

Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы Карского моря

С. Н. Зацепа¹, кандидат физико-математических наук, А. А. Ивченко²
Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова

В. И. Журавель³, кандидат технических наук,
Научно-методический центр «Информатика риска»

В. В. Солбаков⁴
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН

В. В. Становой⁵
ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Оценка риска воздействия разливов нефти на окружающую среду необходима как стартовое условие для разработки комплекса мер по обеспечению экологической безопасности в арктических регионах, где проводятся или планируются разведка, добыча и транспортировка нефти и нефтепродуктов. Рассматриваются номенклатура и форма представления данных, используемых при составлении планов ликвидации аварийных разливов нефти. Аварийный разлив нефти в море представляется как случайное событие, время, место и масштаб которого трудно предугадать. Сделано предположение, что все сведения о чрезвычайной ситуации, кроме времени наступления аварийной ситуации, известны, и приведены базовые принципы оценки риска. Для демонстрации выходной продукции риск-анализа распространения аварийных разливов нефти проведена реконструкция гидрометеорологических условий для акватории Обской губы Карского моря и приведены результаты типовых расчетов для условной точки сброса дизельного топлива.

Ключевые слова: аварийный разлив нефти, риск-анализ и оценка риска распространения нефти в море, вероятность воздействия, статистика выветривания нефти, реконструкция гидрометеорологических условий.

Введение

Воздействие разливов нефти на морскую среду может иметь самый разный характер и определяется условиями, в которых происходит разлив. Крупная авария способна оказать серьезное краткосрочное воздействие на окружающую среду и привести к тяжелым последствиям для экосистем и населения загрязненного побережья. Характер и длительность последствий разлива нефти зависят от многих факторов. К ним относятся количество и тип разлитой

нефти, гидрометеорологические условия в районе разлива. Другие ключевые факторы — состав биоты в области нефтяного загрязнения, экологическая и промысловая значимость видов и их восприимчивость к загрязнению. Последствия также в существенной мере определяются выбором методов борьбы с разливом и эффективностью проведения соответствующих операций. В силу природно-климатических условий восстановление природной среды от негативных последствий загрязнений в дальневосточных и арктических регионах требует больше времени, чем в более теплых районах.

Негативные последствия загрязнения морей нефтью и нефтепродуктами в случае аварийного сброса могут быть существенно уменьшены при своевременном принятии адекватных мер для локализации

¹ e-mail: zatsepa@gmail.com.

² e-mail: alivch@orc.ru.

³ e-mail: myqwerty@mail.ru.

⁴ e-mail: v.jouravel@ric.msk.ru.

⁵ e-mail: vstanovoy@yandex.ru.

и ликвидации загрязнения. Последнее возможно при наличии информации о том, где, когда, с какой вероятностью и в каких количествах может появиться нефть в случае аварийного разлива.

Моделирование гипотетических разливов нефти до их возникновения необходимо, чтобы оценить вероятности поражения нефтяным разливом уязвимых ресурсов на акватории и побережье, определить время, доступное для развертывания сил и средств системы локализации и ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН), оценить варианты стратегий применения технических средств.

Статья 14 федерального закона «О промышленной безопасности» использует понятие «риск аварии и связанной с нею угрозы». В законе закреплен постулат о необходимости оценки и управления риском при эксплуатации опасных производственных объектов [6]. Статья представляет собой развитие концепции риск-анализа разливов нефти в море, ранее представленной в [3; 4; 11; 13]. Обсуждения данной темы с заинтересованными сторонами в рамках многочисленных проектов определили примерный состав результатов для объективной оценки риска распространения нефти и выработки на ее основе необходимых управленческих решений. Несмотря на то что риск-анализ аварийных разливов в том или ином контексте упоминается давно [13; 12], до настоящего времени некоторые термины точно не определены, а подходы к решению проблем не описаны.

Мы не будем приводить конкретные соотношения для тех или иных моделей процессов, определяющих судьбу нефти в море. Эти соотношения могут уточняться и изменяться, но для целей настоящей работы это несущественно. Важной с нашей точки зрения является сама концепция риск-анализа распространения аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, который является и инструментом информационного обеспечения планов ЛАРН, и составной частью оценки воздействия на окружающую среду.

Риск-анализом будем называть метод или процедуру, с помощью которой могут быть получены оценки вероятности воздействия конкретного разлива нефти, соответствующего конкретному сценарию технической аварии, на уязвимые объекты на акватории и побережьях. Оценка риска или вероятности воздействия — это, напротив, не процедура, а результаты, используемые непосредственно при разработке комплекса первоочередных мер по минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Риск-анализ и оценка воздействия на окружающую среду

Краткие сведения о негативных последствиях

Негативные последствия от разливов нефти для окружающей морской среды и побережий зависят от степени уязвимости и восприимчивости организмов к нефтяному загрязнению. К уязвимым видам

относятся представители биоты, которые, как правило, обитают у поверхности воды или у береговой линии, вследствие чего возрастает вероятность их контакта с нефтью. К восприимчивым относятся те виды, которые наиболее сильно страдают при контакте с нефтью или ее химическими компонентами. Менее восприимчивые организмы с большей вероятностью могут выдержать кратковременное воздействие нефти. Масштабы и тяжесть последствий от разлива зависят от свойств нефти или нефтепродукта. Разлив большого объема стойкой нефти, например, мазута, может нанести обширный ущерб в виде удушения организмов в береговых зонах. Тяжелая топливная нефть оказывает меньшее токсическое воздействие вследствие низкой биологической доступности химических компонентов. Химические компоненты легкой нефти, напротив, отличаются более высокой биологической доступностью и с большей вероятностью могут причинять токсические повреждения. С другой стороны, нефть этого вида быстро рассеивается в результате испарения и дисперсии, поэтому в целом легкая нефть может нанести меньше вреда при условии, что уязвимые природные ресурсы в достаточной мере удалены от места разлива [7]. Достаточно подробное описание воздействия нефтяных разливов на морские биоресурсы приведено в [5].

Эффективное планирование и реализация операций по ликвидации разливов нефти способствуют смягчению последствий, а также представляют собой первые шаги по восстановлению природной среды за счет сбора нефти. В рамках планов ЛАРН нужно предусмотреть защиту ценных экологических ресурсов (морских границ охраняемых территорий, мест пребывания особо ценных биологических видов, мест массового скопления птиц и животных и т. п.). Для этого необходимо детальное изучение экологических условий района возможного влияния, особенностей сезонной экологической обстановки и ее трендов. Чаще всего это делается на основе фондовых материалов и научных публикаций с их обобщением в виде карт экологической чувствительности акваторий и побережий [1]. Однако выход нефтегазовых работ в новые и малоизученные районы делает этот путь невозможным, требуются инженерно-экологические изыскания.

Будущий разлив нефти — случайное событие

Возникновение аварийной ситуации обусловлено совокупностью случайных событий природного и техногенного характера, включает человеческий фактор и труднопредсказуемо. Когда и где произойдет разлив нефти, сколько нефти или нефтепродуктов попадет в море и какие при этом будут метеорологические условия, заранее неизвестно. Несмотря на это, необходимо разрабатывать стратегии и планы реагирования в чрезвычайных ситуациях для минимизации негативных последствий аварий. Мы не будем уделять внимание вопросам оценки

Научные исследования в Арктике

технического риска, а с разумной подробностью оценим возможности описания вариантов развития аварийной ситуации в морской среде. Стартовыми условиями будем считать информацию о возможном сценарии технической аварии. Эта информация включает сведения о том, где (координаты), сколько (объем и продолжительность сброса) и что (тип нефти или нефтепродукта) может попасть в море при чрезвычайной ситуации. Когда речь идет о разведке или добыче нефти, то на вопрос «Где?» ответить просто, так как это координаты добычной платформы. И на вопрос «Что?» тоже просто ответить после некоторого периода эксплуатации. В этом наборе данных всегда отсутствуют лишь сведения о времени, когда может случиться авария.

Ключевым для нашего исследования является положение, что авария, связанная с разливом нефти или нефтепродуктов в морскую среду, может случиться в любой момент — естественно, относящийся к периоду (сезону) производственной активности, в любое время дня и ночи. Поскольку нет оснований для противоположного утверждения, будем считать, что все моменты времени «будущей гипотетической аварии» равновероятны. Таким образом, риск воздействия разливов нефти для всех уязвимых объектов в районе, где проводится разведка либо добыча и транспортировка нефти, будет зависеть от особенностей гидрометеорологических условий.

Определив аварийную ситуацию как случайное событие, определим риск как вероятность возникновения неблагоприятных для природной среды последствий. Важно понимать, что вероятность воздействия на конкретные объекты в морской среде и на побережье в результате распространения разлива нефти всегда определяется как условная, так как абсолютное значение вероятности воздействия будет зависеть от вероятности технической аварии соответствующего уровня.

Определение параметров риск-анализа

Риск-анализ распространения аварийных разливов нефти (в англоязычной литературе — oil spill risk assessment), несмотря на уже примерно двухдесятилетнюю историю, находится на границе нескольких дисциплин — в том числе гидрометеорологии, экологии и промышленной безопасности — и все еще представляет относительно новое направление исследований. Поэтому представляется целесообразным привести небольшой глоссарий терминов, использованных в тексте.

Риск-анализ распространения нефти в море — процедура оценки риска воздействия аварийных разливов нефти на уязвимые объекты на акватории и в береговой зоне.

Сценарий гидрометеорологических условий — набор последовательных полей скорости ветра и течений, температуры, солености и плотности морской воды, характеристик ветрового волнения,

позволяющий описать эволюцию нефтяного разлива под действием факторов природной среды.

Сценарий распространения аварийного разлива нефти — расчет последовательных положения и конфигурации разлива, обусловленных переносом и деформацией пятна нефти на поверхности моря за счет совокупного действия ветра и течений, оценка изменения геометрических (площади, толщины, линейных размеров) и физико-химических характеристик разлива нефти, таких как плотность и вязкость, меняющихся в результате выветривания нефти, оценка количества нефти, испарившейся и диспергированной в водную толщу.

Сценарий технической аварии — сведения о типе нефти или нефтепродукта, сброшенного в морскую среду в результате аварии, координаты сброса, интенсивность и продолжительность или объем сброса.

Технический риск — вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта.

Экологический риск — вероятность возникновения неблагоприятных для природной среды и человека последствий осуществления хозяйственной и иной деятельности [2].

Приемлемый риск аварии — риск, уровень которого допустим и обоснован по социально-экономическим соображениям.

Свойства нефти или нефтепродукта — плотность, вязкость, межфазное натяжение, температура застывания и вспышки (в том числе по узким фракциям), дистилляционные характеристики.

Зона риска — область акватории, где разлив нефти может оказаться пределах заданных временных промежутков после начала аварии (1 день, 3 дня, 5 дней и т. д.), если не будут предприняты меры по локализации и ликвидации разлива нефти.

Вероятность достижения акватории и береговой зоны — поле вероятности обнаружения на поверхности моря нефтепродуктов с толщиной пленки, превышающей заданный уровень, в области с предопределенными пространственными размерами при условии, что не будут предприняты меры по локализации и ликвидации разлива нефти.

Масштаб воздействия — оценка линейных и площадных характеристик нефтяного разлива, изменяющихся с течением времени после сброса под действием растекания, диффузии, физико-химических процессов.

Вероятность того, что при заданном сценарии технической аварии на участке морской акватории или у берега будет наблюдаться некоторое неблагоприятное событие, например, толщина пленки нефти будет превышать пороговые значения, определится как произведение вероятности наступления технической аварии соответствующего уровня и вероятности достижения разливом рассматриваемого участка морской акватории под действием гидрометеорологических факторов.

Вероятность двух видов событий может быть оценена. Во-первых, вероятность того, что траектория распространения нефтяного разлива, имеющего некоторые физические и геометрические параметры, пройдет через выделенный участок акватории или вблизи выбранной точки на акватории или берега. Во-вторых, вероятность нахождения нефтяного разлива вблизи того или иного участка акватории или берега. Вероятность первого типа позволяет оценить повторяемость направлений распространения и возможные масштабы воздействия в любой точке региона интереса и важна при составлении плана ЛАРН. Вероятность второго типа соответствует времени воздействия (экспозиции) на участки и, соответственно, биоту и важна при оценке воздействия на окружающую среду. Отметим, что обе вероятности зависят как от размеров нефтяного разлива, так и от размеров участка акватории, для которого определяется вероятность. Первая вероятность возрастает линейно с увеличением линейных размеров уязвимых объектов, вторая линейно зависит от соответствующих площадей.

Сценарии гидрометеорологических условий

Изменение положения, конфигурации, массы и физико-химических показателей нефтяного разлива зависит от гидрометеорологических характеристик в приводном слое атмосферы над морем и приповерхностном слое воды.

К наиболее доступным сведениям о гидрометеорологических условиях (ГМУ) в любом регионе относится информация о гидрометеорологическом режиме. По сути это средние значения параметров, которые оцениваются по данным гидрометеорологических станций и, значительно реже, по данным судовых наблюдений. Но зачастую оказывается, что в местах планируемой производственной активности данных наблюдений либо не было вовсе, либо они столь редки, что не дают возможностей для обобщений. В такой ситуации необходимые сведения о гидрометеорологическом режиме могут быть получены только расчетным путем с помощью математических моделей методами математического моделирования.

С другой стороны, средние характеристики гидрометеорологического режима далеко не всегда бывают представительными. Так, в ряде случаев распространенные представления о существовании постоянных морских течений, таких, например, как восточно-сахалинское или восточно-новоземельское, лишены оснований, поскольку упомянутые течения, по крайней мере в поверхностном слое моря, в значительной степени обусловлены действием ветра и, соответственно, столь же изменчивы. Есть районы и акватории, где, казалось бы, ветровой режим четко определен. Например, в Приморье за счет муссонной циркуляции зимой ветер дует в сторону моря (северных и северо-восточных румбов), а летом, наоборот,

в сторону материка. Но сведения, которые можно получить из данных о повторяемости ветра (розы ветров), совершенно недостаточны для описания возможных гидрометеорологических сценариев, в которых может произойти разлив нефти. Во-первых, статистики ветра не включают, как правило, сведений о вероятности перехода из одного ветрового режима в другой, во-вторых, розы ветров не дают возможности рассчитать течения в море, обусловленные действием ветра. Вместе с тем современное развитие математических моделей в гидрометеорологической области позволяет при оценке вариантов распространения нефтяных разливов отказаться от использования «гидрологической сцены» и искусственных ветровых сценариев. Комплексы математических моделей, описывающих процессы в океане, атмосфере и на границе раздела, дают возможность расчетным путем восстановить/реконструировать необходимые характеристики природной среды, которые оказывают влияние на эволюцию нефтяного разлива после аварийного сброса в море. Реконструкция ГМУ в регионе интереса предполагает, что посредством процедуры усвоения используются все собранные соответствующими метеорологическими службами данные наблюдений, а недостающая информация в точках, где не было наблюдений, или параметры, которые не измерялись, восстанавливаются расчетным путем.

Как правило, реконструкция ГМУ основывается на данных реанализа метеорологических параметров [10], который проводится в крупных научных центрах, таких как Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) и Американское агентство по исследованию природной среды (NCEP/NCAR). Данные метеорологического реанализа используются как граничные условия для моделей расчета течений, уровня и гидрологических характеристик в море/океане, а также моделей ветрового волнения либо непосредственно, либо после обработки программой гидродинамической интерполяции WRF.

В результате реконструкции ГМУ рассчитываются поля приводного ветра, течений, солёности, температуры и плотности морской воды на различных горизонтах за период, позволяющий исключить межгодовую изменчивость гидрометеорологических процессов. Для замерзающих морей к перечисленным гидрометеорологическим параметрам желательно добавить сведения о ледовых условиях, согласованные с расчетами ветра и течений. Пространственное разрешение метеорологических и гидрологических моделей должно быть достаточным для описания особенностей гидрометеорологического режима в регионе интереса. Выходная продукция моделей должна соответствовать пространственно-временной изменчивости описываемых процессов и для большинства задач представляется с дискретностью 1 ч. Таким образом, каждый год реконструкции представляется как

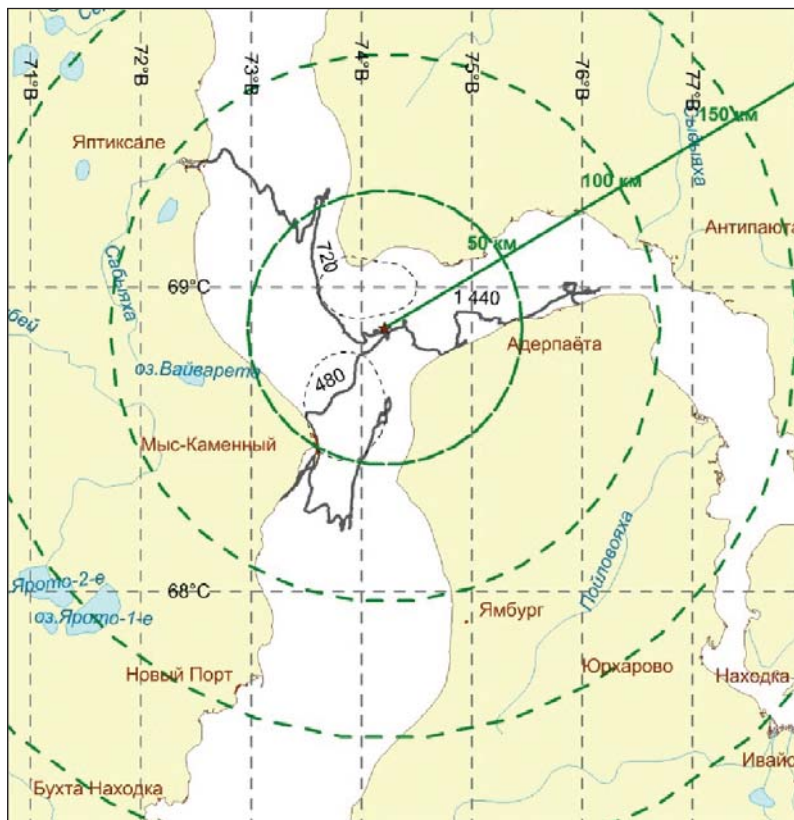


Рис. 1. Пример трех траекторий распространения разливов нефти по акватории Обской губы Карского моря

минимум 8760 полями ($365 \cdot 24 = 8760$) значений каждого из необходимых гидрометеорологических элементов на каждом расчетном горизонте.

После того как реконструированные поля гидрометеорологических параметров рассчитаны, из них может быть составлен ансамбль гидрометеорологических ситуаций/сценариев. Каждый сценарий ГМУ представляет собой набор последовательных полей скорости ветра и течений, температуры, солености и плотности морской воды, характеристик ветрового волнения и позволяет провести моделирование эволюции нефтяного разлива под действием факторов природной среды. Обычно каждый сценарий ГМУ в регионе интересов для целей обеспечения планирования операций ЛАРН составляется на 5—10 сут. Набор сценариев гидрометеорологических условий, каждый из которых, например, имеет продолжительность 10 сут, строится так: первый сценарий состоит из набора полей с номерами от 1-го по 240-й из рассчитанных на год данных, второй сценарий описывается набором полей со 2-го по 241-й, третий — с 3-го по 242-й и т. д.

Таким образом, имеется возможность рассчитать сценарии распространения нефтяного разлива, соответствующего тому или иному варианту технической аварии, во всем многообразии погодных условий, наблюдавшихся в регионе интересов за последние 10—15—20 лет. Реконструкция ГМУ естественным образом включает постоянные, приливные и нагонные течения, в том числе экстремальные штормовые ситуации в регионе. Здесь используется предположение о квазипостоянстве гидрометеорологического режима для региона интереса, т. е. предполагается, что в ближайшем будущем климатические условия будут не слишком отличаться от тех, что были в недалеком прошлом.

Все сценарии ГМУ равновероятны и зависят лишь от выбора момента времени, который может быть ассоциирован с моментом начала аварии, внутри десятилетнего периода.

Сценарии распространения нефти

На основании сценария ГМУ рассчитывается сценарий распространения аварийного разлива нефти или нефтепродукта. В его рамках рассчитываются последовательные положения разлива, обусловленные переносом нефти по поверхности моря совокупным действием ветра и течений, оцениваются изменения геометрических (площади, толщины, линейных размеров) и физико-химических характеристик разлива нефти, таких как плотность и вязкость, изменяющиеся в результате выветривания нефти. Информация по каждому конкретному сценарию распространения нефти представляется в виде таблиц зависимостей от времени основных характеристик нефтяного разлива: координат, площади, количества испарившейся и диспергированной нефти, плотности остатка, количества воды в нефти.

Сценарии распространения разлива нефти или нефтепродуктов могут быть обработаны для получения статистических характеристик возможного воздействия разлива на уязвимые объекты в морской среде и в прибрежной зоне. В работе использованы результаты реконструкции гидрометеорологических условий в Карском море с детализацией в районе Обской губы, подробно описанные в [15]. Для расчета возможных траекторий распространения нефти проведены расчеты приводного ветра, течений и уровня моря для безледного периода (июль—сентябрь) с 2003 по 2012 гг.

На рис. 1 показаны три траектории возможного распространения нефти по акватории Обской губы Карского моря в безледный период. Каждая из них рассчитана на 10 сут и представлена

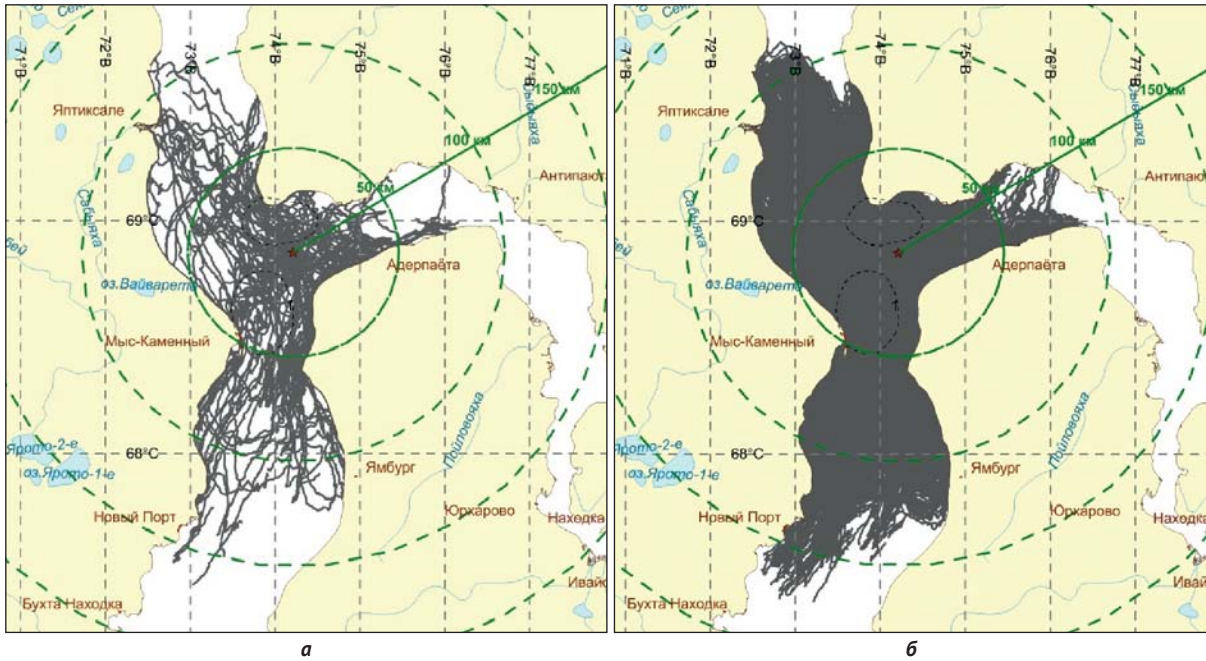


Рис. 2. Пример ансамбля траекторий распространения нефти по акватории Обской губы Карского моря

координатами центра пятна нефти (красная звездочка на рисунке) через полчаса интервалы. Каждой из представленных траекторий возможного распространения нефти соответствуют конкретные даты начала сброса нефти: № 480 — 21.07.2003 00:00 UTC, № 720 — 31.07.2003 00:00 UTC, № 1440 — 31.08.2003 00:00 UTC. Местоположение источника сброса нефти — 68,866° с. ш., 74,211° в. д.

Определенные проблемы связаны с расчетом продолжительных сценариев сброса нефти, которые, вообще говоря, могут продолжаться достаточно долго, вплоть до нескольких дней и даже недель. В этом случае эффективным представляется разбиение продолжительного разлива на серию часовых сбросов. При обработке результатов моделирования распространения «порций» нефтяного разлива могут быть получены сведения о протяженности подобного разлива и об изменении физико-химических характеристик его отдельных частей.

Приведенные три сценария распространения нефти — лишь малая часть ансамбля возможных сценариев распространения нефти.

На рис. 2 показаны траектории возможного распространения нефти по акватории Обской губы Карского моря лишь для одного 2003 г. (а — с дискретностью 1 сут, б — с дискретностью 1 ч). Всего для оценки вероятного распространения нефти в работе были рассчитаны 19 680 траекторий в пределах июля-сентября с 2003 по 2012 гг.

Требования к моделям распространения нефти

В соответствии с современными представлениями о процессах распространения и физико-химической трансформации нефти они описываются переносом

под действием ветра и течений [14], растеканием под действием сил плавучести и рассеянием за счет турбулентной диффузии, а также испарением, диспергированием, эмульгированием, изменением плотности и вязкости остатка на поверхности [8]. Математические модели расчета распространения и трансформации нефтяного разлива должны воспроизводить эти явления.

Следует учитывать, что нефть и нефтепродукты (в том числе и продукты — результат нефтехимической переработки) состоят из смеси фракций, каждая из которых имеет присущие ей физико-химические свойства, и смесь обладает результирующими физико-химическими свойствами (плотностью, вязкостью, поверхностным натяжением, температурой кипения, молекулярным весом и пр.). Модель для расчета распространения нефтяных разливов должна описывать эволюцию фракционного состава, изменение физико-химических свойств нефти на поверхности моря, эволюцию плотности, процессы эмульгирования за счет испарения, диспергирования и растворения компонентов нефти в воде.

Независимо от того, как нефть оказывается в водной среде (в результате действия поверхностного или подводного источника), она находится в ней в виде плавающего на поверхности пятна и в виде взвешенных в водной толще капель. Между нефтяным разливом и водной толщей происходит постоянный обмен нефтяными каплями; интенсивность и направление среднего потока зависят, в том числе, от энергии ветровых волн и плотности эмульсии (вода в нефти) в пятне на поверхности. Нефтяное пятно на поверхности воды подвержено, с одной стороны, переносу под действием течений и ветра,

Научные исследования в Арктике

с другой — множеству процессов трансформации, упомянутых выше.

Кроме того, в морской среде происходит сорбирование нефти твердыми частицами и осаждение их на дно, взаимодействие с береговой линией и/или со льдом, фотохимические реакции и биodeградация. Последние могут изменять свойства и уменьшать количество нефти за длительное время.

Расчет переноса (траектории) нефтяного пятна позволяет определить его положение в пространстве. Трансформационная часть моделей нефтяного разлива определяет переход нефти между различными средами (морской поверхностью, атмосферой, водной толщей, береговой областью, льдом, дном моря, биотой) и изменение ее характеристик (плотности, содержания воды, вязкости).

Математические модели нефтяного разлива, используемые в риск-анализе распространения разливов, с одной стороны, должны по возможности адекватно описывать перечисленные процессы трансформации нефти в морской среде. С другой стороны, поскольку речь идет об оценке риска и необходимости моделирования десятков и сотен тысяч сценариев разлива в различных гидрометеорологических условиях, модели должны быть оптимизированы для повышения быстродействия. Эти противоречивые требования следует учитывать, подбирая модели для описания распространения нефти в море, например, «отключая» для уменьшения времени расчетов каждого сценария модули турбулентного рассеяния диспергированной нефти в водной толще.

ГИС-ориентированный подход

Результаты риск-анализа традиционно представляются в форме таблиц, графиков и картографической информации в виде новых слоев на цифровых картах района интереса [3; 9; 13].

Для визуализации и последующего анализа процессов, происходящих в результате аварийного разлива нефти в море, необходима электронная картографическая основа (ЭКО). На сегодня таковой может, например, являться ЭКО Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане масштаба 1:500 000. Для планирования операций в районах портов могут потребоваться и более детальные карты, но следует иметь в виду, что в большинстве случаев данные гидрометеорологического прогноза рассчитываются с пространственным разрешением 1—10 км. Поэтому детализация карт в областях повышенного интереса будет носить скорее информационный характер.

Из необходимой картографической нагрузки отметим береговую контур, изобаты, устья рек, населенные пункты и элементы инфраструктуры, которые могут быть полезны для планирования действий, направленных на локализацию, ликвидацию или минимизацию последствий аварии.

При расчете переноса и растекания нефтяного разлива береговой контур используется в качестве

контактной границы. В зависимости от решаемых задач на береговом контуре могут быть заданы условия непротекания, поглощения или другие условия. Дополнительно к контуру берега задаются границы особо охраняемых природных территорий, значимость которых определена законодательством.

Примерный состав сведений для оценки риска распространения разливов нефти

Анализ риска распространения аварийных разливов нефти в морской среде после аварийного сброса предполагает определение областей акватории и побережья, где нефтяной разлив может привести к негативным последствиям для окружающей среды, оценку вероятности достижения и воздействия разлива на конкретные объекты (например, на особо охраняемые природные территории) или на производственные районы акватории и побережья в зоне потенциального воздействия (ЗПВ).

Анализ риска распространения нефти проводится для каждого возможного сценария технической аварии. Ниже в качестве примера приведены результаты расчетов для сценария гипотетической технической аварии, в результате которой в морскую среду на акватории Обской губы Карского моря сбрасывается 500 т дизельного топлива, продолжительность истечения составляет 1 ч.

Зоны риска

Одной из важных составляющих оценки риска воздействия на окружающую среду является определение зон риска распространения нефти. Зоны риска представляют собой поле минимального времени достижения участков акватории. Они определяются путем обработки ансамбля равновероятных траекторий движения нефтяных пятен, обусловленных гидрометеорологическими условиями рассматриваемого региона.

Для расчета зон риска область/зона потенциального воздействия от разлива, определяемая по ансамблю траекторий за 10 лет, покрывается сеткой с пространственным разрешением, достаточно подробным для описания особенностей распределения статистических характеристик ансамбля траекторий, но не слишком мелким для исключения шума, обусловленного дискретизацией времени сброса нефти. В рассмотренном случае шаг сетки по пространству — 2 км (рис. 3б). Для каждой ячейки сетки, покрывающей ЗПВ, определяется минимальное время достижения данной области акватории. Эта характеристика чрезвычайно важна для принятия решения об обеспечении готовности к реагированию, так как учитывает все встречавшиеся в регионе интереса гидрометеорологические ситуации и дает основания для утверждения, что объекты, находящиеся за пределами зон риска, не будут подвержены негативному воздействию разливов нефти в пределах указанных промежутков времени. Сеточное представление необходимо как промежуточная стадия для перехода

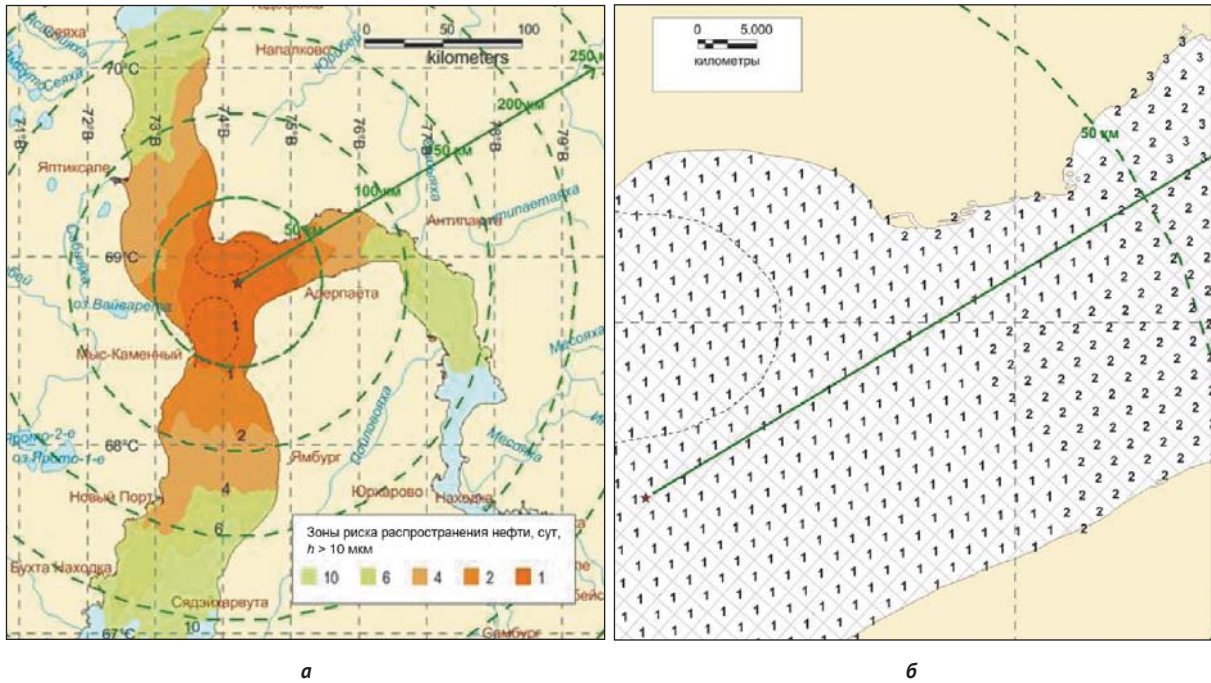


Рис. 3. Пример расчета зон риска распространения нефти по акватории Обской губы Карского моря для выбранного сценария технической аварии

к конечному представлению зон риска распространения нефти в виде контуров или изолиний, ограничивающих соответствующие области (рис. 3а).

Зоны риска зависят от особенностей аварийного сброса нефти — объема пролитой нефти, продолжительности истечения, глубины, на которой расположен источник. При расчете зон риска необходимо учитывать состояние разлива в моменты достижения тех или иных участков акватории. На приведенном примере зоны риска рассчитывались из условия, что к моменту достижения определенной области акватории средняя толщина пятна нефти на поверхности моря будет не менее 10 мкм — предельной толщины, когда операции по сбору нефти могут быть сколько-нибудь эффективными.

Конфигурация зон риска в открытых районах моря определяется пространственно-временной структурой поля ветра и соответствующими им полями течений, а также ледовыми условиями. В прибрежных районах зоны риска изменяются за счет особенностей прибрежной циркуляции и влияния береговой черты.

Вероятности воздействия на участки акватории и побережий

Приведенные оценки зон риска распространения нефти представляют экстремальные характеристики для распространения нефти и относятся к категории консервативных, т. е. сделанных с осторожностью, с запасом (conservative estimate) при максимально неблагоприятных предположениях. В то же время интерес представляет и вероятность реализации

тех или иных последствий аварийного сброса нефти. С этой целью для каждого элемента сеточной области, покрывающей ЗПВ от разлива нефти согласно сценарию технической аварии, определяется вероятность наступления неблагоприятного события, а именно того, что в результате распространения нефти от источника, определенного метеорологическим сценарием, разлив нефти достигнет рассматриваемой области и при этом толщина пленки нефти на поверхности будет превышать предельную для операций ЛАРН. Возможны и другие критерии отбора неблагоприятных событий.

Оценка вероятности воздействия разлива нефти на участки акватории и побережий проводится на основе 10-летнего ансамбля возможных сценариев распространения нефти. Представляется важным отметить, что вероятность воздействия разлива нефти на уязвимые объекты (УО) зависит от взаимного расположения источника сброса нефти или нефтепродукта и УО, от масштаба сброса, от пространственных размеров УО и времени t_p , прошедшего после аварии.

Для подсчета вероятности воздействия разлив нефти на поверхности моря представляется в виде условного круга радиусом R_s (набора кругов для продолжительного источника) с площадью, равной площади разлива (части разлива). К неблагоприятным событиям $P(x, y, R_s, R_p, t_p, h_s) \neq 0$ будем относить пересечение данного круга (набора кругов) с областью, ассоциированной с УО и также задаваемой в виде некоего круга с радиусом R_p , например, 1, 2, 4 и 8 км, при условии, что в момент пересечения

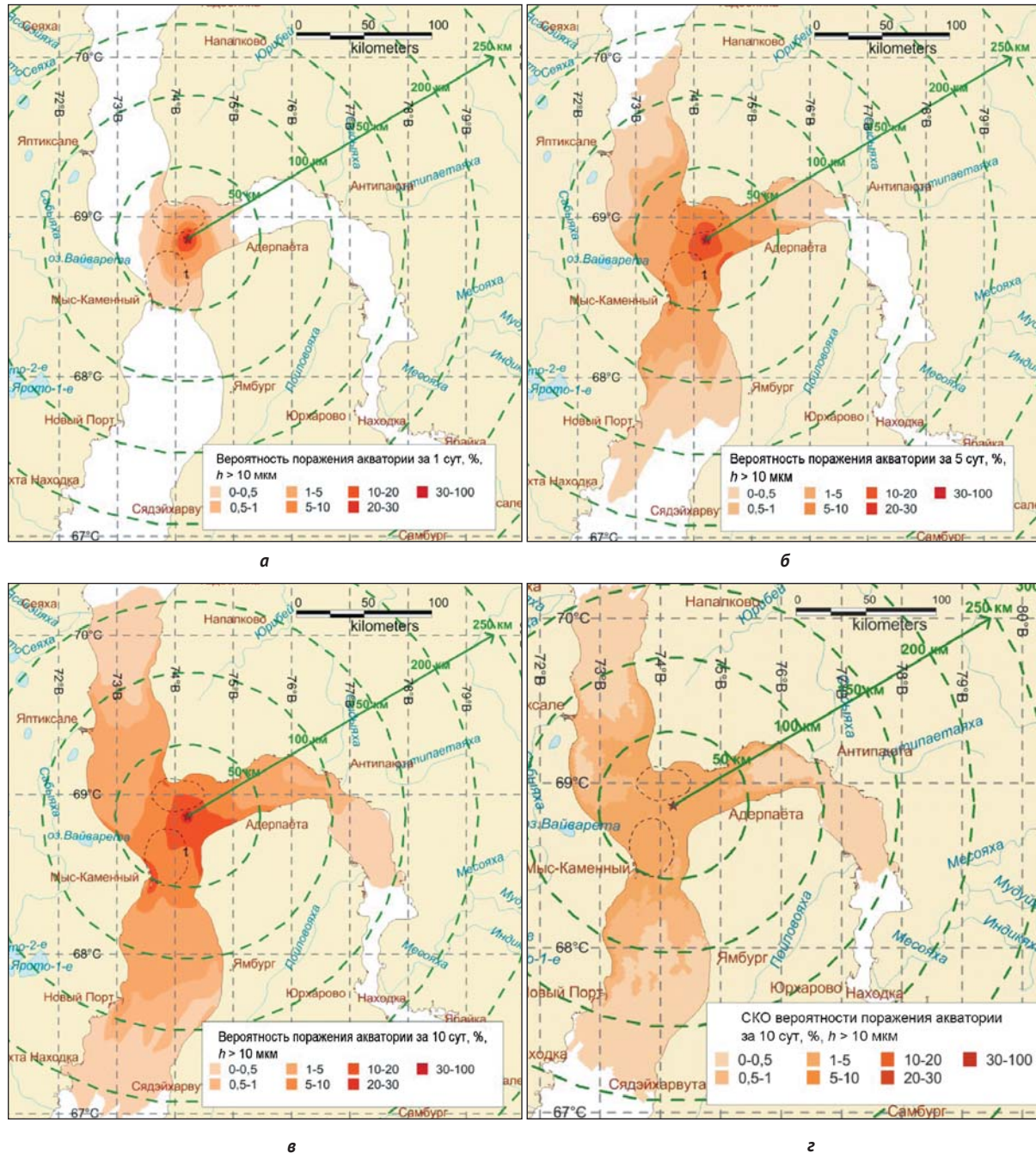


Рис. 4. Пример расчета вероятности воздействия разлива нефти на участки акватории побережий Обской губы Карского моря

$t_{\text{cross}} < t_p$ средняя толщина пленки нефти выше заданной: $h < h_s$.

Вероятности воздействия разлива нефти на участки акватории и побережий наряду с вероятностью возникновения аварии служат для оценки экологических рисков в отдельных областях морской акватории. Экологический риск может быть вызван чрезвычайными ситуациями природного, антропогенного и техногенного характера. В количественной характеристике экологических рисков для морских

вод и морской биоты можно также использовать вероятность превышения установленных значений ПДК, числа погибших особей какого-либо вида или других подобных расчетных характеристик. На рис. 4 приведены поля вероятности достижения разливом участков акватории Обской губы Карского моря за 1, 5 и 10 сут от начала разлива, полученные для сценариев распространения нефти за 10 лет. Кроме того, на рис. 4г представлено поле среднеквадратического отклонения вероятности достижения участков

Таблица 1. Протяженность береговой линии Обской губы Карского моря, вероятность достижения участков которой при аварии выше заданной, км

Время, сут	Вероятность, %						
	30	20	10	5	1	0,5	> 0
5	0	0	28	120	393	482	771
10	0	0	101	286	743	906	1143

акватории за 10 сут, полученное путем обработки вероятностей воздействия по отдельным годам.

Видно, что вероятность обнаружить нефтяной разлив увеличивается со временем и уменьшается по мере удаления от точки возможного сброса нефти. Асимметрия поля вероятности на рис. 4а обусловлена региональными особенностями гидрометеорологических условий. На рис. 4б и 4в проявляется влияние конфигурации береговой линии, например, зона увеличения вероятности у мыса Каменный. Рисунок 4г позволяет качественно оценить влияние межгодовой изменчивости гидрометеорологических условий. Максимальные значения (не превышают 5%) среднеквадратического отклонения (СКО) значений вероятности воздействия нефтяного разлива на морскую среду наблюдается в области с центром в точке разлива, к периферии происходит постепенное их уменьшение, при этом отношение СКО вероятности к значению средней за 10 лет вероятности, напротив, возрастает по мере удаления от точки разлива.

Анализ экологического риска и рассмотрение экономических и социальных последствий реализации проектируемой хозяйственной деятельности позволяют определить, являются ли риски аварии приемлемыми. Риск эксплуатации объекта приемлем, если ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на этот риск. Таким образом, приемлемый риск представляет собой некоторый компромисс между уровнем безопасности и возможностями его достижения. Среди инструментов определения приемлемости рисков отметим государственную экспертизу и публичные общественные слушания.

Другой статистической характеристикой ансамбля траекторий распространения разливов являются диаграммы/розы распространения разливов (ДРР). ДРР строятся подобно тому, как в метеорологии строятся розы ветров. Концы траекторий распространения разливов соединяются с точкой, где расположен источник сброса нефти, и таким образом получают вектора переноса нефтяных пятен за определенное время (сутки, двое, трое и т. д.). Примеры ДРР представлены на рис. 5.

В рассмотренном примере проявляются две особенности. Во-первых, существенное изменение распределения переносов нефти по направлениям. Если для первых суток ДРР определялось в основном метеорологическими характеристиками, то для 5 сут и тем более для 10 распределение переносов нефти

определяется геометрией береговой черты и представляет распространение в единственно возможных направлениях по акватории Обской и Тазовской губ. Во-вторых, заметно существенное замедление увеличения размеров зоны потенциального воздействия (RM) со временем, что связано с выходом за границы синоптического периода 5—7 сут.

Вероятности воздействия на береговую зону и особо охраняемые природные территории

Защита побережий от негативного воздействия нефтяных разливов является одним из приоритетов в операциях ЛАРН. По этой причине оценка вероятности достижения нефтью берега всегда проводится в рамках риск-анализа распространения разливов. Эти оценки зависят от сценария технической аварии и могут быть представлены по-разному. Например, можно рассчитать вероятность достижения разливом нефти берега при условии, что средняя толщина нефти на поверхности будет выше заданной (рис. 6а).

На рис. 6б продемонстрировано, как вероятность достижения берега зависит от режима сброса нефти. Естественно, что приведенные оценки имеют место только для разлива по сценарию технической аварии, приведенной выше, и для гидрометеорологических условий Обской губы в летний период. При расчете предполагается, что никакие меры противодействия разливу нефти не предпринимаются.

Обработка сценариев распространения разливов нефти позволяет получить оценку вероятности достижения нефтяным разливом отдельных участков береговой линии. Аналогично расчетам для произвольных участков акватории вероятность воздействия на участки береговой зоны будет зависеть от их пространственных размеров. На рис. 7 приведен фрагмент полученного поля для $R_i = 2$ км. Цифрами указаны значения вероятности, области береговой зоны окрашены в соответствии с приведенной на рисунке легендой.

В табл. 1 приведены интегральные характеристики вероятности воздействия на береговую зону, а именно протяженности участков береговой линии с вероятностью воздействия, превышающей заданные пороговые значения. Информация, приведенная на рис. 5, позволяет произвести типизацию участков береговой линии с точки зрения вероятности достижения их нефтяным разливом. Подчеркнем, что вероятность обнаружить нефть в той или иной части

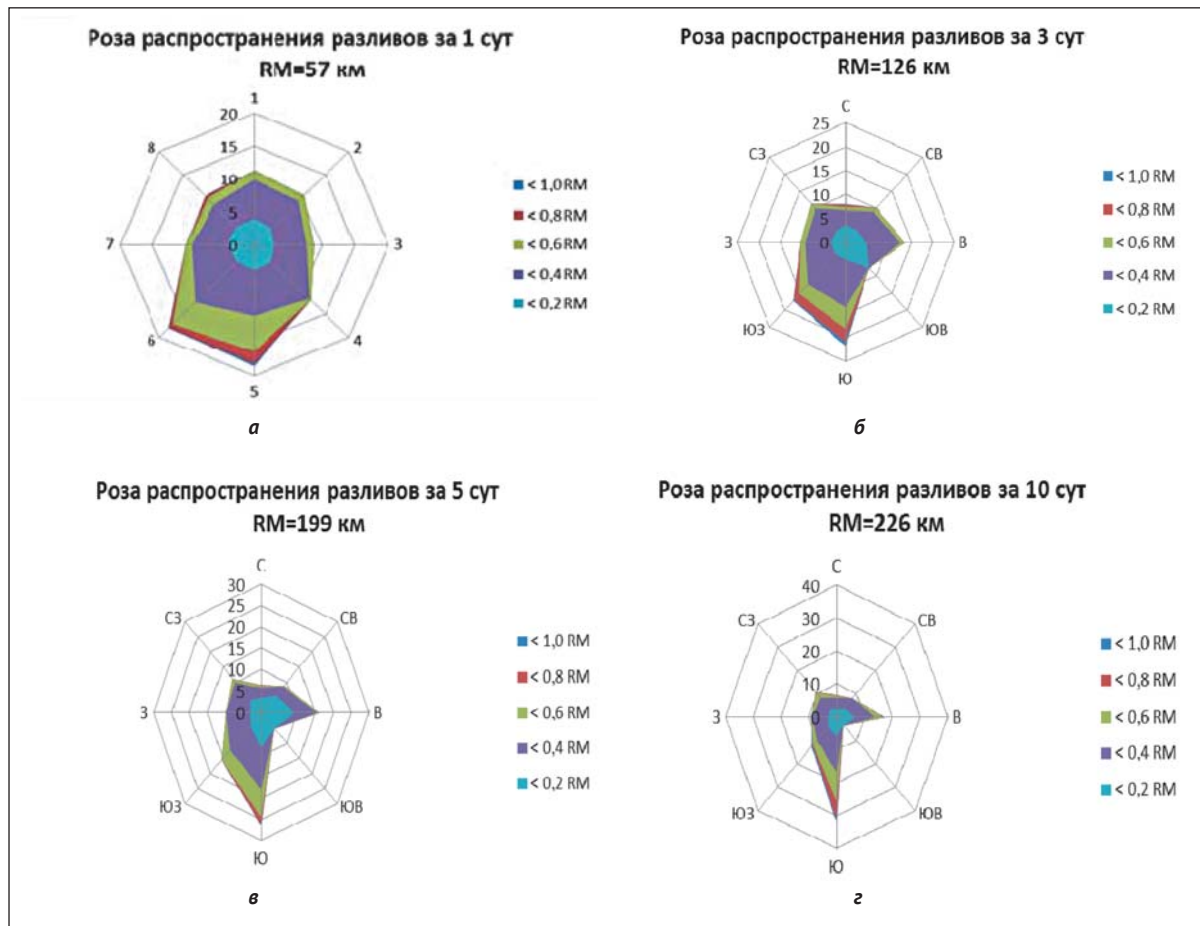


Рис. 5. Примеры расчета диаграмм распространения нефти по акватории Обской губы Карского моря

акватории или у береговой линии при эксплуатации промышленного объекта рассчитывается как произведение вероятности возникновения технической аварии на вероятность достижения соответствующей точки на акватории или на берегу, рассчитанные в результате проведения риск-анализа распространения нефти.

Из табл. 1 можно сделать вывод, что нефть, попавшая в море в результате рассматриваемой технической аварии, под действием гидрометеорологических факторов за 10 сут потенциально может привести к негативным последствиям на береговой линии протяженностью более 1000 км. При этом средняя по сценариям протяженность загрязненной береговой линии существенно меньше. Разнообразие гидрометеорологических сценариев для рассматриваемой акватории, частично показанное на рис. 1 и 2, приводит к ненулевой вероятности достижения разливом нефти отдельных участков более чем 1000-километровой зоны потенциального воздействия на береговую зону. Однако, как показано ниже, масштабы конкретного разлива для рассматриваемого сценария технической аварии (500 т дизельного топлива за час) не будут превышать за 10 сут 5—10 км², или в линейной мере 2—3 км. Таким образом, если

разлив с указанными параметрами произойдет, следует ожидать воздействия на береговую зону с масштабом 2—3 км, который может увеличиться в разы (но не на порядки) при неблагоприятном направлении ветра, но при одновременном снижении количества нефти на погонный метр побережья.

Участки, расположенные вблизи источника разлива, будут подвергаться риску загрязнения в большей степени, чем находящиеся на периферии ЗПВ.

Оценка выветривания нефти

Масштаб воздействия нефтяного разлива на водную среду и побережье существенно зависит от объема разлива и интенсивности процессов выветривания нефти (рис. 8).

Главными составляющими процесса выветривания нефти являются испарение нефтяных фракций в атмосферу и поток капель с поверхности в водную толщу за счет обрушения волн и вертикального перемешивания. Минимальное выветривание соответствует периодам со слабыми скоростями ветра и практически полностью определяется испарением летучих фракций из нефтяного слика. Максимальное выветривание происходит при сильном ветре,

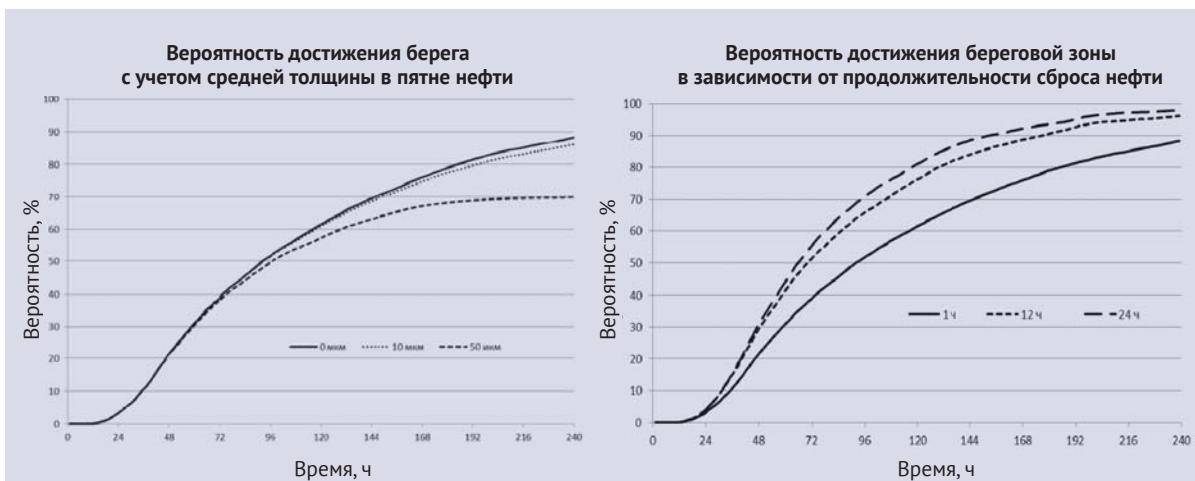


Рис. 6. Вероятность достижения разливом нефти береговой зоны Обской губы Карского моря

когда большая часть нефти попадает в виде капель в водную толщу.

При статистической обработке разнообразных сценариев распространения и эволюции нефти в морской среде минимальные и максимальные оценки относятся к категории маловероятных. По этой причине, обрабатывая результаты расчетов по выветриванию нефти, 5%, 10% и 20% экстремальных значений мы выделили в отдельную категорию. Таким образом, в таблицах и на графиках ниже оценки «Мин 95%», «Макс 95%» соответствуют выветриванию для 95% сценариев за исключением крайних — штормовых и штилевых, «Мин 90%», «Макс 90%», «Мин 80%», «Макс 80%» — аналогично.

Интенсивность и конечный результат испарения фракций из нефтяного slicka зависят прежде всего от температуры поверхности моря и свойств нефти. Фракции с температурой кипения до 200°C испаряются в течение первых суток, чуть позже — фракции с температурой кипения до 250—300°C. В летний и осенний периоды интенсивность испарения выше.

При больших скоростях ветра обрушение волн, разрушение поверхностной пленки на капли, «забивание» капель в водную толщу приводит к «исчезновению» разлива нефти с поверхности моря, если только нефть не имеет

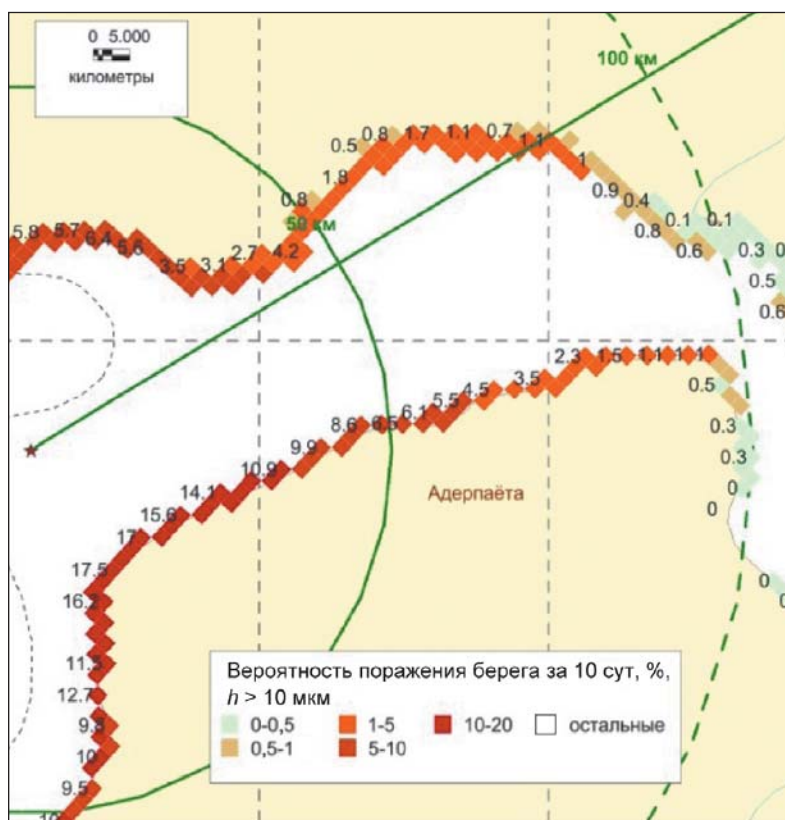


Рис. 7. Пример расчета вероятности воздействия разлива нефти на участки береговой линии Обской губы Карского моря

склонности к образованию эмульсии типа вода-в-нефти, что во многих случаях связано с содержанием асфальтенов в исходной нефти.

Масштаб вероятного поражения объектов на акватории и побережье зависит в первую очередь от объема аварийного сброса нефти. Для крупных разливов формирование зоны поверхностного загрязнения происходит в течение продолжительного времени за счет гидродинамического растекания. В случае малых разливов зона загрязнения формируется путем турбулентной диффузии. Линейные и площадные характеристики зоны загрязнения могут изменяться в ситуациях, когда

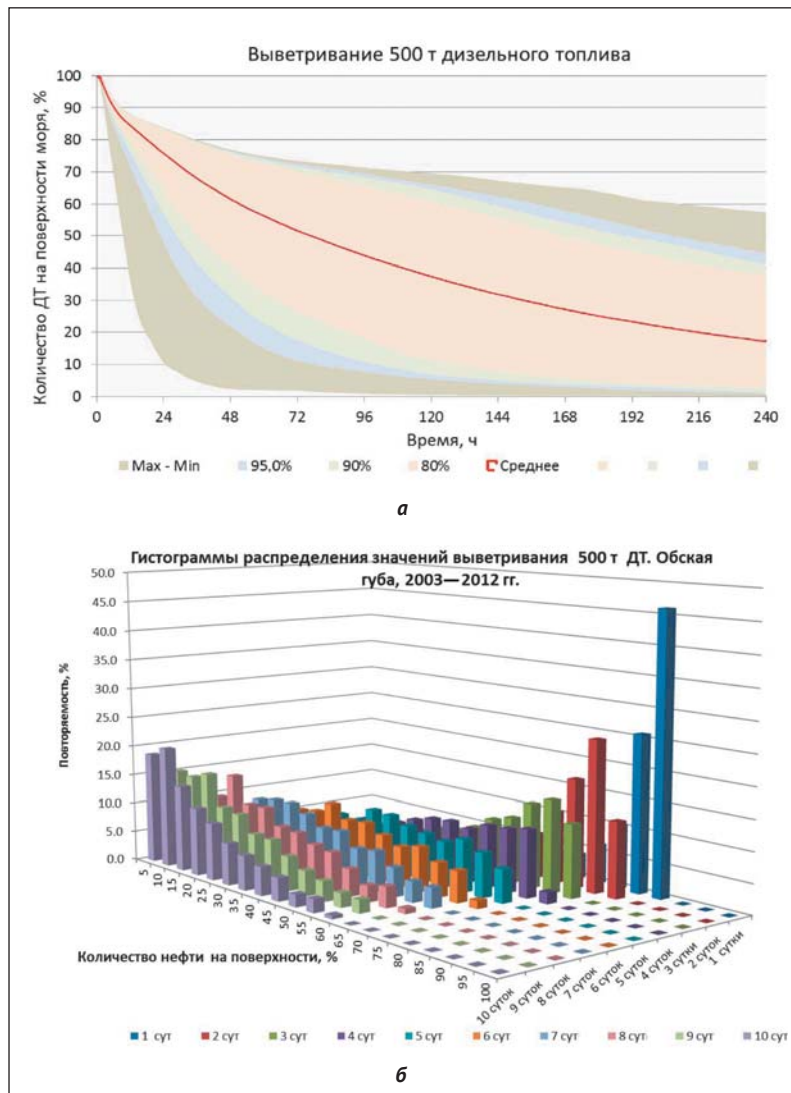


Рис. 8. Статистические характеристики «выветривания» нефтепродукта

в результате действия ветра и гидродинамического растекания нефтяное пятно взаимодействует с береговым контуром или другой контактной границей и при продолжительном аварийном сбросе при наличии течений и ветра.

Однотонные вложенные области на рис. 8а соответствуют двусторонним интервалам «выветривания» 80%, 90%, 95% и обозначенному «Макс - Мин» (соответствует 100%). Линии, ограничивающие однотонные области, вообще говоря, представляют соответствующие процентилю выборки данных. Максимальное выветривание («Макс») имеет место при штормовых ситуациях, вероятность его реализации мала. Минимальное выветривание («Мин») означает самое слабое выветривание, которое происходит в штилевых условиях. Среднее (по сценариям) значение количества нефти на поверхности моря (в период с июля по сентябрь), показанное на рисунке, примерно соответствует медиане распределения. С другой стороны, на рис. 8б показано изменение гистограмм распределения количества нефти на поверхности моря со временем. В первые сутки после разлива большую повторяемость имеют высокие значения количества нефти на поверхности, соответствующие малому выветриванию (большая толщина пленки нефти препятствует оттоку нефти в водную толщу), а с течением времени большую

повторяемость имеют малые значения остатка нефти на поверхности моря, что соответствует большей эффективности выветривания за счет диспергирования, тем более что легколетучие компоненты из нефтяного пятна к этому моменту времени уже удаляются. Таким образом, указанное среднее, вообще говоря, не является наиболее вероятным значением выветривания.

Оценка изменения физико-химических характеристик

После попадания нефти в морскую акваторию она претерпевает ряд физических и химических изменений, некоторые из которых приводят к ее устранению с морской поверхности, в то время как другие способствуют ее сохранению. Поведение разлитой нефти в морской среде зависит от таких факторов, как размер разлива, изначальные физические и химические характеристики нефти, преобладающие погодные условия, состояние моря и то обстоятельство, остается нефть в море или выносится на берег.

Понимание происходящих процессов и того, каким образом совокупность данных процессов изменяет химический состав и поведение нефти с течением времени, существенно важно для всех аспектов ликвидации разливов нефти. Например, в ряде случаев можно с уверенностью предсказать, что нефть не достигнет уязвимых природных ресурсов по причине естественного рассеяния, так что операций по очистке не потребуется. В случае же необходимости активного реагирования на разлив выбор наиболее эффективных мероприятий будет зависеть от вида нефти и ее вероятного поведения.

Виды сырой нефти различного происхождения широко отличаются по физическим и химическим свойствам, в то время как многие продукты нефтепереработки имеют четко определенные характеристики независимо от того, из какого вида сырой нефти они были получены. Основными

физическими свойствами, которые влияют на поведение и стойкость нефтяного пятна в море, являются плотность, дистилляционные характеристики, давление насыщенных паров, вязкость и температура застывания. Все эти свойства зависят от химического состава, а именно от содержания летучих компонентов, асфальтенов, смол и парафинов. Многие виды нефти поглощают воду с образованием водонефтяных эмульсий, что может вызвать увеличение объема загрязнителя вплоть до пятикратного. Эмульсии легче всего образуют те виды нефти, которые в разлитом состоянии имеют совместную концентрацию никеля и ванадия свыше 15 частей на миллион или содержание асфальтенов свыше 0,5% [7].

Процессы испарения, охлаждения и образования водонефтяной эмульсии контролируют изменение вязкости и плотности нефти на поверхности моря и могут быть рассчитаны по известным соотношениям [16]. Несмотря на это, некоторые коэффициенты существенно зависят от свойств конкретной нефти и, вообще говоря, должны определяться в результате специальных экспериментов.

Оценка изменения геометрических характеристик разлива нефти по сценарию технической аварии

Формирование конфигурации нефтяного загрязнения на поверхности моря происходит в результате растекания нефти как легкой жидкости по поверхности более тяжелого субстрата за счет деформации нефтяного пятна пространственно неоднородным полем ветра и течений, рассеивания отдельных сликов под действием волновых и турбулентных процессов.

Процесс растекания играет важную роль на начальных стадиях, когда толщина нефтяной пленки на поверхности достаточно велика. Продолжительность этой фазы зависит от объема разлива. В дальнейшем формирование конфигурации нефтяного загрязнения определяется процессами турбулентной диффузии, обусловленной локальной неоднородностью полей ветра и течений.

Ниже представлен пример оценки геометрических характеристик разливов по сценарию сброса нефти, описанному в начале статьи. Геометрические характеристика и конфигурация разлива нефти и нефтепродуктов на поверхности моря определяются тремя основными факторами: объемом сброса, режимом сброса и гидрометеорологическими условиями. На рис. 9 приведен расчет изменения площади пятна и количества нефтепродукта на поверхности моря со временем при постоянной скорости ветра 0, 3, 5, 7 и 10 м/с и отсутствии течений иной природы, например, приливных, сгонно-нагонных и бароградиентных. Обращает на себя внимание тот факт, что при скорости ветра 10 м/с площадь нефтяного разлива на поверхности моря уменьшается за счет интенсивного выветривания/диспергирования в водную толщу. Расчеты проведены по модели нефтяного разлива SPILLMOD [4].

Приведенные расчеты соответствуют сбросу 500 т дизельного топлива на поверхность моря в летних условиях в течение часа и проведены с учетом выветривания, т. е. оттока массы нефти в атмосферу при испарении и «забивании» капель нефти в воду при диспергировании, обусловленном ветровым волнением. Приведенные данные позволяют оценить масштаб воздействия, который зависит от количества сброшенной в воду нефти и ее физико-химических свойств, режима сброса (продолжительного или одномоментного), гидрометеорологических условий. Масштаб воздействия (прежде всего линейные размеры области загрязнения) может измениться на порядок величины в зависимости от конфигурации береговой линии по отношению к направлению ветра и при деформации нефтяного слика сдвиговыми течениями.

Вообще говоря, рассмотрение сценариев с постоянной скоростью ветра и отсутствием течений, особенно в приливных морях, несколько искусственно. Однако оценки наиболее важных характеристик разлива нефти, полученные в рамках этих сценариев, дают представление о масштабах явления. В то же время следует признать, что оценки площади загрязнения на поверхности моря при штормовых условиях, сильных ветрах и ветровом волнении нуждаются в уточнении. Сильные ветра и обусловленное ими ветровое волнение приводят к формированию трехмерного поля загрязнения и постоянному перетoku массы нефти с поверхности в водную толщу и обратно. В приведенных оценках геометрических характеристик нефтяного разлива процессы формирования вторичных источников загрязнения за счет всплывания капель нефти на поверхность не рассматриваются.

О погрешности вычислений параметров в риск-анализе распространения аварийных разливов нефти

Целью настоящей работы является описание методологии риск-анализа как процедуры объективной, по нашему мнению, оценки риска распространения аварийных разливов нефти и нефтепродуктов и обсуждение целесообразности включения в состав оценки риска перечисленных выше карт, диаграмм и таблиц. Все представленные результаты получены методами математического моделирования на основании математических моделей процессов, от которых зависит судьба нефти в море, и необходимого набора исходных данных.

Надо признать, что степень изученности факторов и процессов, контролирующих поведение нефти в море, заслуживает скорее неудовлетворительной оценки. В большой степени судьба нефти в море зависит от ее химического состава, определяющего в итоге и физические свойства, такие как плотность, вязкость и способность образовывать эмульсии, растворимость в морской воде. Использование при риск-анализе «прототипов» нефти вносит дополнительные искажения во все расчетные характеристики.

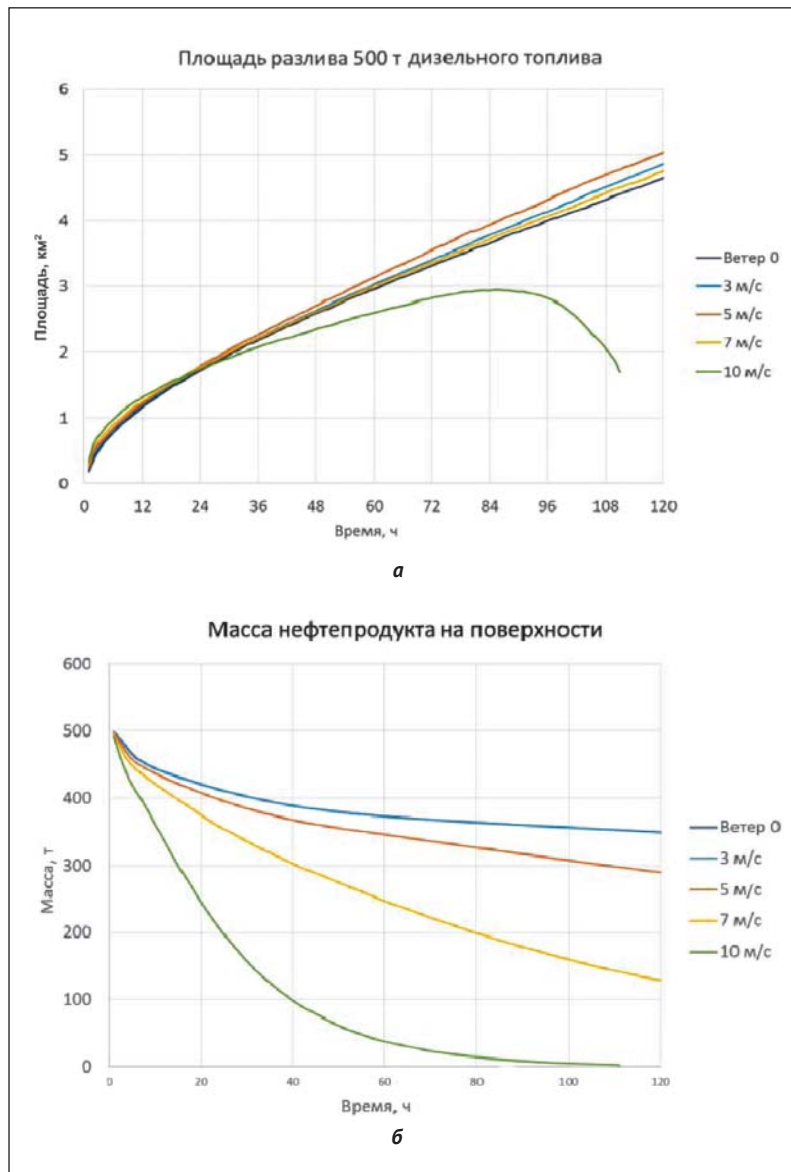


Рис. 9. Изменение площади и массы нефтепродукта на поверхности моря для разлива 500 т дизельного топлива

Локальные гидрометеорологические условия, к которым относятся поля приводного ветра, ветрового волнения, температуры воды и воздуха, поля течений, температуры, солёности и плотности воды в океане, определяющие распространение загрязнения в окружающей среде, могут быть рассчитаны/реконструированы с погрешностью, трудно поддающейся простому анализу. По этой причине прежде чем использовать данные реконструкции ГМУ в процедуре риск-анализа распространения аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, следует убедиться в их репрезентативности путем сравнения с доступными данными наблюдений.

Численные модели морской динамики, несмотря на их очевидный прогресс, недостаточно хорошо описывают процессы в прибрежной зоне, учет которых необходим для адекватного описания трансформации поля нефтяного загрязнения при подходе к берегу. Одной из причин такого положения является отсутствие информации о батиметрии, геоморфологии и типах берегов с разрешением, соответствующим пространственным характеристикам потенциальных сбросов нефти в морскую среду.

Другая понятная причина — необходимость использования иерархии атмосферных и океанических моделей для описания локальных особенностей гидрометеорологических характеристик в районе аварии. Дополнительные проблемы в описании процессов в прибрежной зоне вносит речной сток, как правило, не учитываемый в моделях глобальной морской динамики, но, очевидно, важный при формировании циркуляции вблизи берегов, как, впрочем, и особенности орографии прибрежной зоны для ветрового режима.

Большая часть перечисленных выше источников погрешности при оценке риска распространения аварийных разливов нефти носит на сегодня характер фундаментальных проблем. Тем не менее, на наш взгляд, результаты оценки риска распространения разливов предоставляют полезный информационный базис для обоснования системы первоочередных мер по минимизации негативных последствий возможного нефтяного загрязнения акваторий и побережий в регионах, где проводятся разведка, добыча и транспортировка нефти и нефтепродуктов.

Заключение

Упреждающие оценки негативных воздействий нефтяных загрязнений на уязвимые объекты на акваториях и побережьях с целью выработки оптимальных стратегий противодействия разливу нефти и мер защиты окружающей среды могут быть получены только методами математического моделирования. Особенно остро эта задача определена для арктических регионов России, где идет интенсивное освоение нефтегазовых ресурсов континентального шельфа.

Аварийный разлив нефти в море — это случайное событие, время, место и масштаб которого трудно предугадать. В настоящей работе мы предположили, что всё, кроме времени наступления аварийной ситуации, известно. Дальнейшим развитием риск-анализа может быть рассмотрение других

параметров задачи как случайных величин, что приведет к нарастанию как алгоритмической, так и вычислительной сложности. В случае стационарной платформы точка разлива точно известна, а объем разлива и момент возникновения — случайные величины, в случае подводного трубопровода при разрушении стамухой или аварии судна снабжения местоположение точки сброса нефтепродуктов и момент возникновения аварии также случайны. В общем случае потребуется включить в рассмотрение набор случайных величин, который в зависимости от проектных данных (сценария технической аварии) может включать координаты и продолжительность сброса, объем и тип нефтепродукта.

В статье предпринята попытка описать базовую процедуру или метод (риск-анализ) для объективной оценки риска распространения аварийных разливов нефти в морской среде. Риск-анализ в настоящее время проводится для вариантов возможной технической аварии, которые определяются анализом применяемых технологий и оборудования для разведки, добычи и транспортировки нефти.

Приведенный в работе состав материалов оценки риска распространения аварийных разливов нефти представляется необходимо полным для учета гидрометеорологических факторов в планах ЛАРН и может быть расширен, например, за счет определения вероятности возникновения высоких уровней загрязнения в водной толще и расчета других характеристик, необходимых для оценки воздействия на окружающую среду.

Определенные трудности представляет риск-анализ распространения разливов нефти и нефтепродуктов в ледовых условиях. Наряду с необходимостью описывать дополнительные процессы трансформации нефтяного разлива на льду, подо льдом или в дрейфующем льду реконструкция ГМУ в этой ситуации требует также расчета положения кромки льда и скорости движения ледового покрова.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллегам Н. А. Дианскому и В. В. Фомину за предоставленные материалы по реконструкции гидрометеорологических условий в Обской губе Карского моря.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Русского географического общества в рамках научных проектов № 13-05-41214 РГО_а и 14-07-00513.

Литература

1. Журавель В. И., Журавель И. В. Количественная оценка риска и ограничение последствий выбросов // Oil & Gas J. Russia. — 2013. — 17 дек. (<http://www.ogjrus.com/issues/article/issue-article-17-2013>).
2. Инструкция по экологическому обоснованию хозяйственной и иной деятельности. — Утв. Минприроды РФ 29 декабря 1995 г. № 539.
3. Овсиенко С. Н., Зацева С. Н., Ивченко А. А. Математическое моделирование как элемент информационной

поддержки принятия решения при выборе стратегии защиты морской среды от нефтяного загрязнения // Труды ГОИН: Вып. 213. — М.: Гидрометеоздат, 2011.

4. Овсиенко С. Н., Зацева С. Н., Ивченко А. А. Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Труды ГОИН: Вып. 209. — М.: Гидрометеоздат, 2005. — С. 248—271.
5. Патин С. А. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. — М.: Изд-во ВНИРО, 2008. — 508 с.
6. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (редакция от 2 июля 2013 г.).
7. Последствия загрязнения нефтью для окружающей среды: Технический информационный документ. Вып. 13 — Canterbury: ITOPF, 2011. — 12 с. (http://www.itopf.com/information-services/publications/Russian/documents /TIP12_RU_EffectsofOilPollutiononSocialandEconomicActivities.pdf).
8. State-of-the-art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills / ASCE Task Committee on Modeling Oil Spills // J. of Hydraulic Engineering. — 1996. — 122 (11). — P. 594—609.
9. Castanedo S., Abascal A. J., Medina R. et al. Development of a GIS-based oil spill risk assessment system // OCEANS 2009 — EUROPE. — Bremen, 2009. — P. 1—9.
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. of the American Meteorological Society. — 1996. — Vol. 77, № 3. — P. 437—471.
11. Kochergin I. E., Bogdanovsky A. A., Budaeva V. D. et al. Modeling of oil spills for the shelf conditions of northeastern Sakhalin // PICES Scientific Report. — 1999. — № 12. — P. 123.
12. Skognes K., Johansen O. Statmap — a 3-dimensional model for oil spill risk assessment // Environmental Modelling & Software. — 2004. — 19. — P. 727—737.
13. Ovsienko S. An updated assessment of the risk for oil spills in the Baltic Sea area. — Turku, 2002 (http://meeting.helcom.fi/c/document_library/get_file?p_l_id=18986&folderId=76777&name=DLFE-31051.pdf).
14. Spillane K. T. The Movement of Oil on the Sea Surface // Fourth Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics at Monash University, Melbourne, 1971.
15. Дианский Н. А., Фомин В. В., Кабатченко И. М., Грузинов В. М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печерского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 1 (13). — С. 57—73.
16. Reed M., Johansen O., Brandvik P. J. et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art // Spill Science and Technology Bull. — 1999. — 5, № 1. — P. 3—16.