

ИНКРЕМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ КРИТИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ

С.Н. ЗАЦЕПА¹, В.И. ЖУРАВЕЛЬ²,
А.А. ИВЧЕНКО¹, В.В. СОЛБАКОВ³,
В.В. СТАНОВОЙ⁴

¹ — Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, e-mail: zatsepa@gmail.com

² — Научно-методический центр «Информатика риска», Москва, e-mail: v.jouravel@ric.msk.ru

³ — ФИЦ «Информатика и управление» РАН – ВЦ РАН, Москва, e-mail: solbakov@ccas.ru

⁴ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: vstanovoy@yandex.ru

В работе обсуждается проблема использования результатов математического моделирования при подготовке мероприятий по обеспечению экологической безопасности шельфовых нефтегазовых проектов. Инкрементальный подход при выборе критических сценариев распространения в море разливов нефти выбран как ключевой принцип формирования подмножества вариантов развития аварийной обстановки. Последовательное применение критериев отбора позволяет выбрать критические сценарии для анализа эффективности различных стратегий реагирования, которые обеспечивают уровень готовности сил и средств, достаточный для обеспечения экологической безопасности с приемлемым уровнем риска.

Ключевые слова: математическое моделирование, разливы нефти в море, план ликвидации разлива нефти.

Минимизация экологических рисков при осуществлении нефтедобычи и транспортировки на морских акваториях считается приоритетной задачей при проектировании и реализации шельфовых проектов, в особенности в арктических регионах. Важным мероприятием по предотвращению или минимизации негативных последствий возможных аварий является разработка Плана предупреждения и ликвидации разлива нефти в море (ЛРН). На основании применимой статистики происшедших ранее аварий может быть оценен технический риск возникновения аварийных ситуаций со сбросом в море нефти или нефтепродуктов, на основании которого с учетом нормативных требований определяются возможные сценарии технических аварий* и максимальные расчетные объемы разливов нефти при реализации проектов на континентальном шельфе. Концепция риск-анализа *распространения в море* аварийных разливов нефти (Зацепы и др., 2014, 2015, 2016) базируется на постулате, что

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

инцидент может произойти в любое время, иногда в неизвестном месте, с не вполне определенным объемом разлива и при заранее неизвестных гидрометеорологических условиях. Проблема заключается в том, что получаемые при анализе риска оценки имеют вероятностный характер, тогда как основная задача Плана ЛРН — определение состава и размещения сил и средств — чаще всего требует вполне определенного, чаще всего единственного и, желательно, оптимального решения. Это не так трудно сделать для одного или нескольких определенных сценариев распространения разлива*, но становится трудной, скорее всего, неформальной и эвристической, задачей, когда мы имеем дело с ансамблем равновероятных сценариев с самыми различными последствиями.

Действующие правила (ПП №1189, 2014) не содержат каких-либо требований или рекомендаций по этому вопросу, ограничиваясь указанием на то, что план ЛРН должен содержать «прогнозируемые зоны распространения разливов нефти и нефтепродуктов при неблагоприятных гидрометеорологических условиях с описанием возможного характера негативных последствий разливов нефти и нефтепродуктов для окружающей среды, населения и нормального функционирования систем его жизнеобеспечения». Это нормативное требование предполагает оценку зоны возможного воздействия разливов нефти на уязвимые объекты в районе интереса и их последствий в пределах этой зоны.

В нормативной литературе распространены два подхода к оценке вероятности и последствий аварий (см., например, (РД-03-14–2005)):

– наиболее вероятная авария — с максимальной вероятностью реализации за определенный период времени;

– наиболее опасная по последствиям авария — с наибольшим ущербом людским и материальным ресурсам или компонентам природной среды.

Конструктивность, строгость и селективность этих определений (возможность выделить с их помощью наиболее вероятный и максимальный по последствиям сценарий разливов) явно недостаточны для задач, возникающих при планировании ЛРН. По существу целью данной работы является обсуждение и определение применимой терминологии, критериев и методов оценки сценариев аварий, включая «неблагоприятные условия» и «плохие» сценарии, на которых должны строиться планы ЛРН.

Очевидно, что реализация и первого, и второго требования может быть проведена только методами математического моделирования. С помощью комплекса математических моделей, предназначенных для проведения анализа риска распространения аварийных разливов, необходимо: а) дать оценки вероятности поражения нефтяным разливом уязвимых ресурсов на акватории и побережье; б) определить время, доступное для развертывания сил и средств локализации и ликвидации разливов нефти (ЛРН); в) оценить варианты стратегий применения технических средств.

Результаты риск-анализа представляют статистическую обработку расчетов многочисленных вариантов распространения аварийных разливов нефти. Но каждый из разнообразных сценариев распространения разлива сопровождается специфическими последствиями и проходит в конкретных гидрометеорологических условиях.

* Сценарий распространения разлива нефти — расчет траектории и/или последовательных конфигураций разлива, включая оценку изменения геометрических и физико-химических характеристик, обусловленных конкретными гидрометеорологическими условиями в период аварийной ситуации.

Возникает вопрос — к какому варианту развития событий следует готовиться специализированным службам, в чью задачу входит борьба с разливами нефти в море и минимизация негативных последствий аварий?

Существует точка зрения, что последствия разливов нефти следует оценивать размерами ущерба, выраженного в денежном эквиваленте и определенного по затратам на операции ЛРН, на рекультивацию береговой зоны и водного объекта и на компенсацию нанесенного вреда, однако ее внешняя привлекательность сильно контрастирует с отсутствием убедительных научных обоснований денежных оценок и взаимных сопоставлений вреда, причиняемого водным объектам, атмосфере, берегам, биологическим объектам и социальной сфере (Журавель, 2015).

Часто предполагается, что наибольший видимый ущерб связан с достижением разливом особо охраняемых территорий или рекреационных зон, которые, как правило, находятся в мелководных прибрежных областях акваторий или на побережье. Поэтому одним из приоритетов в ходе кампании ЛРН может быть уменьшение количества нефти на поверхности моря к моменту ее подхода к берегу. Предполагается, что чем больше нефти подойдет к берегу, тем тяжелее будет ситуация. В то же время легко представить, что характеристики береговых загрязнений могут сильно различаться по объему, площади и протяженности загрязнений побережья. С позиций оценки затрат на последующую очистку берега наиболее критичным показателем является протяженность, объем имеет меньшее значение (неважно, сколько нефти будет на берегу, если в этом месте все равно будут необходимы очистные и восстановительные работы), площадь занимает промежуточное положение, так как будет определять объем работ и количество образующихся отходов. В более широком контексте выбор критериев с позиций минимизации экологического вреда вряд ли удастся свести к единственному критерию, а загрязнение берегов может быть не единственным и даже не самым важным из них.

Если стоимость уязвимых ресурсов в регионе не определена, то возможен подход, основанный на относительной оценке последствий, например — по максимальному количеству нефти, которое может быть выброшено на берег. Состояние вопроса и возможности моделирования в этом направлении были представлены в обзоре (Etkin et al., 2007). На основании многочисленных обследований загрязненных береговых зон авторы констатировали, что поведение нефтяного разлива при контакте с берегом зависит от целого ряда взаимосвязанных факторов и процессов, таких, как тип и характеристики нефти, прежде всего вязкость; толщина слоя нефти при подходе разливов к берегу и на береговой линии; время достижения береговой линии; фаза прилива; погода до и после контакта с берегом; энергия волн. Способность береговых линий к удержанию нефти обусловлена геоморфологическими характеристиками берегов, прежде всего их уклонов и слагающих пород в зоне осушки, возможностью фильтрации нефти или нефтепродуктов в подстилающий субстрат, что, в свою очередь, зависит от проницаемости грунта и вязкости фильтрующейся субстанции. Обследования, проведенные на побережьях Керченского пролива после аварии танкера в 2007 г., показали, что в ряде случаев, в особенности на песчаных пляжах, нефтяное загрязнение береговой зоны оказалось неоднородным по вертикали, проникая в песок на глубину до нескольких десятков сантиметров. В этом случае способность побережий «удерживать» нефтяное пятно определялась литодинамическими процессами в береговой зоне (Фашук и др., 2010).

В (Gundlach, Hayes, 1978) была предложена классификация береговых линий по геоморфологическим особенностям, в соответствии с которой каждому участку береговой зоны присваивается свой индекс чувствительности. Подобное картирование возможно по результатам полевых исследований в районе интереса, что к настоящему времени проведено лишь для отдельных районов континентального шельфа РФ в зоне арктических и дальневосточных морей (Калинка, 2016; Погребов, Шилин, 2001; Блиновская, 2004).

В абсолютном большинстве моделей анализа риска распространения нефти используется самый простой подход (А), заключающийся в том, что нефтяное пятно, траектория перемещения которого пересекает береговую линию, считается осевшим на берегу независимо от типа нефти, характеристик выветривания, типа береговой линии, уже имеющегося количества нефти на берегу и т.д. Возможен и другой подход (Б), при котором пятно нефти на берегу может рассматриваться как источник вторичного загрязнения акватории и новых участков побережий. В этом случае часть нефти считается осевшей на берегу в месте контакта, а оставшаяся часть продолжает эволюционировать, трансформируясь процессами переноса, растекания и выветривания и вызывая загрязнение новых областей акватории и побережий. Предельным случаем этого сценария взаимодействия следует рассматривать ситуацию (В), когда разлив нефти «отражается» от береговых линий, рассеиваясь в атмосферу и водную толщу.

В этой ситуации, возможно, следует считать, что третий вариант (В) соответствует наихудшему сценарию с позиций загрязнения водной среды диспергированной и растворенной нефтью, в то время как первый вариант (А) самый «неприятный» для уязвимых объектов на берегу. С другой стороны, если рассматривается в качестве приоритетного критерия загрязнение определенных или особо охраняемых участков побережья, то наихудшими могут оказаться совсем другие сценарии. Моделирование с учетом частичного осаждения нефти на берегу связано с учетом большого числа неопределенностей в локальных гидрометеорологических и геоморфологических параметрах. Особенно важно это для небольших разливов, поведение которых может существенно меняться в зависимости от локальных особенностей береговой линии и прибрежной зоны, не учитываемых в гидродинамических моделях циркуляции и волнения.

Ниже приведен пример расчета вероятности воздействия нефтяного разлива на акваторию в течение первых 10 суток после аварийного сброса при гипотетической аварии в центральной части Финского залива при различных «схемах» взаимодействия разлива с берегом*. Рисунок 1а соответствует варианту (А) полного поглощения разлива (или его части в случае продолжительного сброса) при первом контакте с берегом. На рисунке 1б показаны изолинии вероятности воздействия на области акватории при расчетах по варианту (В). На обоих рисунках выделена эллиптическая область, где различия между результатами расчетов наиболее сильны. Видно, что условие отражения разлива от берега приводит к увеличению протяженности загрязнения береговой линии, что может быть некорректной оценкой при высокой удерживающей нефтяной разлив способности береговой черты. В любом случае, на рис. 1 (а, б) показаны два предельных случая расчетов распространения нефтяного разлива, так что

* Все приведенные в работе рисунки подготовлены в демонстрационных целях для обсуждения выходной продукции моделирования разливов нефти по материалам реконструкций гидрометеорологических условий, выполненных авторами в различных проектах по информационному обеспечению планов ЛРН и проведению АСЭВ.

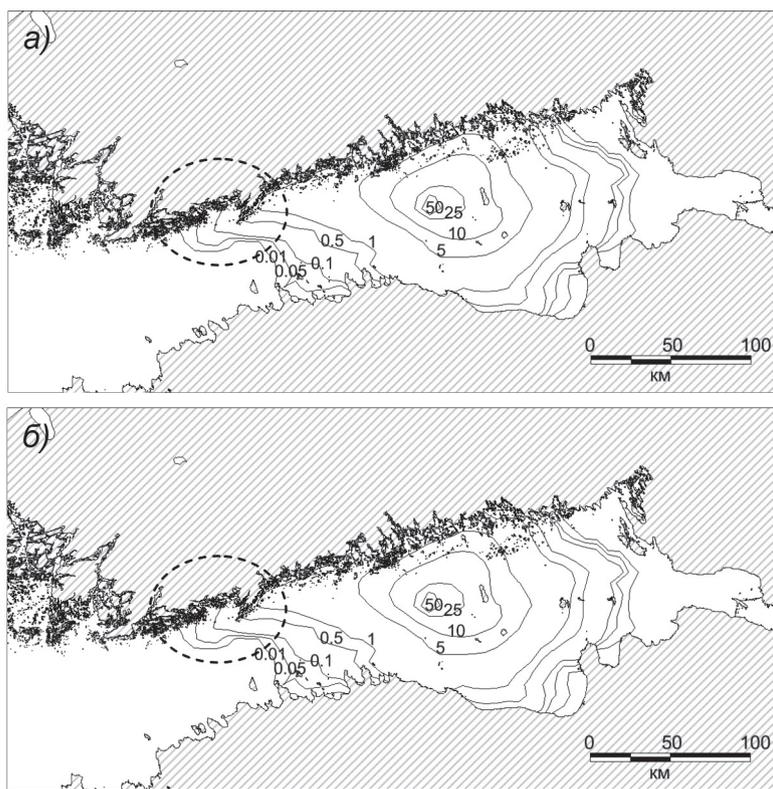


Рис. 1. Оценка вероятности поражения акватории при разных «схемах» взаимодействия разлива с берегом: а — «поглощение» разлива берегом; б — «отражение» разлива от берега.

разнообразные варианты вычислений по варианту (Б) должны располагаться между соответствующими изолиниями вероятности, приведенными на рисунках.

Восстановление исходного состояния (до воздействия разлива нефти) экосистемы береговой зоны представляется наиболее трудозатратным, и снижение эффективными операциями ЛАРН количества нефти, достигающего береговой зоны, может рассматриваться как стратегия, приводящая к минимизации негативных последствий аварии.

Среди десятков тысяч вариантов распространения нефти в море, которые могут реализоваться в регионе интереса по реконструированным гидрометеорологическим условиям и которые рассчитываются в рамках риска-анализа (Зацева и др., 2014, 2015, 2016), есть сценарии, в которых *количество нефти*, достигшее береговой зоны оказывается максимальным, и есть другие сценарии, в которых негативные последствия разлива проявляются в экстремальной *протяженности загрязнения* береговой зоны. Последние сценарии, как правило, реализуются, когда истечение нефти из источника (аварийный танкер, буровая) продолжается достаточно долго, а масштабы сброса и/или малая удаленность источника от берега не дают возможности разливу рассеяться до безопасных концентраций по мере движения к береговой зоне. В таких случаях к моменту начала взаимодействия с берегом нефтяной разлив может иметь достаточную протяженность и при распространении вдоль берега может загрязнить

береговую зону на многие десятки километров. В этих условиях полная защита берега вряд ли возможна, так как предусмотреть в Планах ЛРН многие километры боновых заграждений и суда-бонопостановщики для их размещения по пути следования разлива нефти нереально. Этот сценарий распространения разлива нефти, по-видимому, следует признать самым неблагоприятным, но насколько он вероятен? Для ответа на этот вопрос необходимо принять во внимание вероятность реализации аварийной ситуации с различными масштабами сброса нефти в морскую среду.

Пусть оценка вероятности поражения берега при условии, что толщина пленки нефти h при достижении береговой зоны больше заданного значения h_T , равна $P_{coast}(t)|_{h>h_T}$. Каждый из сценариев распространения нефти $\{CS_i\}$ (*coast scenario*), в которых нефтяной разлив достигает берега, приводит к индивидуальным последствиям, выражающимся в количестве нефти на берегу и протяженности загрязнения береговой линии. Эти последствия, вообще говоря, могут быть описаны с помощью функции распределения $F_L(t, L)$ или $F_M(t, M)$, где L и M — протяженность загрязненной береговой линии и количество нефти на берегу соответственно, а t — время, прошедшее от начала разлива.

Среди поражающих* береговую зону сценариев распространения нефти $\{CS_i\}$ необходимо выделить подмножество (сценариев), негативные последствия воздействия которых на береговые объекты критически значимы. Вероятность реализации таких сценариев $P_{cr}(t)$, приводящих к неприемлемым результатам, когда ущерб D больше критического значения D_{cr} , определяется произведением вероятности

$$P_{cr}(t) = \underbrace{P_{os}|_{V>V_{cr}}}_1 \cdot \underbrace{P_{coast}(t)|_{h>h_T}}_2 \cdot \underbrace{F(t, L)|_{L>L_{cr}}}_3, \quad (1)$$

где $P_{os}|_{V>V_{cr}}$ — вероятность реализации аварийной ситуации, при которой объем сброса будет более V_{cr} . Второй множитель представляет вероятность достижения нефтяным разливом берега при условии, что толщина пленки h_T или количество нефти в пятне будут больше заданных пороговых значений. Третий множитель определяет долю поражающих берег сценариев распространения нефти с последствиями, более критически значимыми. Вероятность воздействия разлива нефти на уязвимые объекты зависит от времени, что важно с позиций планирования мер противодействия разливу нефти, но может быть выражена и предельными значениями, соответствующими сценариям, в которых в силу разных причин немедленное реагирование будет невозможно (ночное время, штормовые и неблагоприятные (например, туман и пр.) погодные условия).

Снижение риска воздействия от аварий на морских объектах нефтегазового комплекса может быть достигнуто за счет повышения безопасности и надежности технологий (первый множитель в (1)), за счет вовремя принятых мер по локализации и ликвидации разлива нефти (второй и третий множитель в (1)).

Какими параметрами может характеризоваться сценарий распространения аварийного разлива нефти, кроме размеров причиненного ущерба?

Время, в течение которого возможно принятие мер противодействия разливу, примерно соответствует времени достижения береговой зоны за исключением сценариев распространения нефти с длительным истечением от источника сброса, в которых, несмотря на то, что первые «порции» нефти могут достаточно быстро достичь берега,

* Поражающий сценарий распространения нефти — сценарий, в котором нефтяной разлив достигает береговой зоны и/или уязвимых объектов на акватории, частично или полностью оседая на берегу или элементах берегового ландшафта (марши, камыши).

тем не менее кампания ЛРН будет осуществляться до полной локализации разлива непосредственно у аварийного объекта.

Метеорологические условия, прежде всего ветер и волны, определяющие, с одной стороны, скорость движения нефтяного slicka и, тем самым, размеры пятна нефти, скорость выветривания и время достижения берега, а с другой стороны, влияющие на эффективность применения механических средств локализации и сбора нефти. За время движения разлива до береговой зоны метеорологические условия могут изменяться, и в этой ситуации, по-видимому, следует использовать как характеристику метеоусловий средние показатели в первые-вторые-третьи сутки после начала разлива.

Объем и продолжительность сброса, тип нефти или нефтепродукта определяют масштабы воздействия на береговую зону.

Методика отбора сценариев распространения нефти для последующего анализа эффективности различных стратегий по противодействию разливу представляет вариант инкрементального подхода к планированию и состоит из нескольких последовательных шагов.

На первом шаге следует сформировать выборку сценариев распространения нефти $\{CS_i\}$, в которых нефтяной разлив достигает берега (или выбранной его части, например особо охраняемых природных территорий (ООПТ)) при условии, что средняя толщина слоя нефти при контакте с берегом не менее порогового значения h_T . Выбранные сценарии следует ранжировать по совокупности критериев. Сначала в качестве критерия ранжирования ряда выбирается количество нефти, вынесенное на берег, дифференцированное по времени (сутки) после начала разлива. Самые «быстрые» сценарии распространения нефти, в которых нефтяной разлив достигает берега, реализуются, как правило, с невысокой вероятностью, но требуют высокой оперативности реагирования. Экологические последствия таких сценариев, происходящих при высоких скоростях ветра, могут быть не столь масштабными, как в сценариях при умеренных и слабых ветрах, когда естественное рассеяние нефтяного разлива при движении по направлению к береговой зоне будет незначительным. На этом этапе целесообразно выбрать критический уровень риска воздействия на уязвимые объекты $P_{coast}(t)|_{h > h_T} > P_{coast_cr}$ и подвергнуть дальнейшему анализу подмножество сценариев, когда нефть достигает береговой зоны в рамках этих ограничений.

С другой стороны, реагирование не может закончиться ранее, чем разлив будет локализован в районе сброса нефти. Таким образом, ранжирование сценариев распространения нефти по критерию выноса массы нефти на берег следует проводить на временных сроках не ранее окончания действия источника. Только к этому моменту времени может выясниться, какой ущерб от разлива нефти можно ожидать, если никаких мер по минимизации последствий не предпринимать.

Следующее разбиение на подгруппы в отобранном подмножестве сценариев из генеральной совокупности $\{CS_i\}$ можно провести по критерию *разнообразия* метеорологических условий. В ансамбле сценариев распространения нефти, приводящих к негативным последствиям для окружающей среды, следует выделить две подгруппы. К первой подгруппе стоит отнести подмножество сценариев, в которых в силу неблагоприятных погодных условий реагирование невозможно. Во второй подгруппе следует провести ранжирование поражающих сценариев и выбрать, например, сценарии, приводящие к максимально негативным последствиям в подгруппах, характеризующихся различными ветровыми условиями. Приняв, что механические средства локализации

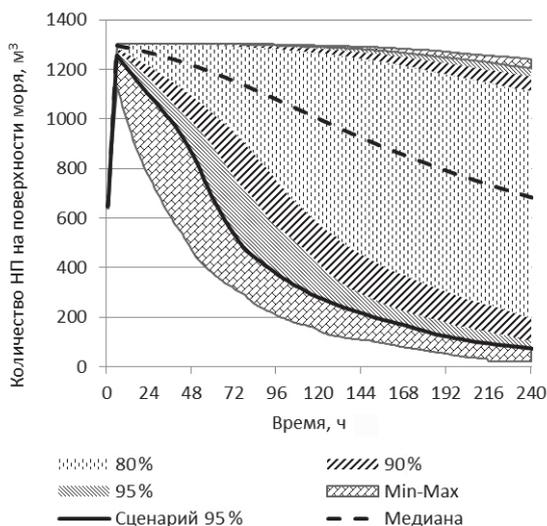


Рис. 2. Двухсторонние проценти количества нефти на поверхности моря по ансамблю расчетных сценариев. Изменения в точке.

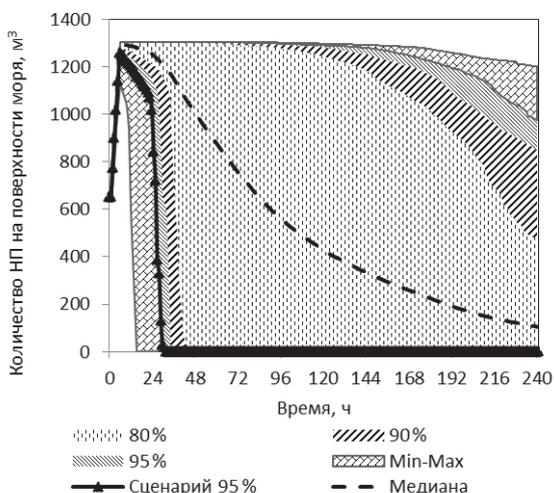


Рис. 3. Двухсторонние проценти количества нефти на поверхности моря по ансамблю расчетных сценариев. Изменения по траектории.

и ликвидации разливов нефти на море (боны и скиммеры) существенно теряют эффективность при скоростях ветра более 10 м/с, целесообразно критические сценарии распространения нефти рассмотреть в трех диапазонах скорости ветра (слабый ветер $W_{10} < 4$ м/с, умеренный $W_{10} = 5-7$ м/с и умеренно-сильный $W_{10} = 8-10$ м/с). Методика анализа риска распространения нефти предполагает использование реконструкции гидрометеорологических условий по данным реанализа метеорологических полей. По этой причине сценарии распространения нефтяных разливов, сброс нефти на морскую поверхность в которых происходит в близкие моменты времени, будут иметь

схожие показатели как в части, касающейся ограничений на реагирование, так и по траектории движения и характеристикам разлива.

Среди номенклатуры результатов риск-анализа распространения разливов нефти есть позиции, как, например, зоны риска или вероятности воздействия на области акватории и побережий, которые должны быть показаны в виде картограмм с привязкой к карте района интереса. С другой стороны, в особенности для разливов нефти, происходящих далеко от берега, представляет интерес построить сценарии *типового* выветривания нефтяного slicka, чтобы на этой основе рассчитать необходимую потребность в технических средствах реагирования на разлив — болах и скиммерах. В этих типовых сценариях неважно, в какую сторону распространяется разлив нефти, но важно, сколько нефти в среднем окажется на поверхности через заданные промежутки времени после начала сброса нефти. На коротких временных интервалах (в пределах суток) характеристики разлива нефти, соответствующие заданному сценарию технической аварии, можно оценить в предположении, что скорость ветра и соответствующих течений примерно постоянна и равна, например, 0, 3, 5, 7 и 10 м/с (Зацева и др., 2014, 2016). Однако предположение о постоянстве скорости ветра и течения представляются нереалистичными на больших, чем сутки, временных масштабах. Учитывая большую неоднородность гидрологических полей и изменчивость во времени полей приводного ветра, построение типового сценария выветривания может быть основано на следующей последовательности действий. На первом этапе, как было предложено в работе (Зацева и др., 2014), рассчитываются проценти́ли выборки данных по выветриванию, включающие оценки изменения физико-химических характеристик пятна нефти за счет испарения, диспергирования и других процессов трансформации. На рис. 2 приведены расчеты статистик выветривания нефти для гипотетической точки разлива, соответствующей расположению источника сброса в центральной части Финского залива, вероятности воздействия на акваторию для которого приведены на рис. 1. В приведенном примере продолжительность сброса 6 ч и при этом на поверхность моря проливается примерно 1200 м³ судового топлива. График баланса массы нефти, в предположении, что нефтяное пятно не осаждается на береговых участках, назван *изменениями в точке*, в отличие от *изменения по траектории* (см. рис. 2, 3), когда в результате контакта с берегом нефтяное пятно или его часть полностью поглощаются в береговой зоне. Вертикальными двунаправленными стрелками на рис. 2 и 3 показан размах двухсторонних (относительно медианы) проценти́лей выборки данных.

На втором этапе, используя данные о зависимости медианы выборки данных статистики выветривания в точке разлива от времени, следует найти такой расчетный сценарий (определить номер) разлива нефти из десятков тысяч предварительно рассчитанных для выбранного варианта технической аварии, для которого средний квадрат отклонений от медианного варианта выветривания был бы наименьшим. Этот вариант отбора сценариев представляется обоснованным для проведения операций на море. Аналогичный «подбор» сценариев можно сделать для любых проценти́лей выборки данных по выветриванию. Однако если точка аварийного сброса находится недалеко от берега, то статистики выветривания в точке разлива могут оказаться нерепрезентативными. На рис. 4 приведены результаты оценки возможного выноса нефти на берег, дифференцированные по времени, прошедшему после аварии. Из рис. 4 можно видеть, что в значительном числе сценариев распространения нефти

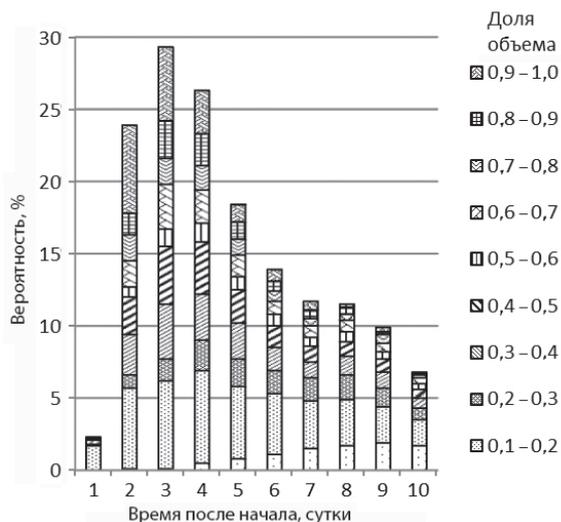


Рис. 4. Вероятность осаждения доли объема нефти на берегу.

происходит вынос нефти в береговую зону и осаждение на берегу. Для Финского залива, ширина которого в средней части 50–60 км, в среднем за 10 суток для рассмотренного сценария технической аварии на поверхности моря останется порядка 10 % исходной массы пролившегося судового топлива (рис. 3). Возможен вынос нефти на острова уже в первые сутки после аварии, а во вторые, третьи и четвертые сутки после аварии вероятность контакта с берегом больше 20 % в сутки, а совокупно

Таблица 1

Основные показатели для сценариев распространения нефти по каждому варианту технической аварии

№	Показатель	Комментарий
1	Номер сценария	По номеру сценария можно определить дату и время гипотетического инцидента
2	Время достижения берега (первый контакт), ч	
3	Максимальное количество нефти, вынесенное на берег, т	Протяженность загрязнения береговой линии и масса нефти на берегу зависят от времени, прошедшего после начала разлива
4	Максимальная протяженность загрязнения береговой линии, км	
5	Средняя скорость ветра в сценарии до контакта с берегом, м/с	Могут быть использованы при определении эффективности использования технических средств
6	Средняя скорость ветра в 1-й день сброса	
7	Средняя скорость ветра во 2-й день аварии	
8	Время достижения ООПТ 1, ч	
9	Время достижения ООПТ 2, ч	
10	Максимальная площадь разлива, до контакта с берегом, км ²	
11	Средняя скорость изменения площади разлива в один день сброса, км ² /ч	Служит оценкой для определения производительности нефтесборных систем

составляет порядка 80 %. При этом, как следует из рис. 4, вероятность того, что на берегу окажется более 90 % от всего объема сброса на вторые, третьи и четвертые сутки после аварии, составляет около 10 %.

Из результатов моделирования распространения нефти, примеры постобработки которых частично приведены на рис. 2–4, можно сделать вывод, что при выборе критических или репрезентативных сценариев развития аварийной ситуации следует рассматривать, с одной стороны, разные статистические оценки, из которых выбираются средние или вероятные значения параметров разлива, и, с другой стороны, необходимо учесть защиту приоритетных объектов (ООПТ и пр.). Учитывая высокую вероятность достижения берега уже на вторые сутки после аварии пятна нефти на поверхности моря, «медианный» (по ветровым условиям) сценарий распространения нефти, по-видимому, целесообразно «поискать» среди сценариев распространения нефти, в которых разлив достигает берега на вторые и третьи сутки после аварии и в которых большая доля первоначального сброса нефти может осесть на берегу.

Таблица 2

Примерная последовательность шагов при выборе критических сценариев

Шаг	Действие	Результат
1	Расчет всех возможных сценариев разлива нефти с учетом процессов трансформации	Формирование множества сценариев M_0
2	Выборка из M_0 сценариев, при которых нефть достигает берега (или ООПТ) и средняя толщина слоя нефти при контакте с берегом не менее порогового значения	Формирование подмножества сценариев M_1
3	В подмножестве сценариев M_1 выбираются сценарии, при которых в силу неблагоприятных погодных условий реагирование невозможно	Формирование подмножества сценариев M_{11}
4	Формирование выборки сценариев, когда реагирование возможно	Формирование подмножества сценариев $M_2 = M_1 - M_{11}$
5	Ранжирование выбранных сценариев M_2 по количеству нефти, вынесенной на берег, по протяженности области загрязнения и по времени достижения берега. Исходя из критического уровня риска воздействия, из подмножества сценариев M_2 выбираются сценарии, приводящие к экстремальным последствиям и имеющие малую вероятность	Формирование подмножества сценариев M_{21}
6	Отбор из подмножества сценариев M_2 сценариев, имеющих значимую вероятность	Формирование подмножества сценариев $M_3 = M_2 - M_{21}$
7	Выбор из подмножества сценариев M_3 характерных репрезентативных сценариев по гидрометеорологическим условиям и по уровню загрязнения	Формирование выборки сценариев M_4
8	Проведение моделирования с учетом применения средств противодействия разливу на примере выборки сценариев M_4 и расчет необходимой потребности в технических средствах реагирования на разлив	Рекомендации органам МЧС

Каждому варианту распространения нефти, обусловленному конкретными гидрометеорологическими условиями из представительного ансамбля гидрометеорологических сценариев, можно поставить в соответствие ряд показателей, основные из которых показаны в табл. 1.

Некоторые из показателей нуждаются в дополнительных комментариях. Для целей нашего анализа можно принять фиксированные моменты времени, например 5 и 10 суток после начала аварии, для которых определить показатели 3 и 4. Время достижения берега, в случае продолжительного истечения, представляется не конкретным моментом, но, в некоторых случаях, достаточно большим промежутком времени между моментом первого контакта и окончательным выносом всего разлива в береговую зону. Время достижения ООПТ, так же как и время достижения береговой зоны в целом, необходимо определять при выполнении условий, что толщина пленки нефти при подходе к берегу или концентрация диспергированной нефти в водной толще в береговой зоне выше наперед заданных критических значений.

Для показателей 2, 3, 4, 8 и 9 следует построить функции распределения, с помощью которых можно оценить вероятность наступления негативных последствий для экосистемы и вероятность реализации сценариев, приводящих к неприемлемому риску для населения и окружающей среды.

Таким образом, последовательность шагов в анализе результатов расчетов характеристик разливов в ансамбле сценариев распространения нефти представляет основания для выбора наиболее вероятных вариантов распространения нефти или консервативных оценок возможных последствий разлива, т.е. «сделанных с запасом», для выбора будущих стратегий борьбы с разливом (табл. 2).

Сформулированная выше задача отбора сценариев распространения нефти для последующего анализа при оценке стратегий реагирования вряд ли должна получить строгий алгоритм решения, пригодный для всех объектов нефтегазового комплекса на континентальном шельфе РФ и внутренних водных объектах. Причина заключается в региональных особенностях морской деятельности, специфике гидрометеорологических условий и наличии/отсутствии важных природоохранных и уязвимых объектов. Однако сам принцип инкрементального подхода может считаться ключевым моментом при решении задачи планирования мероприятий по минимизации экологических рисков. В соответствии с этим принципом из генеральной совокупности всевозможных сценариев распространения нефти в результате аварийного сброса в морскую среду на основании ряда критериев, следующих из результатов риск-анализа распространения разливов, отбираются варианты развития аварийной обстановки, подготовка к реагированию на примере которых обеспечивает уровень готовности сил и средств, достаточный для обеспечения экологической безопасности с приемлемым уровнем риска.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов № 14-07-00434, № 15-07-04871 и № 14-07-00513

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блиновская Я.Ю.* Принципы создания информационной системы «Карты чувствительности прибрежно-морских зон к загрязнению нефтью» // Вестник ДВО РАН. 2004. № 4. С. 63–73.
- Журавель В.И.* Ликвидация разливов нефти в море: соответствует ли финансовое обеспечение работ реалиям? // Oil and Gas Journal Russia. 2015. № 12 (100). С. 92–95.

Зацева С.Н., Дианский Н.А., Журавель В.И., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В., Фомин В.В. Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов. Часть 1. Методология // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4 (106). С. 27–39.

Зацева С.Н., Ивченко А.А., Журавель В.И., Солбаков В.В., Становой В.В. Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы Карского моря // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 30–45.

Калинка О.П. Оценка уязвимости акватории Кольского залива и чувствительности его берегов при разливах нефти: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2016. 26 с.

Погребов В.Б., Шилин М.Б. Экологический мониторинг прибрежной зоны Арктических морей. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 96 с.

ПП №1189. Об организации предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации // Постановление правительства РФ от 14.11.14 г. № 1189.

РД-03-14-2005. Порядок оформления декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов и перечень включаемых в нее сведений (утвержден приказом Ростехнадзора от 29.11.2005 г. № 893)

Фацук Д.Я., Флинт М.В., Иванова А.А., Ткаченко Ю.Ю. Нефтяное загрязнение среды в Керченском проливе по результатам исследований 2007–2009 гг. // Изв. РАН. Серия Географическая. 2010. № 4. С. 86–97.

Etkin D.S., French-McCay D., Michel J. Review of the State-Of-The-Arton Modeling Interactions between Spilled Oil and Shorelines for the Development of Algorithms for Oil Spill Risk Analysis Modeling // MMS OCS Study 2007-063. Environmental Research Consulting, Cortlandt Manor, New York. MMS Contract 0106PO39962. 157 p.

Gundlach E.R., Hayes M.O. Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts // Marine Technology Society Journal. 1978. Vol. 12. № 4. P. 18–27.

Hayes M.O., Michel J., Zengel S., Dahlin J., Petersen J. Environmental sensitivity index guidelines, Version 2.0. // Seattle, Washington, NOAA Tech. Memo. NOS ORCA 115. 1997. 79 p.

S.N. ZATSEPA, V.I. ZHURAVEL, A.A. IVCHENKO, V.V. SOLBAKOV, V.V. STANOVOY

INCREMENTAL APPROACH TO THE SELECTION OF OIL SPILLS SPREADING CRITICAL SCENARIOS FOR PLANNING MEASURES FOR ENVIRONMENTAL RISKS MINIMIZATION

The paper introduces the problem of the use of mathematical modeling results in the preparation of measures to ensure environmental safety of offshore oil and gas projects. Incremental approach to the selection of critical scenarios of oil spills spreading in the sea is chosen as a key principle of forming a subset of variants of the accident development. Consistent application of the selection criteria allows selecting the critical scenarios to analyze the effectiveness of various response strategies, which provide a level of readiness of forces and resources sufficient to ensure environmental safety with an acceptable level of risk.

Keywords: mathematical modeling, sea oil spills, oil spill response plans..