимо разрабатывать и внедрять на этапе эксплуатации так называемые системы управления ледовой обстановкой (УЛО). В работе проанализированы технологии и инструменты, применявшиеся в реализованных на практике операциях УЛО в различных районах арктического шельфа, определены «ключевые технологии» и рассмотрены ограничения технологий, не вошедших в этот список. Сделано предположение, что в реальной оперативной практике возможен отказ от технологии измерения дрейфа ледяных образований с помощью радиомаяков в пользу измерений судовыми («ледовыми») радарными. На основе открытых источников проанализирована эффективность операций по активному воздействию на айсберги и дрейфующий лед. Анализ результатов моделирования позволяет выбрать наиболее эффективную схему работы ледоколов при воздействии на дрейфующий лед.

Ключевые слова: система управления ледовой обстановкой, технологии, методы, ледяной покров, айсберги, эффективность воздействия.

Введение

В феврале 2024 г. введен в действие национальный стандарт [1], охватывающий вопросы проектирования систем управления ледовой обстановкой (УЛО). Разработка этого документа — важный шаг в формировании нормативной базы в области морской нефтегазодобычи. Отметим, что на начало 2024 г. проблематика УЛО в документах (правилах) Российского морского регистра судоходства отдельно не рассматривалась.

Широкое применение термина «управление ледовой обстановкой» в отечественной научно-технической литературе началось после публикации в 2012 г. отчета [2], подготовленного в рамках со-

трудничества норвежской компании DNV (теперь DNVGL) и ПАО «Газпром». В последнее десятилетие термины «УЛО» и «система УЛО» прочно вошли в состав терминологии в области проектирования обустройства морских месторождений углеводородов. Примеры практической реализации систем УЛО (хотя их число и ограничено), подтверждают, что их использование способствует существенному повышению экономической эффективности проектов обустройства в целом. В некоторых случаях применение системы УЛО определяет саму возможность технической реализуемости конкретного проекта.

Согласно определению [1], УЛО представляет собой совокупность мероприятий, направленных на изменение текущей ледовой обстановки с целью снижения частоты и степени опасности ледовых

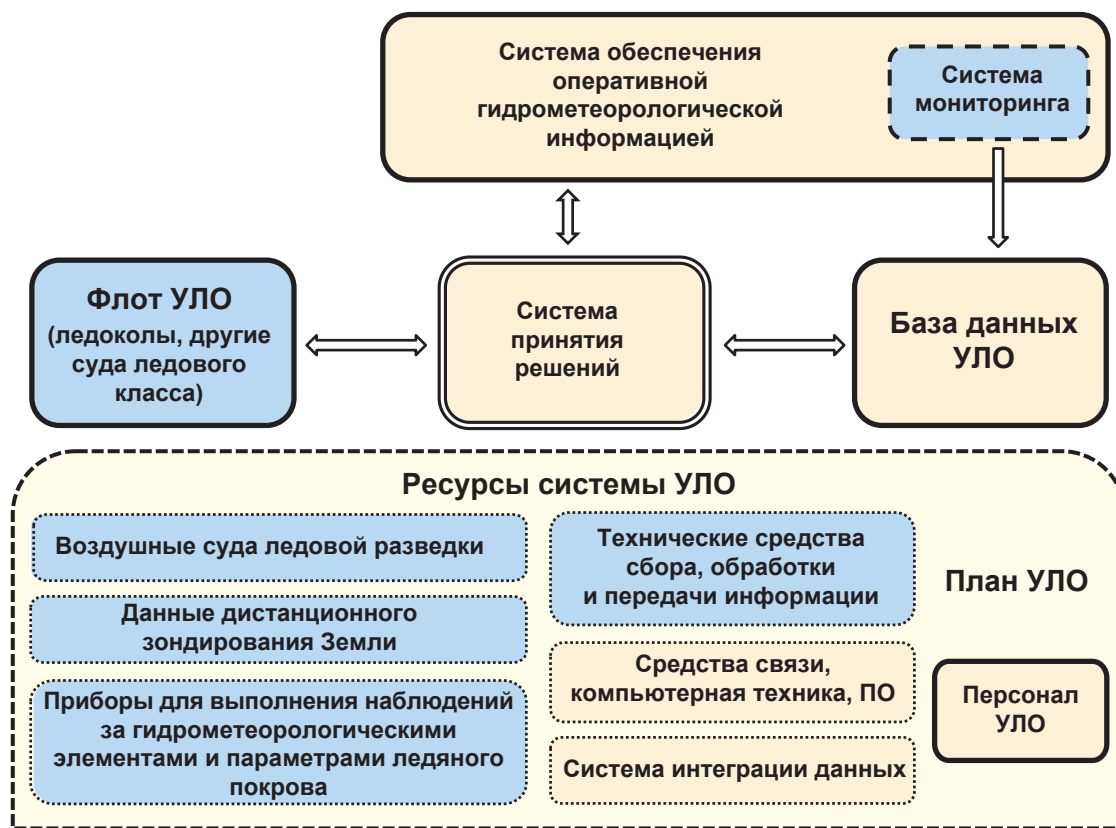


Рис. 1. Принципиальная схема структуры системы УЛО [1]
 Fig. 1. Schematic diagram of ice management system [1]

воздействий. Очевидно, что для практической реализации мероприятий УЛО необходима организационная структура, естественным вариантом названия которой является зафиксированный в [1] термин «система УЛО», определяемый как «совокупность технических и организационных средств, а также специализированного персонала, предназначенных для управления ледовой обстановкой на основе ведения ледовой разведки и оценки ледовых угроз».

Использование систем УЛО направлено на решение следующих основных задач:

- снижение рисков для морских инженерных сооружений и операций на шельфе Арктики и замерзающих морей путем создания многоуровневой защиты и своевременного оповещения участников проекта об опасных ледовых и связанных с ними гидрометеорологических условиях;
- выработка тактических решений для всего диапазона возможных типов ледовой обстановки и сценариев воздействия ледяного покрова и айсбергов на морские нефтегазопромысловые сооружения (МНГС) и проведение морских работ;
- активное воздействие на ледовую обстановку в районе эксплуатации МНГС (включая изменение траекторий айсбергов и дробление ледяных полей до размеров, приемлемых для обеспечения безопасности защищаемого объекта или защищаемой операции).

Решение поставленных задач достигается с помощью непрерывного контроля, анализа, прогнозирования развития ледовой и гидрометеорологической обстановки, при этом проектируемая система УЛО должна уверенно функционировать в широком спектре ледовых условий.

На рис. 1 приведена общая структура системы УЛО, которая включает в себя большое количество элементов различного функционального назначения и технического содержания.

В настоящей работе на основании открытых источников анализируется применимость и эффективность отдельных технических средств, используемых в мероприятиях УЛО — «материальный» компонент системы УЛО (отмечены на рис. 1 голубым цветом). Следует отметить, что публикации по этому вопросу крайне ограничены, при этом в основном международном нормативном документе по тематике УЛО [3] не содержится какой-либо информации об ожидаемой эффективности применения указанных средств. Предлагаемая работа призвана в некоторой степени заполнить этот пробел.

Состав технических средств, применяемых в мероприятиях УЛО

Специализированные технические средства и технологии, применяемые в операциях/мероприятиях УЛО, отвечают за надежную идентификацию ледяных образований и оценку их массогабаритных

характеристик, определение их местоположения и прогноз их перемещения, уверенное воздействие на них с целью уменьшения размеров (дробление ледяных полей) и изменения траекторий (отклонение айсбергов от защищаемых МНГС).

Подробное описание разнообразных сенсоров и технических средств, которые потенциально могут быть использованы в составе систем УЛО, представлено в [4; 5]. В зависимости от платформ размещения наблюдения могут выполняться с судов, вертолетов (самолетов), с помощью установленных радиомаяков, судовых радаров; спутниковых снимков. Очевидно, что аспект эффективности применения указанных средств является чрезвычайно важным в практическом плане, что в частности нашло отражение в положениях нового российского стандарта [1].

В [6] на основе изучения опыта операций, реализованных в рамках систем УЛО, а также экспериментов по воздействию на ледяные образования в условиях дрейфующего ледяного покрова и айсбергов [7—19] (табл. 1) сделан вывод, что следующие технологии и методы являются «ключевыми» и составляют тот минимальный набор средств сбора и анализа информации о природной среде, без которого невозможна реализация операций УЛО:

- снимки с искусственных спутников Земли (ИСЗ) различного диапазона (в первую очередь радиолокационные);
- морские/«ледовые» радары;
- прогнозы погоды и ледовых условий;
- группа ледовых экспертов на борту судов УЛО и/или МНГС;
- судовые метеостанции / визуальные наблюдения.

В [6] также указано, что в дополнение к «обязательному» минимальному перечню «ключевых технологий» во многих случаях могут применяться (в различных сочетаниях) и другие технические средства. Следует отметить, что большинство перечисляемых «дополнительных» технологий имеет определенные ограничения по применению, которые рассматриваются далее на основе накопленного к настоящему времени опыта.

Видеокамеры различного назначения используются для фиксации общей ледовой обстановки вокруг защищаемого объекта или судна УЛО и воздействия льда на корпуса судов и МНГС, определения толщины льда, ширины проложенных каналов и т. п. [20; 21]. Опыт применения видеокамер в арктических условиях показал, что, несмотря на очевидную полезность этого типа оборудования, получаемая с его помощью информация крайне чувствительна к погодным явлениям (туман, снегопад и т. п.) и освещенности (день/ночь) [14; 21].

Вертолеты и беспилотные воздушные суда (БВС¹) обеспечивают ледовую разведку, фото- и видеофиксацию ледяных образований с помощью

аэрофотосъемки, построение изображений ледяного покрова с помощью лидарной, инфракрасной (ИК) и РСА съемки², в отдельных случаях — расстановку на лед радиомаяков/радиоотражателей. Поскольку применение вертолета в операциях УЛО зачастую невозможно (на МНГС и судах УЛО за исключением крупных ледоколов его негде размещать), учитывая стремительный прогресс в проектировании и производстве БВС различных классов, можно предположить, что в течение трех-пяти лет на рынок будет выведен аппарат, приспособленный для работы в арктических условиях и подходящий под задачи УЛО [22]. Известно, что такие работы в российской Арктике ведутся [23]. Основные требования к такому БВС таковы:

- вертикальный взлет и посадка;
- устойчивость к воздействию электромагнитных полей работающего судового электро- и радиоборудования;
- мощный двигатель, позволяющий совершать полет на большие расстояния, особенно в условиях встречного ветра и обледенения;
- возможность монтажа системы аэрофотосъемки (АФС) и системы переноски и сброса радиомаяков (и, возможно, электромагнитного (ЭМ) толщиномер льда).

Радиомаяки — устройства, оснащенные модулями GPS/ГЛОНАСС и связи; при установке на ледяном образовании передают информацию об изменении его координат (т. е. позволяют отслеживать его дрейф). Обширный и достаточно успешный опыт применения этого оборудования показывает, что надежное размещение и крепление радиомаяков на ледяном образовании (обеспечивающее продолжительную работу устройства) требует высадки на него оператора с вертолета или судна [24]. Известные из сообщений российских специалистов случаи размещения этих приборов на айсберги путем сброса с вертолета/БВС показывают недостаточную надежность/эффективность этого способа и малую продолжительность работы радиомаяков (обусловленную сложной формой айсбергов, тенденцией к их наклону вследствие таяния и скатыванию маяка в воду и т. п.). Проведенные в Канаде испытания по установке мини-маяков на айсберги с подвеса БВС показали, что среднее значение продолжительности работы этих устройств составило 46,3 ч, а медианное значение — 11,7 ч [25]. Эти величины близки к значениям, полученным в отечественной практике. В реальных операциях УЛО (при отсутствии вертолета, в условиях сумерек / полярной ночи и дрейфующего ледяного покрова и сильного ветра) установка радиомаяков может стать практически невыполнимой задачей (или радиомаяки могут быть установлены с БВС только на ровные поверхности ледяных полей).

В этой связи заслуживают внимания результаты исследований по применению судовых радаров (см.,

¹ Данная аббревиатура рекомендована к применению в ГОСТ Р 57258—2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения.

² Съемка с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой, размещаемого на спутниках.

Таблица 1. Состав методик и оборудования, применявшихся в операциях по управлению ледовой обстановкой
Table. 1. List of methods and equipment used in ice management operations

Проекты с реализацией мероприятий УЛО	Снимки ИСЗ	Вертолет	Самолет	БВС	Видеокамеры (цифровые фотоаппараты)
ACEX-2004 [7]	Снимки ИСЗ (SAR)	Ледовая разведка, расстановка радиомаяков и радиотраектелей	—	—	—
OATRC 2015 [8—11]	Снимки ИСЗ (разные диапазоны)	АФС, расстановка радиомаяков	—	АФС	Наблюдение за ледяным покровом
Научное бурение в море Баффина, 2012 г. [12]	Снимки ИСЗ (разные диапазоны)	—	—	—	Цифровой фотоаппарат (определение размера айсберга)
Буксировки айсбергов в российской Арктике 2016—1917 гг. [13—15]	Снимки ИСЗ (SAR)	2017 г., АФС, расстановка р/маяков	—	АФС	Наблюдение за ледяным покровом / айсбергом
Бурение в Карском море, 2014 г. [16]	Снимки ИСЗ (SAR)	—	Ледовая разведка РЛС БО	Установка радиомаяков	Да
Бурение в западной Гренландии, Fylla, 2000 г. [17]	Снимки ИСЗ (SAR)	—	1 авиаразведка	—	—
Операции УЛО на Ньюфаундленской банке [18]	Снимки ИСЗ (SAR)	—	Ледовая разведка РЛС БО	—	Да
Бурение в западной Гренландии (2007—2012 гг.), Cairn Energy PLC [19]	Снимки ИСЗ (SAR)	—	—	—	Да

например, [8; 26]), где продемонстрировано, что данных судовых радаров во многих случаях вполне достаточно для определения дрейфа льда, а в [27] показано, что точность определения дрейфа льда с их помощью сравнима с точностью работы радиомаяков. На наш взгляд, это весьма ценная информация, поскольку при отсутствии вертолета расстановка радиомаяков на удалении от бурового судна / МНГС в условиях дрейфующего льда может быть выполнена, вероятно, только с помощью судна на воздушной подушке. Использование водных мотоциклов (для открытой воды) или снегохода (для льда сплоченностью 9—10 баллов) гипотетически также возможно, однако риски их приме-

нения во время реальных операций по дроблению льда (например, в условиях метели или сумерек) могут многократно превосходить получаемую выгоду. В любом случае применение перечисленного оборудования создает дополнительные проблемы с его хранением и эксплуатацией.

Ледовая авиаразведка с применением радиолокационной станции бокового обзора (РЛС БО) выполняется с использованием самолета, позволяет получать информацию о размерах ледяных полей, сплоченности и возрасте (толщине) ледяного покрова по маршруту полета. Возможно выполнение в условиях низкой облачности или тумана. Хотя получаемая информация и близка по ка-

	ИК-камеры	ЭМ-измерители толщины льда	Морской/«ледовый» радар	Радиомаяки	Прогнозы погоды и ледовых условий	Группа экспертов	Метеостанция / визуальные наблюдения	Оборудование для буксировки айсбергов
	—	—	Измерение дрейфа льда с помощью отражателей	Измерение дрейфа льда	Да	Да	Локальный ветер / видимость	—
	—	(Толщина льда)	Измерение дрейфа льда	Измерение дрейфа льда	Да	Да	Локальный ветер / видимость	—
	Определение обломков айсберга	—	Измерение дрейфа льда	—	Да	Да	Локальный ветер / видимость	—
	Да	—	Определение айсберга и его дрейфа	Измерение дрейфа айсберга	Да	Да	Локальный ветер / видимость / волнение	Да
	Да	—	Измерение дрейфа льда	Измерение дрейфа льда	Да	Да	Локальный ветер / видимость / волнение	Да
	—	—	Определение айсберга и его дрейфа	—	Да	Да	Локальный ветер / видимость / волнение	Да
	—	—	Определение айсберга и его дрейфа	—	Да	Да	Локальный ветер / видимость / волнение	Да
	—	—	Определение айсберга и его дрейфа	—	Да	Да	Локальный ветер / видимость / волнение	Да

честву к спутниковой (снимки в радиолокационном диапазоне), ее получение гораздо более трудоемко, затратно по времени и требует специализированного воздушного судна, оснащенного современной РЛС БО, опытных экипажей, наземного обеспечения (аэродромы, техническое обслуживание и т. п.). Эта технология является штатной при мониторинге ледяного покрова и айсбергов в районе Ньюфаундленд/Лабрадор [18], что объясняется близостью аэродромов базирования к районам наблюдения за айсбергами. В последние 20 лет в России известны единичные случаи ее применения, что обусловлено различными факторами, в том числе высокой стоимостью и малой востребованностью. Эта технология

в определенном смысле является конкурирующей со спутниками, оснащенными РЛС (радары с синтетической апертурой), при этом, возможно, она может быть реализована до запуска достаточного количества отечественных ИСЗ подобного класса, позволяющих получать снимки ледяного покрова необходимого качества в условиях облачности и полярной ночи. Изучение всех аспектов параллельного применения двух указанных методик требует отдельного специализированного исследования.

ЭМ-толщиномер используется для дистанционного измерения толщины морского льда электромагнитным методом, при работе с воздушного судна позволяет выполнить измерения на больших поли-

Научные исследования в Арктике

гонах. Точность измерения толщины ровного льда составляет $\pm 0,1$ м. Хорошо зарекомендовавший себя и широко применяемый ЭМ-толщиномер типа EM-bird вследствие своих размеров и веса (длина 3,5 м, вес 105 кг) используется на подвесе, размещаемом на вертолете или легкомоторном самолете [28]. Прибор имеет зарубежное происхождение, что может вызвать трудности с его закупкой и поставкой в Россию. Очевидно, что для определения толщины дрейфующего льда с помощью аппаратов такого типа потребуется более компактный/легкий прибор отечественной разработки, устанавливаемый на перспективном БВС (см. выше). Можно предположить, что до надежного решения этих задач практическое применение данной технологии для целей УЛО находится под вопросом. Следует отметить, что проведенные в Канаде эксперименты по определению осадки айсбергов с размещенной на БВС компактной модификацией георадара, способной определять толщину льда до 150 м, показали потенциальную возможность применения этой методики [25] в операциях УЛО. Однако в рассмотренном случае работы были ограничены временем полета БВС (15—25 мин), что пока делает невозможным использование этой технологии на значительном удалении от оператора БВС, а значит, и полеты по маршрутам на обширных полигонах съемки (для измерения толщины дрейфующего льда).

ИК-камеры (инфракрасный диапазон длин волн) определяют температурные контрасты в темное время суток — например, на айсберге или его обломке на открытой воде. Испытания различных средств наблюдения за ледяными образованиями, проведенные в Карском море [14], показали, что вероятность обнаружения айсбергов в средних условиях на дистанции до 4,5 км не превышала 33%, на дистанции более 4,5 км — 14%. При этом в морских арктических условиях использование ИК-камер сильно ограничено неблагоприятными погодными явлениями (туман, дымка, метели) и условиями низкой освещенности. По мнению проводивших испытания специалистов, реальные дистанции обнаружения обломков айсбергов составляют 500—1000 м, при этом значительное влияние на успешность идентификации оказывает волнение моря. Полученные результаты позволяют утверждать, что ИК-камеры могут быть использованы только в качестве дублирующих средств мониторинга.

Кроме того, в публикациях, описывающих гипотетическую архитектуру и техническое наполнение систем УЛО [4; 5], указываются два метода, пока не нашедших подтверждения в реальной практике УЛО, — применение подводных необитаемых аппаратов и автоматических донных станций.

Подводные необитаемые аппараты обеспечивают информацией об осадке и форме подводной части ледяных образований (в случае оснащения гидролокаторами бокового обзора). Известно о разработке и успешных испытаниях подобных устройств для научных целей за рубежом [29], в России они

пока не распространены и в большинстве случаев находятся в стадии разработки и тестирования [30]. Использование в оперативной практике УЛО (дрейфующий ледяной покров различной сплоченности) оборудования подобного типа пока не описано в технической литературе. Предположительно использование подобных аппаратов в российской Арктике потребует серьезных согласований с Министерством обороны.

Автоматические донные станции в зависимости от оснащения приборами могут получать информацию о волнении, колебаниях уровня, течениях в водной толще, осадке подводной части ледяных образований (при комплектации вверху смотрящим сонаром). Несмотря на очевидную полезность такой информации, ее передача в реальном времени на МНГС или суда УЛО потребует либо прокладки линии связи на дне, либо использование подводного модема. Вероятно, это может осложнить применение данного типа оборудования, особенно в условиях дрейфующего льда.

Перспективным представляется способ измерения параметров дрейфа льда с помощью инерциальных измерительных блоков (чувствительными элементами которых являются акселерометры), размещенных на корпусе судна ледового класса [31]. Это оборудование позволяет отследить вибрации корпуса и через установленные соотношения переходить к определению компонентов дрейфа ледяного покрова. Подход представляется разумным, и при его дальнейшем развитии подобная «всепогодная» измерительная система, работающая в режиме 24/7/365, может рассматриваться в качестве резервной («дублирующей») в будущих операциях УЛО.

Оценки эффективности мероприятий по управлению ледовой обстановкой

Способы воздействия на айсберги и ледяной покров в целом достаточно хорошо известны [1; 18; 32]. В первом случае целью операции является изменение траектории дрейфа айсберга, движущегося на защищаемый объект (МНГС), а во втором — разрушение ледяных полей на более мелкие фрагменты (для уменьшения давления льда на защищаемый объект). Основная задача УЛО в отношении плавучего объекта формулируется как предотвращение остановки бурения или добычи и отсоединения объекта от райзеров (что неизбежно выражается в связанной с повторной постановкой на точку бурения или добычи потерей времени, которая может выражаться в неделях). Наибольшее развитие эта технология получила в Канаде на шельфе острова Ньюфаундленд, где региональная система УЛО обеспечивает снижение вероятности (а фактически предотвращение) навала айсбергов на плавучие МНГС и стационарные айсбергостойкие платформы.

Изучение опыта УЛО применительно к айсбергам и ледяному покрову выявило серьезные различия в объеме и доступности информации, детальности документирования процедур и результатов, оценках

эффективности применения методов УЛО. Имеющиеся в свободном доступе публикации по вопросу дробления ледяных полей не содержат надежных количественных оценок эффективности процедур, основанных на массовом материале, — в отличие от ситуации с операциями по активному воздействию на айсберги. Можно предположить, что причина этого состоит в различии подходов к получаемой информации у государственных компаний (отклонение айсбергов, Канада) и коммерческих организаций (испытания по дроблению ледяного покрова).

Реализация УЛО в случае угрозы от дрейфующих айсбергов

В целом канадская практика УЛО в отношении айсбергов определяет два вида успешности этих мероприятий [18]:

- операционный успех: буксировка считается успешной, если удалось избежать потери времени добычи или бурения;
- технический успех: удалось добиться изменения курса дрейфа айсберга относительно опасного (исходного) направления на величину не менее 5°.

В соответствии с определением понятия УЛО успешность применения комплекса мероприятий по воздействию на айсберг равнозначна в данном случае понятию «операционный успех». Согласно [18], в районе Ньюфаундленда количество полностью успешных операций достигает в случае «операционного успеха» 99,4%, а в случае «технического успеха» — 85,3% (всего было рассмотрено 1888 операций по отклонению айсбергов в первом случае и 1620 во втором). Следовательно, только в 0,6% случаев, когда айсберг угрожает защищаемому объекту, потенциально существует риск, что его работу необходимо прерывать. Невозможность своевременно отбуксировать айсберг может привести к его навалу на МНГС, что чревато повреждениями; близкая к подобной ситуация (приближение айсберга к МНГС на расстояние менее 200 м) произошла на шельфе Ньюфаундленда в марте 2017 г. [33].

Приведенные оценки эффективности характеризуют только один район Мирового океана (Ньюфаундлендская банка), где наблюдаются преимущественно безледные или легкие ледовые условия. Очевидно, что наличие ледяного покрова различных возрастов и сплоченности являются осложняющим фактором, однако на этот счет отсутствуют надежные оценки. Выполненные в 2004—2005 гг. Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом пробные буксировки айсбергов в Баренцевом море в условиях ледяного покрова потребовали их выкалывания из льда и расчистку акватории («канала»), в которой они буксировались [34]. Несколько успешных буксировок айсбергов, выполненных в рамках обширных экспериментов 2017 г., проводились в начальный период ледообразования в окружении блинчатых льдов и серого льда (толщиной до 10 и 15—20 см соответственно) различной сплоченности [15]. При этом результа-

ты моделирования в ледовом бассейне процесса буксировки айсбергов в однолетнем льду средней толщины (70—120 см в природных условиях) показывают, что при сплоченности льда более 50% буксировка невозможна, а для буксировки во льду сплоченностью 20—50% потребуются канаты более прочные, чем выпускаются современной промышленностью [35]. Моделируемая толщина льда в этом эксперименте соответствовала натурной толщине 112—128 см. Подтверждение или опровержение этих результатов возможно только экспериментальным путем, однако до настоящего времени о натуральных экспериментах не сообщалось.

В [18] приведены оценки результативности применения различных способов изменения курса (отклонения) айсбергов. Наиболее успешными методами воздействия на айсберги являются буксировка канатом или сетью (86% «технически успешных» операций) и применение водяной пушки — 82% (однако количество задокументированных случаев ее применения невелико — 56). Можно предположить, что в условиях российской Арктики/Субарктики использование водяной пушки будет сильно ограничено погодными условиями из-за угрозы обледенения. Можно предположить, что основным способом изменения траектории дрейфа айсбергов будет буксировка канатом или сетью, а резервным («экстренным») вариантом будет метод «работы винтами» (успешность около 80%).

Погодные условия — важный фактор, определяющий возможность/эффективность воздействия на айсберги. Чем ниже высота волны, тем успешнее происходит буксировка айсберга. Анализ практики УЛО в районе Ньюфаундленда показывает, что наибольшая успешность этой операции (83,0—88,5%) зафиксирована для состояний моря с высотой значительных волн (среднее значение высоты трети наибольших волн, что соответствует 13%-ной обеспеченности) от 0,1 до 4 м. При высотах волн 4—5 м результативность снижается до 74%. Известно о шести успешных буксировках, выполненных при волнении 5—6 м [18]. Лимитирующим значением *высоты значительных волн* при отклонении айсбергов на шельфе Канады считается 6 м [36]. Источник [18] объясняет это ограничение тем, что буксировки при высоте волны более 6 м практически не производились, а также ненадежностью определения волнения в таких условиях (представляющих, кроме того, очевидную опасность для палубной команды). В этой связи можно отметить, что выполненные эксперименты по буксировке в российской Арктике показали, что операция может выполняться при скоростях ветра порядка 20 м/с и даже более [13].

Реализация УЛО в случае дрейфующего льда

Анализ доступных источников по осуществлению операций УЛО в дрейфующем льду установил, что наиболее эффективной, вероятно, можно назвать методику, предложенную в [9]. В этой работе на

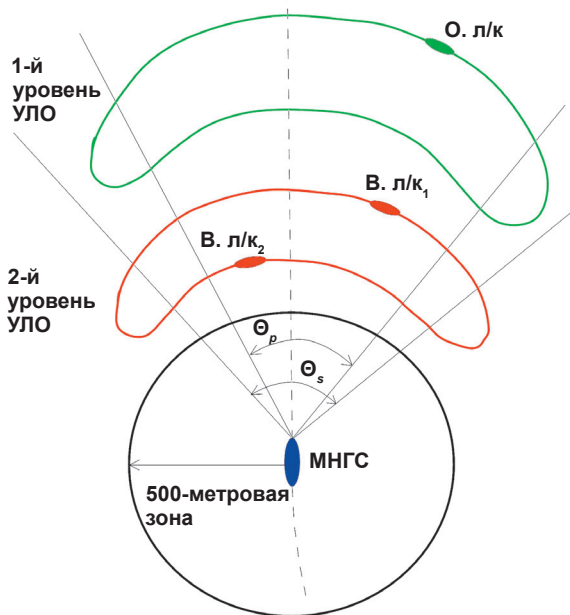


Рис. 2. Двухуровневая схема дробления льда по «изогнутым петлям» [9]

Fig. 2. Two-level scheme for crushing ice with arched racetrack pattern [9]

основании данных натурных испытаний двух ледоколов («Oden», «Frej», экспедиция OATRC2015) осуществлено моделирование «секторной» схемы дробления ледяного покрова по траекториям, имеющим форму «изогнутых петель» (рис. 2), и делается вывод, что наибольший эффект УЛО достигается путем использования трех ледоколов.

Использование секторной схемы дробления льда по «изогнутым петлям» позволяет гибко адаптировать ее в случае изменения параметров дрейфа льда:

- петли можно укоротить (уменьшая углы θ_p и θ_s) для увеличения количества проходов ледоколов и, следовательно, для увеличения сокращения размеров ледяных полей — в случае большой скорости дрейфа льда;
- петли можно расширить (увеличивая углы θ_p и θ_s) для компенсации неопределенности в направлении дрейфа льда в случае уменьшения его скорости;
- петли можно четко позиционировать относительно бурового судна или МНГС, основываясь на измерениях скорости дрейфа льда и кривизны его траектории.

Испытания показали, что для осуществления подобной схемы УЛО не требуется заблаговременный прогноз дрейфа льда, достаточно прямых измерений во время испытаний. Более того, сопоставление данных о дрейфе льда, полученных с радиомаяков, выставляемых на лед, и данных, получаемых с помощью судовых радаров, показывает, что использование последних для определения дрейфа льда является вполне достаточным [8; 26].

Предлагаемая схема работы ледоколов (см. рис. 2) разрабатывалась с учетом следующих важных условий [9]:

- Вокруг бурового судна или МНГС поддерживается 500-метровая «зона безопасности» (т. е. операции УЛО проводятся на расстоянии максимально близко, но не нарушающем принятые в современных нормах требования по минимальному расстоянию между судами) [37].
- Поддерживается расстояние не менее 200 м между траекториями главного ледокола («по дрейфу») и вспомогательного ледокола («против дрейфа») для обеспечения безопасности. Для исключения риска столкновения ледоколов лоб в лоб движение главного ледокола выполняется по часовой стрелке, а вспомогательного — против часовой стрелки, в результате чего оба ледокола двигаются одновременно в одну сторону в месте их наибольшего сближения.
- Возможна корректировка положения траектории движения «по дрейфу» обоих ледоколов на ± 100 м для оптимизации сокращения размеров ледяных полей (т. е. избежание излишних проходов ледоколов вдоль созданного ранее канала во льду).
- Использование 200-метрового радиуса поворота на концах искривленных петель (основано на предположении, что ледоколы типа «Oden» могут легко выполнить поворот с таким радиусом). Этот момент необходимо согласовать с конструкторами или судоводителями российских судов, выбранных для осуществления УЛО, и в случае несоответствия этому требованию внести необходимые изменения в схему.

Изучение доступных источников по операциям УЛО в условиях дрейфующего льда не выявило к настоящему времени каких-либо надежных количественных оценок их эффективности. Опубликованные оценки являются качественными, что, по-видимому, обусловлено пока недостаточной изученностью вопроса, а также, возможно, защитой коммерческих интересов. Предварительная оценка эффективности процедур дробления ледяных полей, представленная ниже, базируется на результатах работ [9; 10].

Результаты моделирования в кинематическом симуляторе мероприятий УЛО «ICEMAN» на основе данных эксперимента OATRC2015 показали, что виртуальное использование трех ледоколов равной мощности и ледопроеходимости (основной ледокол полярного класса плюс два вспомогательных ледокола) потенциально позволяет существенно уменьшить размеры остаточных ледяных полей по сравнению с реальными результатами, полученными в натурном эксперименте [9]. Напомним, что в эксперименте OATRC2015 «Oden» (24,5 тыс. л. с.) выполнял роль основного ледокола, а «Frej» (25 тыс. л. с.) — роль вспомогательного.

Моделирование показало, что дробление льда по «изогнутым петлям» (см. рис. 2 и 3г) приводит

к снижению размеров остаточных ледяных полей до значений менее 100 м (с наиболее часто встречающимися градациями 20—40 м и 40—60 м). При этом доля тертого льда (менее 2 м в поперечнике) в этом случае превышает 45%. В целом полученные путем численного моделирования результаты могут восприниматься с определенным оптимизмом, но, безусловно, должны быть удостоверены экспериментами в ледовом бассейне и натурными экспериментами в реальных ледовых условиях.

Авторы работы [10] провели численный эксперимент в симуляторе SAMS (Simulator for Arctic Marine Structures) с моделированным ледяным покровом и единственным ледоколом, являющимся «цифровым двойником» ледокола «Oden». Движение ледокола при моделировании в симуляторе задавалось траекториями четырех типов (рис. 3) — «восьмерка», «арена», «круг» и «изогнутая петля».

Анализ результатов моделирования показал, что наиболее эффективной траекторией работы ледокола при значениях скорости дрейфа льда 0,1, 0,2 и 0,3 м/с является «изогнутая петля» (хорошо зарекомендовавшая себя в полевых испытаниях OATRC2015). Однако работа по такой траектории является и наиболее энергос затратной. Эффективным (в смысле размеров остаточных полей) при скорости дрейфа льда 0,1 м/с оказалось также использование траекторий типов «арена» и «круг». С точки зрения ожидаемых нагрузок на защищаемое сооружение траектория «восьмерка» эффективна при скоростях дрейфа 0,1 и 0,2 м/с, а «арена» — при скоростях 0,2 и 0,3 м/с. Результаты рассмотренного численного эксперимента показывают, что в зависимости от наблюдаемых скоростей дрейфа льда существуют альтернативные варианты применения различных схем движения ледокола для достижения наиболее эффективного дробления ледяного покрова.

Выводы

1. Анализ операций по обеспечению мероприятий УЛО в условиях дрейфующих льдов и айсбергов позволил сформировать перечень необходимых технологий и оборудования и определить минимально необходимый набор средств для проведения подобных операций («ключевые технологии»).

2. Ряд технологий, потенциально востребованных в качестве компонентов системы мониторинга в системе УЛО (подводные необитаемые аппараты, донные станции, оснащенные вверхсмотрящими сонарами, размещение на корпусе судов инерциальных измерительных блоков), пока не вошел в практику УЛО вследствие сложности передачи данных наблюдений на пункт приема или из-за недостаточной проработанности методик.

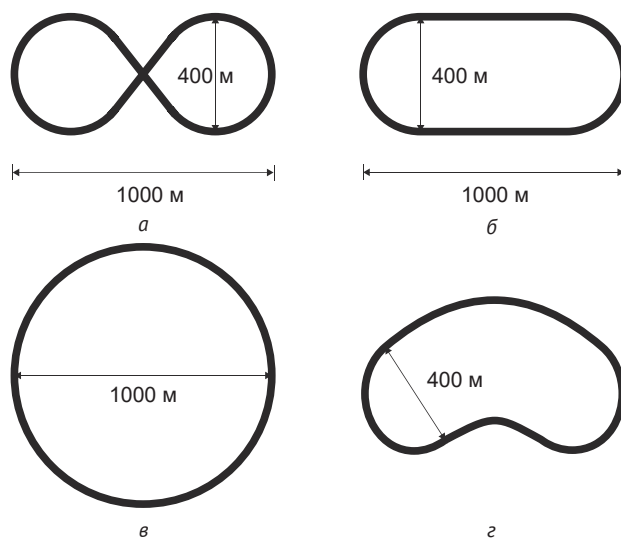


Рис. 3. Типы траекторий ледокола, использовавшихся при моделировании в симуляторе SAMS: «восьмерка» (а), «арена» (б), «окружность» (в), «изогнутая петля» (г) [10]

Fig. 3. Types of the icebreaker IM patterns used for SAMS simulations: figure-8, circular and arched racetrack [10]

3. Известные к настоящему времени способы установки радиомаяков на айсберги требуют либо высадки специалиста на объект (для надежного закрепления устройства), либо сброса маяка с вертолета или БВС. В последнем случае время работы маяка (1—3 сут) может быть недостаточным для обеспечения мероприятий УЛО из-за его потери вследствие крена и/или переворачивания айсберга.

3. Подтвержденный практикой способ определения дрейфа ледяного покрова и айсбергов с помощью судовых РЛС (которые являются штатным судовым оборудованием, способным к работе в режиме 24/7/365 в любых условиях) показывает достаточность этой методики для заявленных целей и ее высокую точность, что делает необязательным применение радиомаяков в качестве основного средства определения дрейфа в операциях УЛО. Отказ от использования радиомаяков облегчает и упрощает функционирование системы УЛО в реальных условиях Арктики/Субарктики (полярная ночь, дрейфующий ледяной покров, проблемы с расстановкой радиомаяков на ледяные образования в случае отсутствия вертолета).

5. Методы активного воздействия на айсберги эффективны на открытой воде, но до сих пор дискуссионным остается вопрос об их применимости в условиях дрейфующего однолетнего льда большой сплоченности.

6. Схема работы ледоколов по траекториям типа «изогнутая петля», обеспечивающая максимальное разрушение ледяных полей до размеров, приемлемых для безопасной работы МНГС или бурового судна, показывает хорошие «виртуальные» результаты, но должна быть подтверждена экспериментами в реальных ледовых условиях.

Литература/References

1. ГОСТ Р 71147—2023. Нефтяная и газовая промышленность. Арктические операции. Проектирование систем управления ледовой обстановкой. — М., 2024. — 82 с.
- GOST R 71147—2023. Oil and Gas Industry. Arctic Operations. Design of the Ice Management Systems. Moscow, 2024, 82 p. (In Russian).
2. Баренц-2020. Оценка международных стандартов для безопасной, разведки, добычи и транспортировки нефти и газа в Баренцевом море: Окончательный отчет по этапу 4. — М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2012. — 298 с.
- Barents 2020. Assessment of international standards for safe exploration, production and transportation of oil and gas in the Barents Sea. Final Report Phase 4. Moscow, Gazprom VNIIGAZ LLC, 2012, 298 p. (In Russian).
3. ISO 35104. Petroleum and natural gas industries — Arctic operations — Ice management. [S. I.], 2018, 104 p.
4. Eik K. Review of Experiences within Ice and Iceberg Management. *J. of Navigation*, 2008, 61, pp. 557—572. DOI: 10.1017/S0373463308004839.
5. Eik K., Løset S. Specifications for a subsurface ice intelligence system. Proc. ASME 2009, 28th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31—June 5, 2009, Honolulu, USA, 7 p. DOI: 10.1115/OMAEE2009-79606.
6. Бузин И. В., Онищенко Д. А. К вопросу определения состава технических средств и оценки эффективности мероприятий по управлению ледовой обстановкой в проектах добычи и отгрузки углеводородов на арктическом шельфе // RAO/CIS OFFSHOTE 2023. — С. 30—34.
- Buzin I. V., Onishchenko D. A. On the question of determining the set of technical means and evaluating the efficiency of ice management operations in projects of hydrocarbon recovery and transportation on the Arctic shelf. Proc. RAO-2023, pp. 30—34. (In Russian).
7. Moran K., Backman J., Farrell J. W. Deepwater drilling in the Arctic Ocean's permanent sea ice. Proc. IODP, 302. Edinburgh (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.), 2006, 13 p. DOI: 10.2204/iodp.proc.302.106.2006.
8. Lubbad R., Løset S., Lu W., Tsarau A., van den Berg M. An overview of the Oden Arctic Technology Research Cruise 2015 (OATRC2015) and numerical simulations performed with SAMS driven by data collected during the cruise. *Cold Reg. Sci. and Tech.*, 2018, 156, pp. 1—22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions>.
9. Holub C., Matskevitch D., Kokkinis T., Shafrova S. Near-field ice management tactics — Simulation and field testing. *Cold Reg. Sci. and Tech.*, 2018, 156, pp. 23—43. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.02.003>.
10. Bjørnø J., van den Berg M., Lu W., Skjetne R., Lubbad R., Løset S. Performance quantification of icebreaker operations in ice management by numerical simulations. *Cold Reg. Sci. and Tech.*, 2022, 194, 19 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103435>.
11. Mitchell D. A., Shafrova S. Application of a free drift tactical ice forecast model in pack ice conditions. *Cold Reg. Sci. and Tech.*, 2018, 156, pp. 88—101. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.02.002>.
12. Fournier N., Nilsen R., Turnbull I., McGonogal D., Fosnaes T. Iceberg Management Strategy for Baffin Bay 2012 Scientific Coring Campaign. Proc. 22th Intl. Conf. on Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions, 2013, June 09—13. Espoo, Finland, 10 p.
13. Kornishin K. A., Efimov Y. O., Gudoshnikov Yu. P., Tarasov P. A., Chernov A. V., Svistunov I. A., Maksimova P. V., Buzin I. V., Nesterov A. V. Iceberg Towing Experiments in the Barents and Kara seas in 2016—2017. *Intl. J. of Offshore and Polar Eng.*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 400—407. DOI: 10.17736/ijope.2019.jc768.
14. Павлов В. А., Корнишин К. А., Тарасов П. А. и др. Опыт обнаружения и оценки размеров айсбергов на акватории юго-западной части Карского моря в 2012—2017 гг. // Нефтяное хоз-во. — 2018. — № 12. — С. 82—87. — DOI: 10.24887/0028-2448-2018-12-82-87.
- Pavlov V. A., Kornishin K. A., Tarasov P. A., Efimov Ya. O., Gudoshnikov Yu. P., Smirnov V. G., Naumov A. K., Gavrillov Yu. G., Skutin A. A., Nesterov A. V. Experience in Monitoring and Sizing Up of Icebergs and Ice Features in the South-Western Part of Kara Sea During 2012—2017. *Oil Industry J.*, 2018, no. 12, pp. 82—87. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-12-82-87. (In Russian).
15. Efimov Y. O., Kornishin K. A., Sochnev O. Ya., Gudoshnikov Yu. P., Nesterov A. V., Svistunov I. A., Maksimova P. V., Buzin I. V. Iceberg Towing in Newly Formed Ice. *Intl. J. of Offshore and Polar Eng.*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 408—414.
16. Viking Ice Consultancy. Available at: https://www.bluemaritimecluster.no/download?objectPath=/upload_images/04BF98A4DBFB4CE79E69CAB8F6CB74B6.pdf.
17. Greenland Iceberg Management: Implications for Grand Banks Management Systems. PERD/CHC Rep. 20-65, March 2002, 171 p.
18. 2016 PERD Iceberg Management Database Update-V01. 2017, 72 p.
19. Managing Pack Ice and Icebergs. Offshore Technology, London, UK, Jan. 2011, pp. 16—17. Available at: https://www.andrewsafer.com/Safer_Ice_Management.pdf.
20. Афанасьева Е. В., Сероветников С. С., Алексеева Т. А. и др. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2022. — Т. 68, № 2. — С. 96—117. — URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>.
- Afanasyeva E. V., Serovetnikov S. S., Alekseeva T. A., Grishin E. A., Solodovnik A. A., Filippov N. A. Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television com-

- plex for operational hydrometeorological support of maritime activities. *Arctic and Antarctic Res.*, 2022, vol. 68, iss. 2, pp. 96—117. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>. (In Russian).
21. *Brown J., King M., Briggs R., Yulmetov R.* Evaluation of Near-Ship Ice Conditions from Ship Bourne Sensors. Proc. 23rd Intl. Ocean and Polar Eng. Conf., Ottawa, Canada, June 19—23, 2023, pp. 1901—1908.
22. *Заквасин А.* Аэрогибриды для Заполярья: разработчики БПЛА — о дронах для ледовой разведки и экомониторинга в Арктике. — URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1088605-bespilotniki-arktiki-airburg-ledokoly>. *Zakvaksin A.* Aerohybrids for the Polar regions: the UAV engineers — on drones for the ice reconnaissance and ecological monitoring in the Arctic. Available at: <https://russian.rt.com/russia/article/1088605-bespilotniki-arktiki-airburg-ledokoly/>. (In Russian).
23. В Арктике впервые в мире осуществлен полет БПЛА с атомного ледокола. — URL: <https://atom-media.online/2023/09/11/v-arktike-vpervye-v-mire-osushhestvlyon-p/>. The first flight of the drone from the nuclear icebreaker took place in the Arctic. Available at: <https://atom-media.online/2023/09/11/v-arktike-vpervye-v-mire-osushhestvlyon-p/>. (In Russian).
24. *Бузин И. В., Нестеров А. В.* Ледовые нагрузки: отследить и предупредить. Основные результаты исследований дрейфа ледяных образований с помощью радиомаяков в морях российского арктического шельфа // NEFTEGAZ.RU. — 2018. — 1. — С. 16—23. *Buzin I. V., Nesterov A. V.* Ice loads: to track and to prevent. The main results of the ice features drift studies by using the radiobeacons in the seas of the Russian Arctic. NEFTEGAZ.RU, 2018, 1, pp. 16—23. (In Russian).
25. *Briggs R., Thibaut C., Mingo L., King T.* Usage of UAVs for surveying and monitoring icebergs. *The J. of Ocean Technology*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 48—57.
26. *Holub C., Matskevitch D., Yanni V., Shafrova S., Kokkinis T.* Ice drift tracking using photogrammetric methods on radar data. Proc. 27th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE), San Francisco, USA, June 25—29, 2017, pp. 1338—1342.
27. *Kjerstad Ø. K., Løset S., Skjetne R., Skarbø R. A.* An Ice-Drift Estimation Algorithm Using Radar and Ship Motion Measurements. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, vol. 56, iss. 6, pp. 3007—3019, DOI: 10.1109/TGRS.2017.2787996.
28. *Haas C., Lobach J., Hendricks S., Rabenstein L., Pfaffling A.* Helicopter-borne measurements of sea ice thickness, using a small and lightweight, digital EM system. *J. of Applied Geophysics*, 2009, vol. 67, iss. 3, pp. 234—241. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.05.005>.
29. *Norgren P.* Autonomous underwater vehicles in Arctic marine operations. Arctic marine research and ice monitoring. Philos. Doctor Thesis, NTNU, Trondheim, Sept. 2018, 179 p.
30. *Харченко Ю. А., Голядкина С. С., Кудрявцев И. А.* АНПА для арктического шельфа // NEFTEGAZ.RU. — 2021. — № 2 (110). — С. 94—97. *Kharchenko Yu. A., Golyadkina S. S. Kudryavtsev I. A.* AUV for the Arctic Shelf. NEFTEGAZ.RU, 2021, no. 2 (110), pp. 94—97. (In Russian).
31. *Heyn H.-M., Skjetne R.* Fast onboard detection of ice drift changes under stationkeeping in ice. *Cold Reg. Sci. and Tech.*, 2022, 196, 14 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103483>.
32. *Костылев А. И., Сазонов К. Е.* Мировой опыт изучения методов управления ледовой обстановкой // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 86—97. *Kostylev A. I., Sazonov K. E.* Study of World experience of ice conditions control. *Arctic: Ecology and Economy*, 2016, № 3 (23), pp. 86—97. (In Russian).
33. Enquiry report Ice Incursion Incident Searose FPSO, C-NLOPB, 2018, July, 80 p.
34. *Степанов И. В., Гудошников Ю. П., Бузин И. В.* Аprobация технологии буксировки айсбергов для защиты арктических морских платформ // Технологии ТЭК. — 2005. — № 4. — С. 20—26. *Stepanov I. V., Gudoshnikov Yu. P., Buzin I. V.* Approbation of technology of icebergs towing for protection of the Arctic offshore platforms. TEC Technologies, 2005, no. 4, pp. 20—26. (In Russian).
35. *Eik K., Marchenko A.* Model tests of iceberg towing. *Cold Reg. Sci. and Tech.*, 2010, 61, pp. 13—28. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.002>.
36. Ice Management for Structures in Sea Ice with Ridges and Icebergs. Vol. 1. State of the Art in Iceberg Management. C-CORE Rep. R-07-037-544, Oct. 2007, 125 p.
37. Федеральный закон «О континентальном шельфе Российской Федерации» от 30 ноября 1995 г. № 187-ФЗ. Federal Law “On Continental Shelf of the Russian Federation” by 30.11.1995 no. 187-F3. (In Russian).

Информация об авторах

Бузин Игорь Владимирович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, С.-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: buzin@aari.ru.

Онищенко Дмитрий Арсеньевич, кандидат физико-математических наук, начальник отдела, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (142717, Московская область, г. о. Ленинский, поселок Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1), e-mail: D_Onishchenko@vniigaz.gazprom.ru.

ISSUES OF APPLICABILITY AND EFFECTIVENESS OF INDIVIDUAL ELEMENTS OF THE ICE MANAGEMENT SYSTEM IN THE IMPLEMENTATION OF ARCTIC SHELF DEVELOPMENT PROJECTS

Buzin, I. V.¹, Onishchenko, D. A.²

¹ Federal State Budgetary Institution “Arctic and Antarctic Research Institute” (St. Petersburg, Russian Federation)

² Gazprom VNIIGAZ LLC (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on February 16, 2024

For citing

Buzin I. V., Onishchenko D. A. Issues of applicability and effectiveness of individual elements of the ice management system in the implementation of Arctic shelf development projects. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 205—216. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-205-216. (In Russian).

Abstract

In order to reduce the probability of dangerous impacts from ice cover and icebergs on offshore oil and gas production facilities, as well as to protect associated marine operations it is necessary to develop and implement so-called “Ice Management Systems” (IMS). The authors analyze the technologies and tools, used in practical ice management operations in various areas of the Arctic shelf, define the list of key technologies and consider the limitations of additional technologies. They assume that in real IM practice it is possible to abandon the technology of measuring the drift of ice formations using radio beacons in favor of measurements by vessel radars (“ice radars”). Based on open sources, the authors carry out a performance analysis of ice management (IM) operations to influence icebergs and drifting ice. Analysis of numerical simulation results allows them to select the most effective scheme for the operation of icebreakers when breaking the drifting ice.

Keywords: *ice management system, technologies, methods, ice cover, icebergs, effectiveness.*

Information about the authors

Buzin, Igor Vladimirovich, PhD of Geography, Senior Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: buzin@aari.ru.

Onishchenko, Dmitry Arsen'evich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department, Gazprom VNIIGAZ LLC (15, Gazovikov str., bld. 1, Razvilka, Leninsky municip., Moscow region, Russia, 142717), e-mail: D_Onishchenko@vniigaz.gazprom.ru.

@ Buzin I. V., Onishchenko D. A., 2024