

ПОДХОД К АНАЛИЗУ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЗАДЕРЖКУ В РЕАГИРОВАНИИ НА МОРСКИЕ РАЗЛИВЫ НЕФТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

С. Н. Зацепа¹, А. А. Ивченко¹, А. Ю. Книжников, В. В. Солбаков²

¹ Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова Росгидромета (Москва, Российская Федерация)

² Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 15 января 2023 г.

Для цитирования

Зацепа С. Н., Ивченко А. А., Книжников А. Ю., Солбаков В. В. Подход к анализу гидрометеорологических условий, определяющих задержку в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 3. — С. 369—381. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-369-381.

Описывается подход к проведению оценок задержки реагирования на нефтяные разливы, обусловленные гидрометеорологическими и географическими условиями в месте проведения работ. Для иллюстрации метода и обсуждения результатов проанализировано применение двух типов средств механического сбора нефти в ледовых и безлёдных условиях для двух пунктов трассы северного и южного маршрутов Северного морского пути. Получено, что значение времени завершения работ может превышать год с весьма значительной вероятностью. Предложенный анализ позволяет оценивать возможности повышения эффективности реагирования для существующих и вновь создаваемых стратегий ликвидации нефтяных разливов в регионе интереса, а также принимать иные меры по снижению рисков негативного воздействия аварийных разливов на арктические экосистемы.

Ключевые слова: нефтяные разливы, планы ликвидации разливов нефти, задержка реагирования, гидрометеорологические условия, окна погоды, окна возможности реагирования, Северный морской путь, математическое моделирование, статистические характеристики параметров окружающей среды, результаты реанализа метеорологических полей.

Введение

Обеспечение экологической безопасности при инцидентах, связанных с разливами нефти в Арктике, представляется актуальной задачей на фоне интенсификации хозяйственной деятельности вдоль трассы Северного морского пути (СМП). Несмотря на очевидный прогресс в области разработки средств реагирования на разливы, во многих случаях успешность операций по сбору нефти недостаточна, чтобы избежать значительных экологиче-

ских последствий. Об этом свидетельствует история ликвидации последствий катастрофической аварии в Мексиканском заливе [1]. Работы по ликвидации разлива нефти в Мексиканском заливе производились в сравнительно благоприятных гидрометеорологических условиях, но удалось удалить из морской среды от 23% до 27% общего количества попавшей в окружающую среду нефти, при этом 16—17% было собрано непосредственно в устье скважины, от 5% до 6% было сожжено и 2—4% собрано механическими средствами. Специалисты считают, что своевременный сбор нефти в открытом море можеткратно уменьшить ущерб от последствий раз-

лива. Сокращение вреда окружающей среде и затрат на операции по ликвидации разливов нефти (ЛРН) предполагает удаление с поверхности моря максимально возможного количества нефти до ее выхода на берег и на особо охраняемые природные территории [2]. Маршруты СМП характеризуются сложными географическими и гидрометеорологическими условиями. К ним относятся суровые ледовые условия, преобладающие в течение значительной части года, а иногда и круглогодично, ограничение видимости, в том числе за счет полярной ночи, низкие экстремальные температуры воздуха в зимнее время. На значительной части СМП недостаточно развита транспортная и портовая инфраструктура. В конце ноября 2021 г. две баржи, следовавшие на буксире с грузом нефтепродуктов (7000 т дизтоплива и 170 т керосина), сели на мель вблизи острова Вайгач. Аварийно-спасательная операция заняла больше месяца и сопровождалась откачкой части нефтепродуктов из танков барж и транспортными операциями в сложных ледовых условиях. Очевидно, что непринятие своевременных адекватных мер по прогнозированию и оценке возможной задержки реагирования — прямой путь к увеличению размеров потенциального воздействия загрязнения на природную среду и, как следствие, к росту материальных и репутационных издержек в случае нефтяного разлива.

Успех ликвидации морских аварийных разливов нефти во многом зависит от гидрометеорологических и географических условий в районе проведения операции. Неблагоприятные факторы окружающей среды могут быть причиной существенного снижения эффективности технических средств вплоть до полной приостановки работ. Заблаговременная оценка времени завершения операции ЛРН, оценка вероятности ограничений по разворачиванию сил и средств реагирования представляются важными. В России такого рода оценки не являются обязательным элементом в системе работ по ЛРН, отсутствует и соответствующая методическая база. Для адекватной подготовки к реагированию на возможные разливы нефти и нефтепродуктов необходимы анализ риска распространения разливов углеводородов [3] и оценка возможности снижения риска воздействия за счет выбора средств реагирования, соответствующих прогнозируемым экологическим угрозам.

Справочные данные о гидрометеорологических условиях (например, [4; 5]) в основном содержат сведения о режиме ветра и волнения для арктических морей, включающие характеристики редкой повторяемости, оперативные характеристики, а также данные об «окнах погоды», обусловленных скоростью ветра и ветровым волнением, и служат для оценки условий безопасной эксплуатации плавсредств и сооружений. Эти сведения используются при планировании операций на шельфе, времени достижения судном мест убежищ и т. п. Актуальной

является оценка времени задержки реагирования, которая обусловлена возможностью и эффективностью применения технических средств, географическими и гидрометеорологическими условиями региона и требует более широкого набора параметров с учетом их совместного влияния на эффективность операций ЛРН. Эффективность средств реагирования может обуславливаться сочетанием факторов. Например, сочетание ветра и низких температур может привести к тому, что фактор охлаждения ветром сделает температуру воздуха опасной для участников аварийно-спасательных работ или повлечь обледенение судов и оборудования, делая их тем самым небезопасными или неустойчивыми. Волны определенной высоты или периодичности представляют собой серьезное препятствие для аварийных работ в условиях сильных ветров или низкой видимости.

В географических и гидрометеорологических условиях, присущих маршрутам Северного морского пути, число ограничивающих реагирование факторов существенно возрастает по сравнению с условиями умеренных и южных широт. В [6] отмечены следующие основные параметры, влияющие на эффективность применения средств реагирования: ветер (скорость, порывы), поверхность моря (высота значимых волн, средний период волн), температурные эффекты (температура воздуха, температура поверхности моря, брызговое обледенение, охлаждение ветром), видимость (светлое и темное время суток, горизонтальная видимость, вертикальная видимость, нижняя граница облаков), морской лед (сплоченность), течения и приливы (скорость течений, прилив), мусор (плавающие или погруженные в воду обломки).

Задержка реагирования наступает, если разлив нефти случается в периоды, когда невозможно предпринять эффективные меры, либо из-за того, что имеющиеся технологии неэффективны, либо из-за того, что их разворачивание и применение невозможно из-за природно-климатических условий или в связи с проблемами обеспечения безопасности [7; 8].

Неблагоприятные условия окружающей среды могут оказывать влияние на реализацию планов реагирования на морские разливы нефти в Арктической зоне в следующих аспектах:

- обнаружение разливов нефти и мониторинг распространения нефтяного загрязнения;
- проход судов и пролет авиации, транспортировка оборудования, материалов и персонала к месту проведения работ, а также вывоз образующихся отходов к местам утилизации;
- применение различных средств борьбы с нефтяными разливами во время операции ЛРН;
- ликвидация последствий воздействия нефтяного загрязнения на уязвимые элементы экосистемы региона.

Целью настоящей работы является обсуждение подхода к анализу гидрометеорологических усло-

вий, определяющих задержку в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне России. Предлагаемый подход является развитием и дополнением метода, предложенного в работах [9—11]. Как и в цитируемых работах, предполагается, что на месте происшествия имеются соответствующее оборудование и обученный персонал. Анализ гидрометеорологических факторов сосредоточен на возможности развертывания и применения сил и средств реагирования. Анализ имеющихся ресурсов, их развертывание как в регионе, так и из других мест, а также количество или точный тип необходимых ресурсов остаются за пределами рассмотрения.

Ограничения на реагирование в арктическом регионе

Для оценки эффективности применяемых средств реагирования и технологий выделяется три диапазона значений параметра окружающей среды [11]:

- условия, в которых применение средств в полной мере эффективно (т. е. благоприятные условия);
- «пограничные» условия, когда развертывание средств возможно, но эффективность их применения может быть низкой;
- неблагоприятные условия, когда либо развертывание средств реагирования невозможно, либо их применение полностью неэффективно.

Общепринятые методы реагирования на разливы нефти в море включают механические средства сбора нефти (боны и скиммеры), сжигание нефти на поверхности моря и использование химических диспергентов. Последние два метода требуют дополнительного согласования для конкретных акваторий.

Механический сбор нефти возможен как в условиях открытой воды, так и при наличии льда. Применение тяжелых боновых заграждений для сбора нефти при сплоченности льда более 3 баллов становится затруднительным. В присутствии льда ряд процессов благоприятствует проведению операций ЛРН: замедление растекания, ограничение переноса разливов, снижение интенсивности выветривания нефти уменьшают площади нефтесборных работ и способствуют увеличению сбора нефти с поверхности моря, однако появляется опасность захвата нефти льдами. Для сбора нефти в этих условиях используются скиммеры, предназначенные для работы во льду, а также обычные щеточные или ленточные скиммеры, если полынья или разводья свободны ото льда и погодные условия не приводят к обледенению систем. Предпочтительным методом ЛРН во льдах является локальный и точечный сбор нефти в разводьях между льдинами при ограниченных возможностях притока нефти, что требует дополнительных затрат времени на переход судна ЛРН к следующему скоплению нефти и на перестановку нефтесборного оборудования.

Для целей нашего анализа были взяты значения метеорологических параметров для конкретных методов реагирования из [11], приведенные в табл. 1. Дополнительные ограничения могут возникать со стороны элементов системы реагирования. Например, боны при определенных условиях можно использовать при высоте волн до 2,5 м, но спуск катеров-бонопостановщиков с борта аварийно-спасательного судна возможен при высоте волн 1,5 м и менее, соответственно ограничение определится «слабым» звеном системы.

Таблица 1. Значения параметров окружающей среды, определяющих эффективность применения средств реагирования [11]

Table 1. Values of environmental parameters that determine the effectiveness of the use of response tools [11]

Параметр ограничений	Два судна с боновым заграждением				Одинокое судно в ледовых условиях			
	Благоприятные условия	«Пограничные» условия		Неблагоприятные условия	Благоприятные условия	«Пограничные» условия		Неблагоприятные условия
	Верхняя граница	Нижняя граница	Верхняя граница	Нижняя граница	Верхняя граница	Нижняя граница	Верхняя граница	Нижняя граница
Ветер, м/с	≤ 11	11	18	≥ 18	≤ 15	15	25	≥ 25
Высота ветровых волн, м	≤ 1,8	1,8	3,0	≥ 2,3	—	—	—	—
Сплоченность льда, %	≤ 10	10	30	≥ 30	≥ 90	90	70	≤ 70
Температура воздуха, °С	≥ -5	-5	-18	≤ -18	—	—	—	—

Параметр ограничений	Два судна с боновым ограждением				Одинокое судно в ледовых условиях			
	Благоприятные условия	«Пограничные» условия		Неблагоприятные условия	Благоприятные условия	«Пограничные» условия		Неблагоприятные условия
	Верхняя граница	Нижняя граница	Верхняя граница	Нижняя граница	Верхняя граница	Нижняя граница	Верхняя граница	Нижняя граница
Температура охлаждения ветром, °С	≥ -31,7	-31,7	-37,2	≤ -37,2	—	—	—	—
Структурное обледенение, см/ч	≤ 0,7	0,7	2,0	≥ 2,0	≤ 0,7	0,7	2,0	≥ 2,0
Условия освещения (день/темнота)	День	Темное время суток			День	Темное время суток		
Горизонтальная видимость, км	≥ 0,9	0,9	0,2	≤ 0,2	≥ 0,9	0,9	0,2	≤ 0,2
Вертикальная видимость, м	≥ 152	152	10	≤ 10	≥ 152	152	10	≤ 10

Исходные данные

В настоящее время специалистам доступны открытые данные реанализов метеорологических полей, т. е. сведений о широком наборе метеорологических параметров в любой точке региона интереса за 30—50 лет. Специалисты определяют реанализы как динамически разглаженные и согласованные данные определенного набора архивных наблюдений при помощи гидродинамической модели с фиксированной конфигурацией. При подготовке массивов данных реанализа используются самые современные (на момент создания реанализа) системы усвоения данных, определяются наборы ус-

ваиваемых данных наблюдений и ретроспективно восстанавливается состояние атмосферы (отсюда название «реанализ»). Наиболее известные реанализы проведены и продолжают совершенствоваться в Японии (JRA), США (NCEP), Европе (ERA) и России (Arctic COSMO-CLM). Для анализа были использованы данные о гидрометеорологических условиях на основе открытых источников [12].

В табл. 2 перечислены характеристики источников гидрометеорологических параметров, которые могут быть использованы для анализа возможности реагирования на разлив нефти в Карском море. Одним из доступных источников данных является

Таблица 2. Характеристики наборов данных для оценки возможности реализации мер реагирования
Table 2. Characteristics of datasets for assessing the feasibility of implementing response measures

Источник данных	Тип данных	Область покрытия	Разрешение			Надежность, оценка качества	Данные: доступ, обработка
			по времени	по пространству	период		
<i>Настоящая работа</i>							
1. COSMO-CLM [13]	Смоделированный/реанализ	Моря: Баренцево, Карское, Лаптевых	8-срочные (1 раз в 3 ч)	Приблизительно 12 км (повернутая система координат)	1980—2016 гг.	Хорошо	Наборы двоичных файлов (NetCDF)

Источник данных	Тип данных	Область покрытия	Разрешение			Надежность, оценка качества	Данные: доступ, обработка
			по времени	по пространству	период		
2. NOAA OI SST V2 High Resolution Dataset [15]	Интерполяция наблюдений, проведенных на различных наблюдательных платформах	Глобальное покрытие	Ежесуточно	0,25° по долготе и широте	С 1981/09 по 2022/06	Хорошо	Наборы двоичных файлов (NetCDF)
3. ERA-5, NCAR [12]	Смоделированный/реанализ	Глобальное покрытие	8-срочные (1 раз в 3 ч)	0,25° по долготе и широте	1990—2021 гг.	Хорошо	Наборы двоичных файлов (NetCDF)
<i>EPPR [11]</i>							
4. MET Norway (ECMWF)	Смоделированный	Региональный		15×15 км	10 лет	Отлично	Хороший
5. National Snow and Ice Data Center (NSIDC)	Спутник	Арктический	Ежесуточно	25×25 км	1978—2015 гг.	Отлично	Двоичные данные, требуется преобразование

подробный долгосрочный гидрометеорологический набор данных для российских арктических морей, который был создан на основе гидродинамического моделирования с использованием региональной негидростатической модели атмосферы COSMO-CLM за 1980—2016 гг. [13]. Характеристики этого набора данных приведены в табл. 2. Данные о сплоченности льда, температуре поверхности моря, полученные в результате интерполяции наблюдений, выполненных на различных наблюдательных платформах, описаны в [14]. Там же приведены сведения о наборах данных при подготовке отчета EPPR [11].

Сравнение данных свидетельствует, что пространственное и временное разрешение их приблизительно одного порядка. При этом длительность рядов данных 1—3 в табл. 2 превышает три десятилетия, что позволяет оценивать влияние климатических изменений последних десятилетий на возможности реализации мер реагирования. В работе EPPR [11] оценки такого рода не проводились. Область охвата COSMO-CLM за 1980—2016 гг. [13] — западная часть российской Арктики и восточная часть, ограниченная Восточно-Сибирским морем (от 10° з. д. до 165° в. д.). Данные COSMO-CLM включают значительную часть СМП за исключением его восточной части.

Для расчета статистики времени задержки реагирования использованы результаты реанализа метеорологических полей ERA-5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды за 1990—2021 гг.

Для контроля результатов реанализа использованы результаты наблюдения гидрометеорологических характеристик на полярных станциях Росгидромета. Сравнение данных наблюдений и результатов реанализа за 1990—2021 гг. для станций на островах Визе (точка 1) и Диксон (точка 2) свидетельствует об их хорошем взаимном соответствии в целом, в качестве примера на рис. 1 приведены диаграммы рассеяния для основных гидрометеорологических параметров для острова Визе 1991 г.

Для оценки возможной задержки реагирования результаты реанализа полей метеозлементов за 1990—2021 гг. были интерполированы на часовые интервалы для более точного учета роли освещенности при операциях ЛРН.

После того как наборы данных подготовлены, а ограничения, соответствующие принятому для реагирования оборудованию, выбраны, может быть проведен анализ ограничений. Результаты анализа приписываются либо пункту наблюдения, либо ячейке сетки, на которой представлены данные. Для каждой ячейки из набора данных для любого момента времени может быть определена возможность реагирования по описанным выше градациям (зеленый-желтый-красный). При использовании нескольких параметров для анализа гидрометеорологических условий анализируется каждый параметр отдельно, затем назначается уровень, равный наихудшему уровню среди проанализированных параметров. Далее имеется

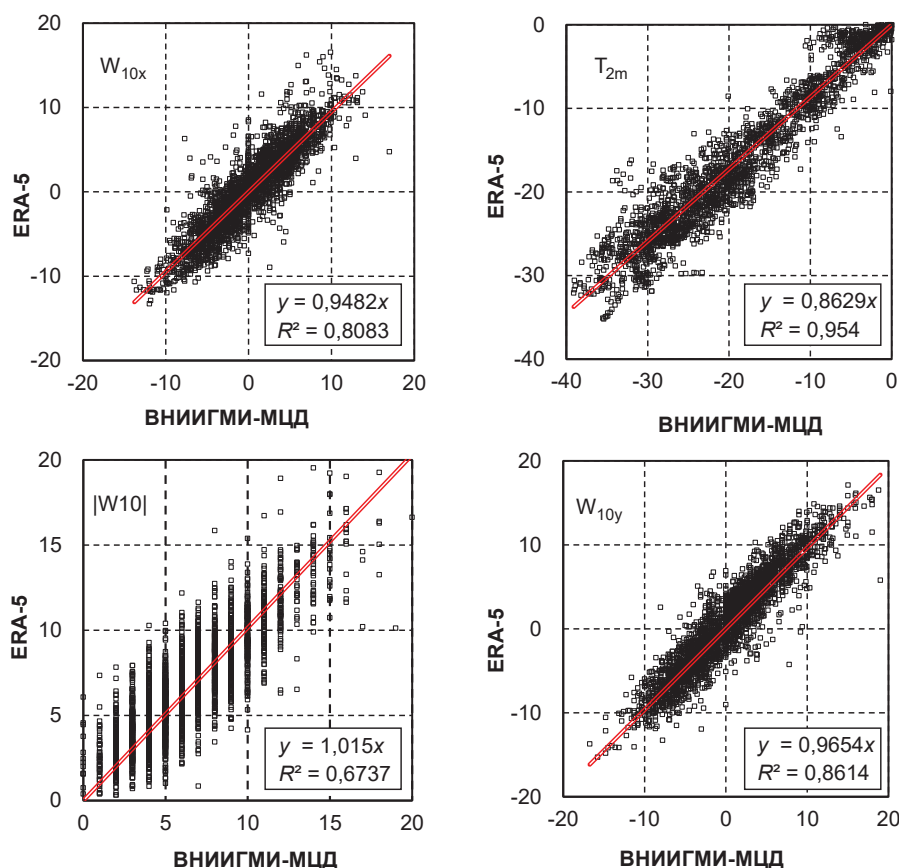


Рис. 1. Сравнение данных наблюдений и результатов реанализа ERA-5 для станции на острове Визе, 1991 г. (ВНИИГМИ-МЦД – Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных)
 Fig. 1. Comparison of observational data and ERA-5 reanalysis results for the Vise Island station, 1991 (ВНИИГМИ-МЦД – All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center)

возможность определить количество случаев реализации условий возможности реагирования (по трем градациям). От полученных частот для года, месяца или другого промежутка времени можно перейти к эмпирической вероятности. Эти данные могут быть представлены в виде карты с географической привязкой. Количество наборов таких карт определяется множеством анализируемых средств реагирования, разбиением года на промежутки времени (сезоны, месяцы).

Пример представления геопространственных данных по материалам рабочей группы Арктического совета по предупреждению, готовности и ликвидации чрезвычайных ситуаций (EPPR) [11] для всего арктического бассейна, включая акваторию Берингова моря, приведен на рис. 2. На рис. 2а приведена вероятность реализации благоприятных условий реагирования, на рис. 2б — неблагоприятных.

При наличии набора альтернативных средств реагирования полезной характеристикой является интегральный индекс возможности реализации мер реагирования. Он характеризует потенциальную возможность реагирования всего набора планируемых к применению средств. Эта статистическая характеристика рассчитывается следующим образом.

Назначается следующая система: для благоприятных условий — 2 балла, для неблагоприятных — 0, для остальных — 1 балл. Для каждого момента времени и всех средств реагирования рассчитывается индекс, для каждой ячейки и каждого момента времени определяется максимум по всем средствам реагирования. Для каждой ячейки рассчитывается среднее значение индекса (например, среднемесячное). Для анализируемого периода (месяца) строится цветовая карта (значения индекса лежат в пределах от 0 до 2). На рис. 2с приведен пример результатов анализа, взятый из [11].

Подход к анализу гидрометеорологических условий

Для оценки статистических характеристик возможной задержки реагирования, обусловленных гидрометеорологическими условиями, предлагается использовать следующий подход. Для выбранного момента времени в году рассчитывается следующий за этим моментом промежуток времени, за который суммарное время благоприятных условий равно заданной продолжительности реагирования — своего рода суммирование «окон возможности реагирования» для набора параметров гидрометеорологиче-

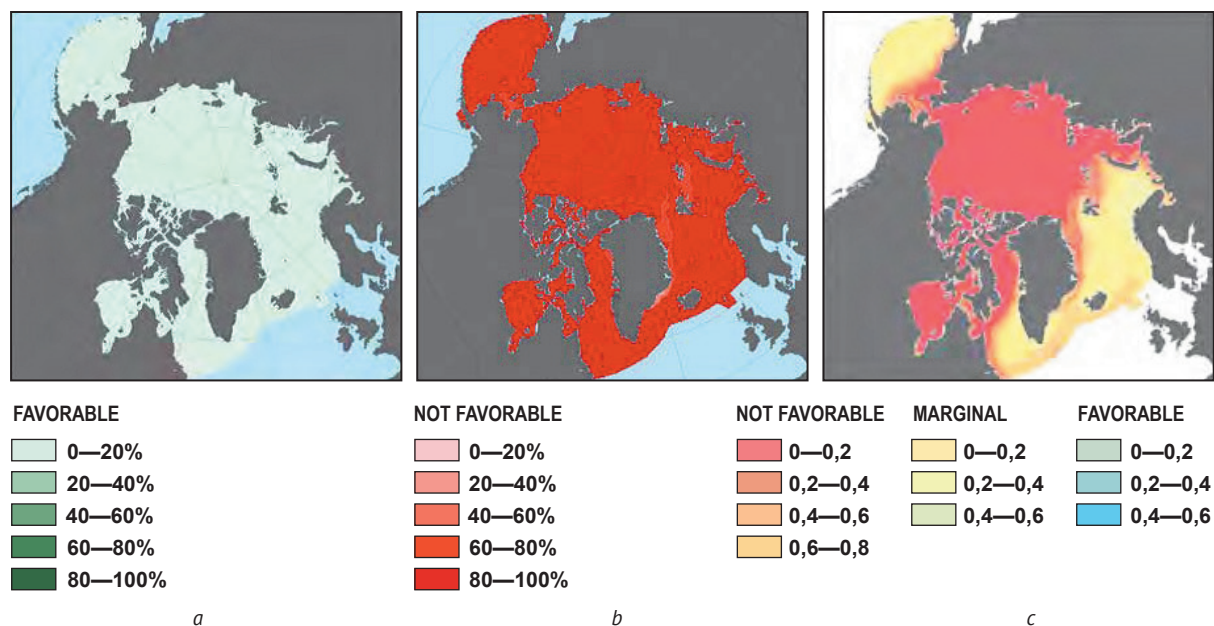


Рис. 2. Вероятность реализаций условий реагирования в январе для одиночного судна в ледовых условиях, благоприятные (а) и неблагоприятные (б), интегральный индекс возможности реализации мер реагирования для января (с) [11]
 Fig. 2. Probability of implementation of response conditions in January for a single vessel in ice conditions, favorable (a), and unfavorable (b), response Viability Index for January (c) [11]

ских условий. Анализ ограничений на реагирование предполагает оценку, как часто конкретный метод реагирования будет эффективен, отчасти эффективен или неэффективен из-за погодных условий.

Для двух вариантов реагирования и каждого момента времени t_i с 0 часов 1 января 1990 г. по 31 декабря 2021 г. с дискретностью в $\Delta t = 1$ ч был проведен анализ каждого метеорологического параметра (см. табл. 1) и определены условия возможности реагирования q_i (0 — благоприятные, 1 — ограничено благоприятные, 2 — неблагоприятные согласно табл. 1, для освещенности использовались темное и светлое время суток, а также навигационные сумерки). Совокупные условия возможности реагирования определены как наибольшее по всем параметрам значение. Минимальное время для ликвидации разлива T_{R0} , равное продолжительности операции ЛРН в благоприятных условиях, обуславливается характеристиками разлива и планируемым для операции оборудованием. При наличии ограничений на реагирование время завершения операции ЛРН $T_R(t_i)$ с началом в момент t_i увеличивается на сумму промежутков времени, в которые условия реагирования неблагоприятны / ограничено благоприятны:

$$T_{Ri} = T_R(t_i) = \Delta t N,$$

где N определяется из соотношения

$$\Delta t \sum_{k=0}^N \theta(1 - q_{i+k}) = T_{R0}, \quad \theta(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ 1, & z \geq 0 \end{cases}.$$

Таким образом, для каждого момента t_i с 0 часов 1 января 1990 г. по 31 декабря 2020 г. с дискрет-

ностью в 1 ч имеются наборы условий возможности реагирования и времени окончания операции ЛРН $\{T_{Ri}\}$. Эти данные можно подвергнуть разного рода статистической обработке. При анализе данных для месяца года в среднем имеется примерно 18 000 значений (30 дней \times 24 часа \times 25 лет) — значительный размер ряда для анализа.

В отличие от «окон погоды» «технологические окна возможности реагирования», используемые при планировании операций ЛРН [16], обуславливаются одновременно гидрометеорологическими условиями, характеристиками средств реагирования и свойствами нефти на морской поверхности, которые, в свою очередь, зависят также от характеристик источника разлива. Таким образом, время завершения операции ЛРН является промежутком, в течение которого наблюдаются благоприятные для реагирования гидрометеорологические условия, и может содержать временные промежутки «окон возможности реагирования» целиком или частично.

Результаты расчетов

Расчеты были проведены для двух вариантов реагирования с помощью механических средств сбора нефти (табл. 2). Первый вариант соответствует «летнему» составу средств реагирования в соответствии с ограничениями, указанными в табл. 2. Второй вариант учитывает ограничения, свойственные «зимнему» реагированию, метеорологические ограничения для которого приведены в табл. 2. Оценки условий окружающей среды, которые могут вызвать задержку в реагировании на разливы нефти,

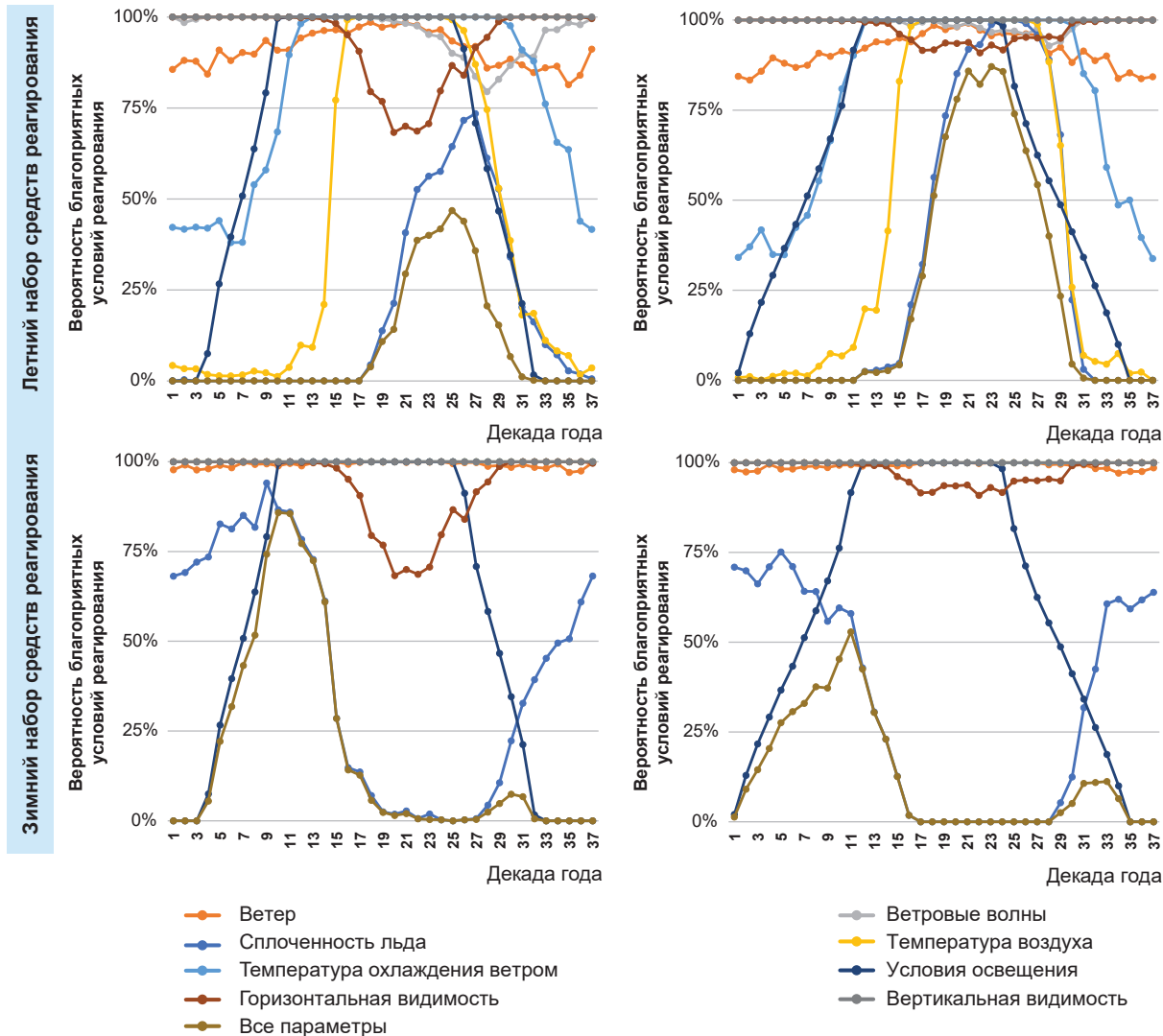


Рис. 3. Оценки вероятности возникновения благоприятных для реагирования условий
 Fig. 3. Estimates of the occurrence probability of favorable conditions for response

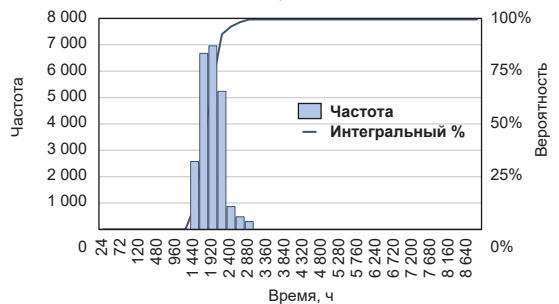
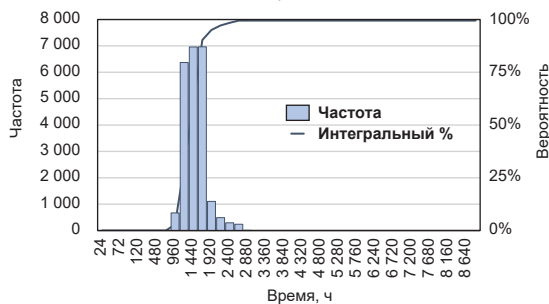
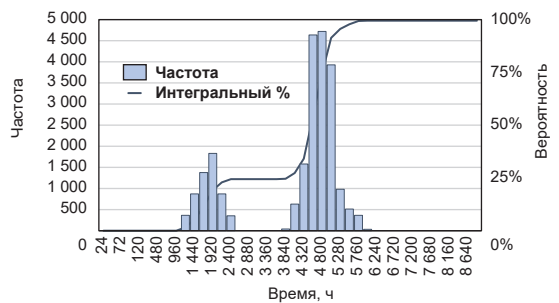
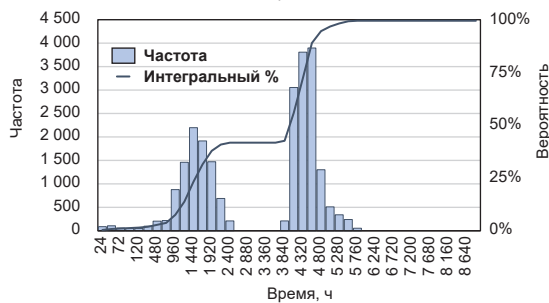
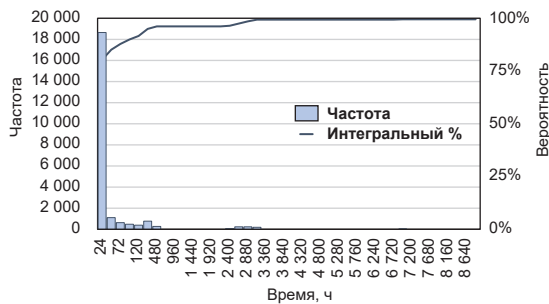
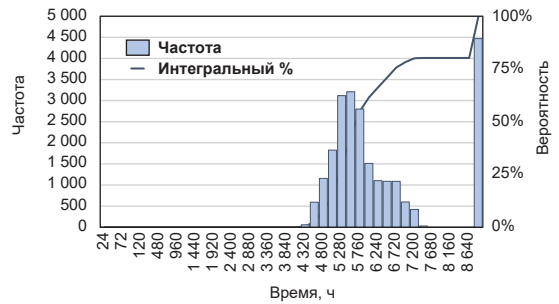
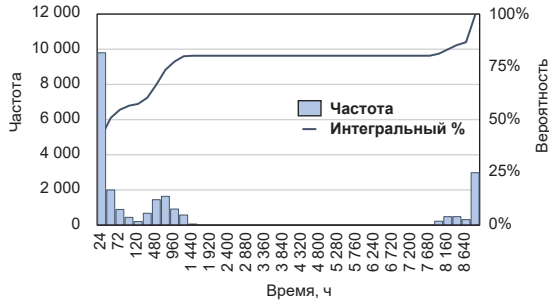
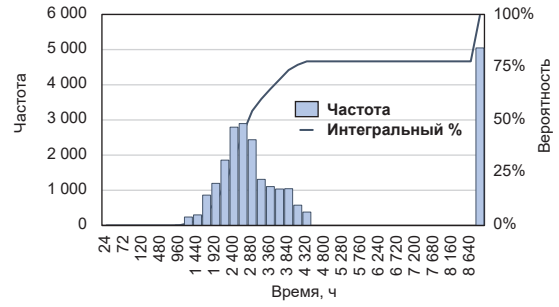
были сделаны для двух точек на маршрутах Северного морского пути — «северной» в районе острова Визе и «южной» в районе острова Диксон.

На рис. 4 приведено изменение в годовом цикле подекадно осредненных гидрометеорологических параметров в выбранных точках. Для каждого параметра приведена вероятность принять значения, благоприятные для проведения операции ЛРН, кроме того, приведен график вероятности того, что все условия оказываются благоприятными для реагирования на разлив. Прежде всего отметим, что большие значения вероятности благоприятных условий для реагирования «летними» средствами наблюдаются в летнее время, а наименьшие — зимой. Аналогично для «зимних» средств наибольшие значения вероятности наблюдаются зимой. Анализ влияния значений отдельных параметров на вероятность благоприятных условий реагирования позволяет выделить следующие особенности. При-

менение «летних» средств реагирования ограничивается главным образом сплоченностью льда, а также освещенностью и температурой воздуха, последние два параметра демонстрируют схожий ход кривых в конце года. Для южной точки значения вероятности наступления благоприятных условий выше и наблюдаются более продолжительное время по сравнению с северной. Это обусловлено географическим положением, а также различием ледовых условий.

► Рис. 4. Время локализации с учетом задержки реагирования. Точка 1. Северный маршрут вокруг Новой Земли. Левая колонка — реагирование 12 ч, правая — 120 ч, три верхних ряда гистограмм — «летние» средства ЛРН, три нижних ряда — «зимние»

Fig. 4. Localization time, taking into account the response gap. 1. Northern Route around Novaya Zemlya. The left panels — 12 h response, the right ones — 120 h, the top three rows — “summer” means of OSR (Oil Spill Response), the bottom three — “winter” ones



Применение «зимних» средств реагирования также ограничивается главным образом сплоченностью льда, а также освещенностью. Для обеих точек наблюдаются два максимума значений вероятности возникновения благоприятных условий для реагирования в районе десятой декады и тридцатой декады года. Для южной точки значения вероятности наступления благоприятных условий ниже и наблюдаются менее продолжительное время по сравнению с северной. Это обусловлено географическим положением, а также различием ледовых условий.

При оценке времени задержки реагирования в соответствии с подходом, представленным выше, было использовано два значения времени проведения операции ЛРН — 12 и 120 ч, анализ проводился помесечно с января по декабрь.

На рис. 4 в качестве примера приведены результаты статистической обработки для точки 1 (северной точки) при использовании «летнего» и «зимнего» оборудования для времени проведения операции ЛРН 12 и 120 ч соответственно. Отметим следующую особенность распределений: все графики содержат ненулевое количество значений, обозначенных 8880 ч, данная группа включает все значения, которые превысили один год. Это означает, что в некотором числе реализаций время завершения операции ЛРН превысило год. В отдельные месяцы (например, в апреле) вероятность того, что задержка будет меньше года, составляет менее 80%. Следует отметить, что с ноября по май задержка реагирования имеет место всегда, т. е. нет значений в диапазонах, равных времени реагирования (12 и 120 ч). Наличие нескольких мод на части гистограмм, возможно, свидетельствует о межгодовой изменчивости гидрометеорологических условий, которая гипотетически может быть связана с глобальным потеплением. Отметим, что для «зимнего» варианта реагирования гидрометеорологические условия таковы, что во всех случаях значений времени задержка более одного года не наблюдается. Январь и декабрь в значительной степени подвержены влиянию условий освещенности (условия полярной ночи и короткий световой день), для реагирования продолжительностью 120 ч это влияние проявляется в большей степени по сравнению с 12-часовым сценарием. Наличие нескольких мод в гистограмме обусловлено скорее всего теми же причинами, что и для «летнего» варианта реагирования. Аналогичные гистограммы были построены и для точки 2 (южной точки). Для летнего варианта реагирования характерно отсутствие значений времени задержки, превышающих один год, что, по-видимому, связано с близостью берега и наличием речного стока, который приводит к ежегодному очищению ото льда. Период, когда во всех случаях наблюдается задержка для точки 2, несколько короче по сравнению с точкой 1, он длится с ноября по март. Для «зимнего» варианта реагирования для точки 2 влияние условий освещенности несколько слабее по сравнению

с точкой 1 и связано с широтой места в большей степени.

На рис. 5 приведены характерные значения времени задержки помесечно, для обеих точек и двух продолжительностей реагирования. Можно сделать следующий вывод: реагирование с летним набором средств в связи с ограничением по метеопараметрам приведет к задержке локализации в зимние месяцы практически на полгода, и аналогично зимний набор средств реагирования практически бесполезен летом и работает только в условиях, определенных в табл. 2.

Зелеными стрелками на рис. 5 показана разница во времени окончания короткой (12 ч) и «длинной» операций ЛРН (120 ч). Для инцидентов, происходящих в октябре, задержка в реагировании «длинной» операции ЛРН может составлять 260 дней в районе острова Диксон и около 300 дней в северной точке вблизи острова Визе.

Заключение

В представленной работе подход к анализу гидрометеорологических факторов, который ранее использовался в работах канадских специалистов [11], был дополнен за счет введения нового параметра — времени завершения операции ЛРН. Этот параметр является случайной величиной и зависит от масштаба разлива, применяемых средств и оборудования, а также от географических и гидрометеорологических условий в районе возникновения аварии. Функция распределения и моменты функции распределения времени завершения операции ЛРН позволяют оценить вероятность прогнозируемой задержки реагирования. Новый подход был использован для оценки вероятной задержки в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне России для двух характерных географических локаций по трассе Северного морского пути.

В дальнейшем заслуживает обсуждения выбор источника данных для анализа. В работе были использованы результаты реанализа ERA-5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды за период с 1991 по 2021 гг. В то же время известно, что началась работа по специализированному арктическому реанализу (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/arctic-system-reanalysis-asr>), проводимому университетами США. Arctic System Reanalysis (ASR) создается с использованием версии Полярной негидростатической модели прогноза погоды с высоким разрешением (PWRP) и систем СМП ассимиляции данных WRF-VAR и ассимиляции наземных данных высокого разрешения HRLDAS, которые были оптимизированы для Арктики. В настоящее время данные арктического реанализа доступны на меньшую «глубину», чем использованные в нашей работе, однако, судя по инициализации отдельного арктического проекта, данные ASR следует как минимум использовать для сравнения на сопоставимых временных промежутках. Впервые

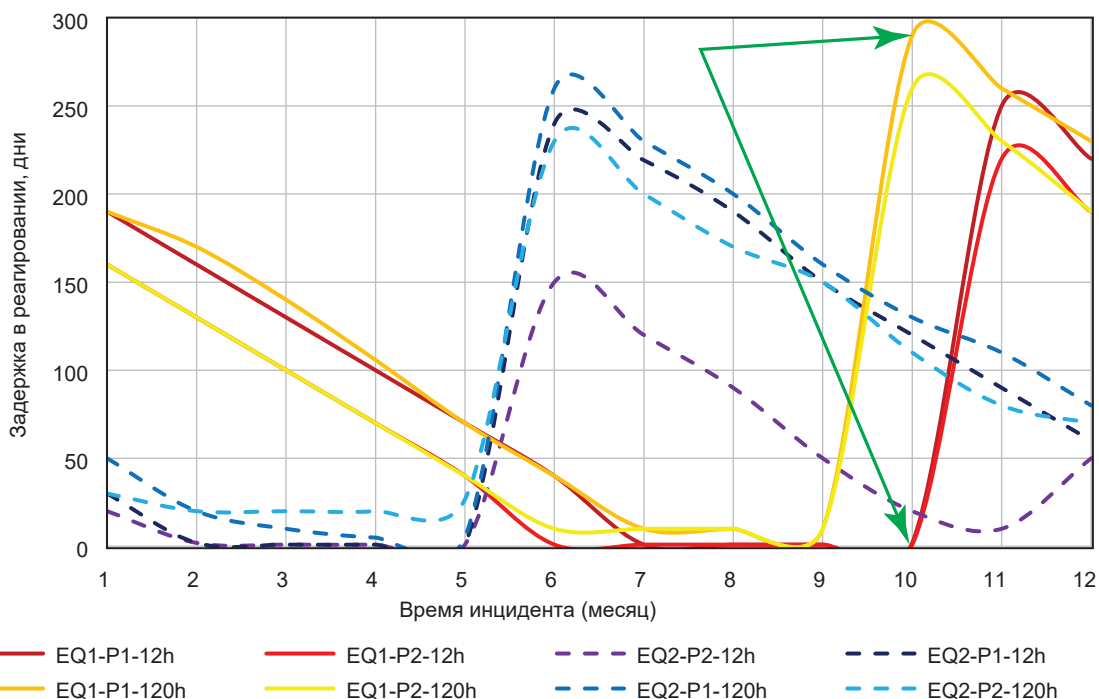


Рис. 5. Оценка времени задержки при локализации разлива нефти для южной и северной точки маршрута в Карском море для двух вариантов реагирования (летнего и зимнего). EQ1 – летний вариант средств реагирования, EQ2 – зимний вариант – северная точка вблизи острова Визе, P2 – южная точка вблизи острова Диксон
 Fig. 5. Estimation of the delay time in the localization of an oil spill for the southern and northern points of the route in the Kara Sea for two response options (summer and winter). EQ1 – “summer” oil spill response system, EQ2 – “winter” oil spill response system, P1 – the northern point near Vise Island, P2 – the southern point near Dixon Island

вводится в рассмотрение время, на которое может быть отложено реагирование. Методика расчета времени задержки описана в работе и также должна стать предметом рассмотрения в профессиональном сообществе. Вероятность благоприятных и неблагоприятных условий и время задержки реагирования зависят от конкретных пороговых значений метеорологических параметров, зависящих от выбора технических средств локализации и ликвидации разливов, и эти параметры также подлежат уточнению.

При проведении оценок использовались характеристики оборудования, которое типично используется для ликвидации аварийных разливов в ледовых и безледных условиях в Северной Америке [9; 17; 18]. Набор гидрометеорологических характеристик скорее всего может быть расширен, а используемые параметризации уточнены. В связи с этим настоящая работа носит в значительной степени методический характер. В результате проведенных оценок было получено, что существуют условия природной среды, которые могут вызвать значительное увеличение сроков завершения работ по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в арктическом регионе. Повышение обоснованности и точности расчетов требует усилий в нескольких областях. Во-первых, необходимо иметь данные реанализа гидрометеорологических характеристик с возможностью расширять номен-

клатуру параметров, а также более подробное пространственное разрешение, чему способствовали бы запуск и поддержка отечественных решений по системам гидрометеорологических прогнозов. Во-вторых, требуется использовать уточненные характеристики плавсредств и оборудования по мере их совершенствования. В-третьих, неизбежные задержки реагирования, вызванные особенностями географических и гидрометеорологических условий в Арктике, приведут к тому, что разлившаяся нефть может переноситься ледовыми полями. В этой связи необходим прогноз распространения нефтяного загрязнения, в том числе захваченного льдом, для проведения операций ЛРН в местах высвобождения нефти в процессе таяния льда.

Литература/References

1. Lehr B., Sky B., Possolo A. Oil budget calculator—Deepwater Horizon, technical documentation: A report to the National Incident Command. Coastal Response Res. Cent. [S. l.], 2010.
2. Правила применения диспергентов для ликвидации разливов нефти СТО 318.4.02-2005 / М-во транспорта РФ. — СПб., 2005. Pravila primeneniya dispergentov dlya likvidatsii razlivov nefti STO 318.4.02-2005 [Rules for the use of dispersants for the elimination of oil spills SRT 318.4.02-2005]. Ministerstvo transporta RF. Saint Petersburg, 2005. (In Russian).

3. Зацепя С. Н., Ивченко А. А., Журавель В. И. и др. Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы Карского моря // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 3. — С. 30—45. Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Zhuravel' V. I., Solbakov V. V., Stanovoi V. V. Analysis of the risk of the spread of emergency oil spills on the example of the Ob Bay of the Kara Sea. Arctic: Ecology and Economy, 2014, no. 3, pp. 30—45. (In Russian).
4. Лопатухин Л. И., Бухановский А. В., Чернышева Е. С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Берингова и Белого морей / Рос. морской регистр судоходства. — СПб., 2010. — 565 с. Lopatukhin L. I., Bukhanovskii A. V., Chernysheva E. S. Reference data on the wind and wave regime of the Bering and White Seas. Russian Maritime Register of Shipping. Saint Petersburg, 2010, 565 p. (In Russian).
5. Лопатухин Л. И., Бухановский А. В., Чернышева Е. С. Справочные данные по режиму ветра и волнения шельфа Баренцева и Карского морей / Рос. морской регистр судоходства. — СПб., 2013. — 334 с. Lopatukhin L. I., Bukhanovskii A. V., Chernysheva E. S. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya shel'fa Barentseva i Karskogo morei. Russian Maritime Register of Shipping. Saint Petersburg, 2013, 334 p. (In Russian).
6. Bonvicini S., Bernardini G., Scarponi G. E., Cassina L., Collina A., Cozzani V. A methodology for Response Gap Analysis in offshore oil spill emergency management. Marine Pollution Bull., 2022, vol. 174, p. 113272.
7. Robertson T. L., Kumar S. A. Estimating the response gap two operating areas in Prince William Sound, Alaska. Intern. Oil Spill Conference. American Petroleum Inst., 2008, no. 1, pp. 615—619.
8. Robertson T. Response gap estimated for two operating areas in Prince William Sound. Report to the Prince William Sound regional citizen's advisory council. Anchorage, AK, 2007.
9. Oil Spill Response Gap and Response Capacity Analysis for Proposed Northern Gateway Tanker Oil Spills in Open Water and Protected Water Operating Environments. Nuka Research and Planning Group, LLC, 2012.
10. Glickson D. A., Grabowski M., Coolbaugh T. S., Dickins D. F., Glenn R. D., Lee K., Majors L., Myers M., Norcross B. L., Reed M., Suydam R. S., Tiedje J. L., Timmermans M., Wadhams P. Responding to oil spills in the US Arctic marine environment. Intern. oil spill conference proceedings. American Petroleum Inst., 2014, no. 1, p. 283740.
11. Circumpolar Oil Spill Response Viability Analysis: Technical Report. EPPR. [S. I.], 2017, 134 p.
12. ERA5 Reanalysis. [Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory]. Available at: <https://doi.org/10.5065/D6X34W69>.
13. Platonov V., Varentsov M. Russian Arctic COSMO-CLM hindcast over 1980—2016 period. figshare. 2020. Available at: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.5186714.v18>.
14. Reynolds R. W., Smith Th. M., Liu Ch., Chelton D. B., Casey K. S., Schlax M. G. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. J. of Climate, 2007, vol. 20, no. 22, pp. 5473—5496.
15. Huang B., Liu C., Banzon V., Freeman E., Graham G., Hankins B., Smith T., Zhang H.-M. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. J. of Climate, 2021, vol. 34, no. 8, pp. 2923—2939.
16. Nordvik A. B. The technology windows-of-opportunity for marine oil spill response as related to oil weathering and operations. Spill Science & Technology Bull., 1995, vol. 2, no. 1, pp. 17—46.
17. Brandvik P. J., Buist I., Daling P., Dickins D., Fakness L. G., Potter S., ... @ Singasaas I. Joint industry program on oil spill contingency for Arctic and ice-covered waters: Summary report. [S. I.], 2010.
18. Evers K. U., Sørheim K. R., Singasaas I. Oil spill contingency planning in the Arctic—Recommendations. Work package, 2006, vol. 4.

Информация об авторах

Зацепя Сергей Николаевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова Росгидромета (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), e-mail: zatsepa@gmail.com.

Ивченко Александр Александрович, старший научный сотрудник, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова Росгидромета (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), e-mail: alivch654@gmail.com.

Книжников Алексей Юрьевич, e-mail: aleksey.knizhnikov@gmail.com.

Солбаков Вячеслав Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН (119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2), e-mail: solbakov@ccas.ru.

ANALYSIS APPROACH TO THE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS THAT DETERMINE THE GAP IN RESPONSE TO MARINE OIL SPILLS IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

Zatsepa S. N.¹, Ivchenko A. A.¹, Knizhnikov A. Yu., Solbakov V. V.²

¹ N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet (Moscow, Russian Federation)

² Federal Research Centre "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on January 15, 2023

For citing

Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Knizhnikov A. Yu., Solbakov V. V. Analysis approach to the of meteorological conditions that determine the gap in response to marine oil spills in the Arctic zone of the Russian Federation. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 369—381. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-369-381. (In Russian).

Abstract

The present study reviews the approach to assessing the oil spills response delay caused by hydrometeorological and geographical conditions at the operation site. To illustrate the method and discuss the results, the application of two mechanical response system in ice and ice-free conditions are considered. Two points of the northern and southern area of the Northern Sea Route are analyzed. It is found that the value of the OSR completion time can exceed a year with a very significant probability. The proposed analysis makes it possible to assess the possibilities of improving the response efficiency for existing and newly created oil spill response strategies in the region of interest, as well as to apply other measures to reduce the risks of the negative impact of accidental spills on Arctic ecosystems.

Keywords: *oil spills, oil spill response plans, response gap, meteorological conditions, weather windows, windows of opportunity for response, meteorological field reanalysis results, Northern Sea Route, mathematical modeling, statistical characteristics of environmental parameters.*

Information about the authors

Zatsepa, Sergei Nikolaevich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory for Modeling the state of the Marine Environment, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet (6, Kropotkinskii Lane, Moscow, Russia, 119034), e-mail: zatsepa@gmail.com.

Ivchenko, Aleksandr Aleksandrovich, Researcher, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet (6, Kropotkinskii Lane, Moscow, Russia, 119034), e-mail: alivch654@gmail.com.

Knizhnikov, Aleksei Yurevich, e-mail: aleksey.knizhnikov@gmail.com.

Solbakov, Viacheslav Viktorovich, PhD, Senior Researcher, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (44/2, Vavilova street, Moscow, Russia, 119333), e-mail: solbakov@ccas.ru.

© Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Knizhnikov A. Yu., Solbakov V. V., 2023