

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В МОРЕ  
ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ  
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРОЕКТОВ.  
ЧАСТЬ 1. МЕТОДОЛОГИЯ**

канд. физ.-мат. наук С.Н. ЗАЦЕПА<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук Н.А. ДИАНСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
канд. техн. наук В.И. ЖУРАВЕЛЬ<sup>3</sup>, ст. науч. сотр. А.А. ИВЧЕНКО<sup>1</sup>,  
д-р физ.-мат. наук К.А. КОРОТЕНКО<sup>4</sup>, канд. физ.-мат. наук В.В. СОЛБАКОВ<sup>5</sup>,  
ст. науч. сотр. В.В. СТАНОВОЙ<sup>6</sup>, аспирант В.В. ФОМИН<sup>7</sup>

<sup>1</sup> — Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, e-mail: zatsera@gmail.com

<sup>2</sup> — Институт вычислительной математики РАН, Москва, e-mail: nikolay.diansky@gmail.com

<sup>3</sup> — Научно-методический центр «Информатика риска», Москва, e-mail: v.jouravel@ric.msk.ru

<sup>4</sup> — Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: kkorotenko@gmail.com

<sup>5</sup> — ФИЦ ИУ РАН – ВЦ РАН, Москва, e-mail: solbakov@ccas.ru

<sup>6</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: vstanovoy@yandex.ru

<sup>7</sup> — Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, e-mail: lihar\_89@mail.ru

В первой части статьи обсуждается гидрометеорологическое информационное обеспечение, модели и методы, используемые при моделировании распространения разливов нефти для решения ряда прикладных задач (ПЗ) — подготовки планов ликвидации разливов нефти в море (ПЛАРН), анализа совокупной экологической выгоды при выборе стратегий реагирования на разливы (АСЭВ), оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС). Предложен подход к определению зоны потенциального воздействия на разлив нефти, даны новые определения для оценивания зон риска распространения нефти и воздействия на береговую зону, для вероятности достижения и воздействия на уязвимые объекты.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, разливы нефти в море, план ликвидации разлива нефти, анализ суммарной экологической выгоды, оценка воздействия на окружающую среду.

Экологическая безопасность нефтегазовых проектов в море обеспечивается подготовкой планов локализации и ликвидации разливов нефти (Планов ЛРН), включающей оценку воздействия на окружающую среду (ОВОС) и выбор стратегий реагирования на основе анализа совокупной экологической выгоды (АСЭВ). В статье рассматриваются методологические аспекты моделирования распространения разливов нефти в море для информационной поддержки вышеназванных задач.

Разлив нефти в море — случайное событие, при котором ни сценарий технической аварии (ЧТО? ГДЕ? КОГДА?), ни метеорологические условия заранее не известны. Выбор стратегий борьбы с разливами нефти и нефтепродуктов имеет региональные особенности, которые во многом обусловлены гидрометеорологическими условиями. Гидрометеорологические условия, с одной стороны, могут затруднить или сделать невозможным немедленное проведение операций по локализации и ликвидации разливов нефти (шторм, туман, ночные условия) и, с другой стороны, определяют вероятные направления распространения разливов и возможность воздействия на уязвимые ресурсы.

Определение риска воздействия разлива нефти на акватории и береговые линии связано с моделированием множества сценариев распространения нефти при гидрометеорологических условиях (Зацева и др., 2014а), заданных наборами последовательных полей скорости ветра, течений и других гидрометеорологических параметров, полученных из реконструкции гидрометеорологического режима прошлых лет в предположении о квазистабильности климатических условий в регионе интереса.

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

Расчет распространения и эволюции аварийного разлива нефти в каждом сценарии представляет собой ретроспективный прогноз на основе результатов моделирования циркуляции атмосферы и моря.

В современных моделях морской циркуляции в качестве атмосферного форсинга используются массивы реанализа атмосферных данных или результаты расчетов по региональным моделям атмосферы. На сегодняшний день существует большой выбор массивов реанализов (ERA (Dee et al., 2011), CFSR (Saha et al., 2010а), NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) и др.), представляющих исходные данные для расчетов морской циркуляции. Реанализы отличаются друг от друга пространственно-временным разрешением (от 0,25 до 2,5° по пространству и от одного до шести часов по времени), массивами усваиваемых данных и алгоритмами их усвоения (Saha et al., 2010b) и точностью результатов (Bao, Zhang, 2013). В случаях, когда пространственно-временное разрешение готовых реанализов недостаточно для приемлемой точности расчетов, используются региональные модели атмосферы с улучшенным пространственным разрешением, особенно для расчета атмосферных и гидрологических характеристик в прибрежных областях.

Для расчета полей течений разработан целый ряд численных моделей морской циркуляции, например INMOM (Дианский, 2013), модель ГМЦ (Попов, 2004), POM (Blumberg, Mellor, 1997), ROMS (Haidvogel et al., 2000), AARI-IOCM (Кулаков и др., 2012), DieCAST (Dietrich et al., 2014) и др. Выбор той или иной модели морской циркуляции в задачах, связанных с распространением аварийных разливов нефти, обусловлен в первую очередь адаптацией модели к условиям выбранного региона. Для расчетов прибрежной циркуляции часто требуется более детальное пространственное разрешение, чем в открытом море. Увеличение разрешения может достигаться путем использования метода вложенных сеток. В этом случае возникает проблема задания условий на «жидких» границах, которая в настоящее время не может быть полностью решена. Более перспективным методом является использование нерегулярных сеточных областей со сгущением в нужной акватории, как, например, в моделях INMOM и POM. Использование нерегулярных сеток позволяет уменьшить влияние ошибок в задании граничных условий на «жидких» границах.

Серьезной проблемой гидрометеорологического обеспечения является недостаток надежных данных о ледовых условиях для моделирования разливов нефти в регионах интересов. Область загрязнения при проливах нефти на снег, лед, под лед и между льдин, как правило, имеет размеры порядка нескольких десятков и сотен метров. Данные дистанционного зондирования пока не обеспечивают достаточного разрешения описания ледового покрова, а модели динамики-термодинамики морского льда, используемые в моделях морской термогидродинамики для прогнозов ледовых условий, пока не описывают ледовые поля с необходимыми подробностями в части распределения льдин по размерам. Даже для постоянной сплоченности в ледовом поле могут сложиться принципиально разные условия для распространения нефти — от областей, где превалирует мелкобитый лед, до больших льдин с размерами в несколько километров.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ

Процессы распространения и физико-химической трансформации нефти в море включают перенос за счет совокупного действия ветра и течений, растекания под действием сил плавучести и рассеяния турбулентной диффузией, а также испарение, диспергирование, эмульгирование, изменение плотности и вязкости остатка на поверхности (Reed et al., 1999). Нефть и нефтепродукты состоят из смеси фракций, каждая из которых имеет присущие ей физико-химические свойства (плотность, вязкость, поверхностное натяжение, температуру кипения, молекулярный вес). При моделировании распространения нефтяных разливов по поверхности моря и в водной толще необходимо рассчитывать эволюцию фракционного состава, изменение физико-химических свойств нефти, переход нефтяного загрязнения между различными средами (морская поверхность, атмосфера, водная толща, береговая область, лед, дно моря, биота) и изменение ее характеристик (плотности, содержания воды, вязкости).

Математические модели, описывающие эволюцию нефти в море, как правило, основываются на общих физических принципах, результатах лабораторных и, к сожалению, немногочисленных натуральных экспериментов. Катастрофа с танкером «Престиж» в Бискайском заливе в 2002 г. и взрыв на нефтяной платформе в Мексиканском заливе стали стимулами в развитии новых подходов к моделированию процессов переноса нефти и проверки моделей в натуральных условиях (Castanedo et al., 2006; North et al., 2011; Korotenko et al., 2013 и др.). Погрешности в описании гидрометеорологических полей, пренебрежение внешними факторами и мезомасштабной циркуляцией могут приводить к существенным ошибкам в прогнозе распространения нефтяного загрязнения (Klemas, 2011). Целесообразно также обратить внимание на некоторые методические приемы при моделировании распространения нефти в море, касающиеся расчета площади (конфигурации) и перемещения разлива, которые также могут служить причинами неудовлетворительных результатов, как в ретроспективных, так и в реальных прогнозах. Вопросы выветривания нефти, несмотря на их важность, в статье рассматриваться не будут, так как в большинстве моделей разливов нефти у разных авторов используются похожие параметризации процессов выветривания нефти (Vos, 2005), не требующие региональной привязки.

Для определения положения и конфигурации нефтяного разлива распространенным приемом является использование ансамбля лагранжевых частиц, имитирующих перемещение пятна нефти или его отдельных частей по поверхности моря под действием ветра, течений, волн и турбулентной диффузии. Скорость адвекции

$U_a$  лагранжевых частиц по поверхности моря описывается в большинстве моделей соотношением типа

$$U_a = U_{current} + U_{drift}(W) + U_{wave} + U_{dif}, \quad (1)$$

где  $W$  — скорость ветра над нефтяным пятном,  $U_{current}$  — скорость течения, рассчитанная в модели течений,  $U_{drift}(W)$  — скорость дрейфового течения, рассчитанная параметрически,  $U_{wave}$  — скорость переноса за счет волн,  $U_{dif}$  — случайная добавка к скорости переноса, обусловленная процессами турбулентной диффузии. Как правило, считается, что в открытом море и вдали от берегов скорость дрейфового течения составляет порядка 3 % (ветровой коэффициент) от скорости ветра и повернута в Северном полушарии на угол порядка 15 градусов вправо при умеренных скоростях ветра. Ветровой коэффициент и угол поворота скорости дрейфового течения могут меняться в разных моделях разливов нефти. Проблема заключается в том, что при расчете течений  $U_{current}$  в моделях морской динамики ветер является одним из главных факторов атмосферного форсинга, и чем лучше модели течений описывают динамику верхнего слоя моря, тем меньшее значение может иметь добавочный член  $U_{drift}(W)$ . Итоговая траектория движения нефтяного разлива в конкретном метеорологическом сценарии будет зависеть от аккуратной настройки ветрового коэффициента и угла поворота скорости дрейфового течения для выбранной модели гидротермодинамики океана и приводного слоя атмосферы. Соотношение (1), несмотря на универсальность формулировки, имеет исключительно выраженную региональную привязку, так как все составляющие правой части определяются из региональных моделей динамики атмосферы, морской динамики и ветрового волнения.

Для расчета площади разлива часто используются соотношения Фэя (Fay, 1971) или Маккея (Mackay et al., 1980). Соотношения Фэя изначально были предложены для оценки площади нефтяного разлива при одномоментном/залповом сбросе нефти на спокойную поверхность воды. Позже полученное автомодельное решение стало применяться для оценки площади разливов с различной интенсивностью и длительностью действия источника сброса с использованием идеологии спиллетов, или элементарных разливов, в модели OILMAP (Spaulding et al., 1992). В моделях (Lehr et al., 2002) и SeaTrack (Liungman, 2011) для расчета площади разлива используется алгоритм случайных блужданий на этапе растекания, при этом коэффициент «искусственной диффузии» определяется из соотношений Фэя для гравитационно-вязкого растекания.

В модели OilMARS (Становой и др., 2007) длительный аварийный разлив нефти представляется в виде большого числа маленьких дискретных разливов — спиллетов, которые с определенной периодичностью поступают от источника загрязнения на поверхность воды. Начальные массы спиллетов зависят от интенсивности сброса, которая может быть переменной во времени. Предполагается, что дискретные спиллеты независимы друг от друга. Каждый спиллет имеет набор параметров: координаты, площадь, плотность и вязкость нефти, количество нефти на поверхности воды, количество испарившейся нефти и т.д. Все параметры спиллетов зависят от времени нахождения данного спиллета на поверхности воды. Используемый подход дает возможность учесть пространственную неоднородность нефтяного пятна, так как в каждый момент времени на поверхности воды находятся спиллеты с разной плотностью, вязкостью, массой и площадью. При этом учитывается влияние пространственно-временной неоднородности гидрометеорологических полей, включая ледовые условия, на перенос и трансформацию отдельных спиллетов.

Для расчета переноса спиллетов используется лагранжев подход, а процессы эволюции нефти рассчитываются на эйлеровых сетках с высоким пространственным разрешением, зависящим от начальной массы спиллетов. Для каждого спиллета генерируется своя сетка, пространственное разрешение которой зависит от начальной массы данного спиллета.

Отметим недостатки, присущие практически всем моделям, использующим технологию спиллетов, и заключающиеся в следующем:

- площадь пятна, рассчитываемая как сумма площадей всех находящихся в данный момент времени на поверхности воды спиллетов минус сумма площадей перекрытия соседних спиллетов, может иметь значительную погрешность за счет неучета площадей многократных перекрытий разных спиллетов при слабых ветрах;

- толщина пятна рассчитывается как пространственное распределение средних толщин каждого спиллета. При перекрытии спиллетов производится суммирование средних толщин пленки в данной точке;

- расчет переноса спиллета производится для центральной точки, и при подходе к берегу отмечается соприкосновение центра спиллета с береговой чертой. Поскольку площадь спиллета может достигать нескольких квадратных километров, то загрязнение берега нефтью периферией данного спиллета не учитывается.

Новым решением в семействе моделей разливов нефти в море является модель SPILLMOD (Овсиенко и др., 2005; Зацепа, 1989). Уравнения модели получены методом возмущений по малому параметру из исходной трехмерной задачи для течения тонкого слоя легкой несжимаемой ньютоновской жидкости на поверхности более плотного субстрата. На поверхностях раздела нефть–вода и нефть–воздух задаются условия непрерывности напряжений и кинематические условия. К особенностям задачи о распространении нефти относится то, что область, в которой ищется решение, сама является искомой величиной, а геометрические размеры области возможного решения могут меняться на несколько порядков, что исключает применение расчетных сеток с постоянным пространственным разрешением. Технология, использованная в модели SPILLMOD, формально может быть отнесена к большой группе вычислительных схем, именуемой методом частиц в ячейках, поскольку обладает всеми основными признаками этих методов, а именно:

- дискретное представление среды в виде набора лагранжевых элементов (частиц);

- использование эйлеровых расчетных сеток для описания полей;

- расщепления вычислительного цикла на процессы адвекции и изменение состояния среды в предположении «замороженности» полей.

Важным отличием модели SPILLMOD от других моделей растекания является решение проинтегрированных по вертикальной координате уравнений гидродинамики в областях с произвольной геометрией контактных границ. Это обстоятельство дает возможность рассчитать конфигурацию нефтяного слика в произвольный момент времени и распределение толщины нефти в пятне. Модель SPILLMOD и вычислительная технология ее реализации допускает проведение расчетов с учетом применения основных средств ЛАРН. Боновые заграждения представлены в модели как неподвижные или движущиеся полупроницаемые контактные границы. «Свойства» боновых заграждений — их длина, эффективность удержания нефти, скорость и траектория движения — задаются вместе с исходными данными для моделирования. Нефте-

сборные системы моделируются как искусственное перемещение нефти из области действия нефтесборной системы, определяемой ее производительностью и радиусом захвата, в емкости для временного хранения для последующей транспортировки и утилизации. Применение диспергентов моделируется либо путем изменения поверхностного натяжения нефти в пределах некоторой области, определяемой параметрами средств применения диспергента, что приводит к увеличению потока массы нефти с поверхности в водную толщу, либо заданием искусственного потока нефти с поверхности в соответствии с параметрами технических средств применения диспергентов.

К недостаткам модели SPILLMOD следует отнести высокие вычислительные затраты, неоправданные при проведении ансамблевых расчетов.

Случайный характер сценария аварии, связанной с проливом нефти или нефтепродуктов в море, обуславливает необходимость определения подобластей акватории и побережий региона интереса, внутри которых расположены или могут находиться объекты экосистемы, потенциально уязвимые разливами. Совокупность таких под областей будет называть зоной потенциального воздействия.

#### **ОЦЕНКА ЗОНЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Зона потенциального воздействия от разливов нефти (ЗПВ) зависит, с одной стороны, от масштабов и сценария технической аварии, а с другой стороны, от гидрометеорологических условий, возможных в регионе интереса. Для оценки возможных экологических последствий аварии следует рассчитывать распространение нефти на фоне всех гидрометеорологических ситуаций, возможных в регионе интереса. ЗПВ для конкретных сценариев технических аварий могут быть получены путем многократных расчетов с помощью наиболее полных моделей нефтяных разливов, которые могут быть построены либо на технологии спиллетов (Spaulding et al., 2004; Становой и др., 2007), по сути тех же элементарных разливов, либо на более сложных вычислительных технологиях типа модели SPILLMOD (Овсиенко и др., 2005).

В большинстве случаев для каждого объекта нефтегазового сектора или его инфраструктуры, представляющего потенциальную угрозу экологической безопасности для акватории и побережий в случае ситуации, связанной со сбросом в морскую среду нефти и нефтепродуктов, необходимо рассматривать некоторый ансамбль сценариев технических аварий. В таких случаях начинают сказываться высокие вычислительные затраты при реализации интегрированных моделей, неоправданные при проведении ансамблевых расчетов, и для определения ЗПВ представляется допустимым и эффективным использовать более простые модели, где площадь нефтяного пятна рассчитывается параметрически и точность расчета конфигурации разлива менее важна, чем его перенос ветром и течениями.

Для большинства сценариев технической аварии технологически эффективно рассчитывать данную задачу в три этапа. На первом этапе рассчитать траектории перемещения по поверхности моря одномоментных, или залповых, сбросов нефти в результате совокупного действия ветра и течений. Далее предполагается, что каждый продолжительный сброс нефти состоит из последовательности небольших залповых сбросов (элементарных разливов), причем, как иногда случается, с различной интенсивностью истечения. Для большинства практических задач достаточно принять дискретизацию в описании источника сброса равной 1 часу, а продолжительность расчетов определяется максимальным временем достижения характеристиками разлива пороговых значений толщины или концентрации.

На втором этапе, следует рассчитать параметры выветривания для каждого из элементарных разливов в соответствии с гидрометеорологическими условиями, определенными по полям метеорологических параметров и траекториям распространения разливов.

Третий этап будет заключаться (а) в «сборке» сценария/ев распространения продолжительного разлива нефти или нефтепродукта из ансамбля траекторий перемещений элементарных разливов нефти с учетом соответствующих изменений физико-химических характеристик остатка на поверхности моря из-за процессов выветривания и (б) статистической обработке результатов. На рис. 1 тонкими серыми линиями показаны 72 траектории распространения элементарных разливов, а толстыми линиями — упрощенные конфигурации 72-часового разлива на конец каждого суток 10-суточного периода, цифры на рисунке соответствуют времени в сутках, которое прошло от начала разлива\*.

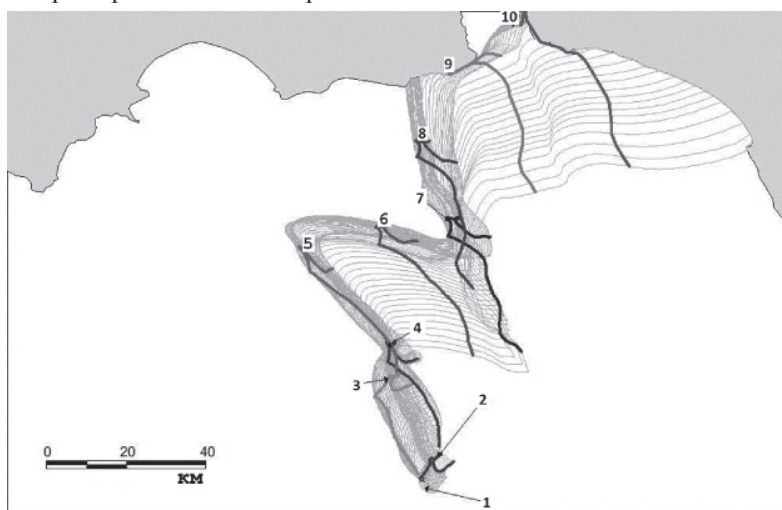


Рис. 1. Пример «сборки» сценария продолжительного сброса нефти из серии элементарных разливов.

Трехэтапная схема оценки ЗПВ представляется предпочтительной, во-первых, из-за меньших вычислительных затрат и, во-вторых, из-за возможности рассмотреть большее количество гидрометеорологических сценариев.

В рамках сценария распространения нефти рассчитываются последовательные положения разлива, обусловленные переносом нефти по поверхности моря, количество нефти, испарившейся в атмосферу, попавшей в водную толщу и на побережье, оцениваются изменения геометрических параметров (площадь, толщина, линейные размеры), протяженность загрязненной береговой линии и изменения в результате выветривания физико-химических характеристик нефти, таких как плотность и вязкость.

Одной из составляющих оценки риска воздействия на окружающую среду является определение зон риска распространения нефти, представляющих поле ми-

\* 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 ЛАРН и проведению АСЭВ.

нимального времени достижения участков акватории. Для расчета зон риска потенциального воздействия область, определяемая по ансамблю траекторий возможного распространения нефти, покрывается сеткой с пространственным разрешением, достаточно подробным для описания особенностей распределения статистических характеристик ансамбля траекторий, но не слишком мелким для исключения шума, обусловленного дискретизацией моментов времени сброса нефти. Сеточное представление необходимо как промежуточная стадия для перехода к графическому представлению зон риска распространения нефти в виде контуров или изолиний, ограничивающих соответствующие области.

При попадании разлива со средней толщиной выше некоторой заданной величины на участок акватории (в ячейку сетки с индексами  $i, j$ ) регистрируется время достижения  $T_{ij}^k$ , где  $k$  — номер метеорологического сценария. Минимальное время достижения  $\min\{T_{ij}^k\}$ , рассчитываемое для каждого участка акватории, 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.

В результате расчетов распространения нефти для ансамбля метеорологических сценариев можно определить частоты достижения участков морской акватории разливом с учетом выполнения набора условий на значения характеристик разлива. Эта величина является монотонной неубывающей функцией от времени в каждой точке пространства.

Если  $n$  — общее число регистрируемых событий в ячейке, то  $P_{xy} = n/N$  есть оценка вероятности воздействия разлива нефти в области акватории с координатами центра  $\{x, y\}$ , где  $N$  — число всех рассмотренных метеорологических сценариев. Изолинии поля минимального времени достижения (МВД) точек акватории  $T_a(x, y) = \min\{T_{ij}^k\}$  соответствуют контурам областей, за пределы которых разлив не выйдет в заданные промежутки времени после аварии. Когда в каждой точке ЗПВ определено  $T(x, y)$  и вероятность воздействия  $P_{xy}$ , то возможна своего рода «фильтрация» поля МВД по уровню вероятности.

Определим  $P(x, y, t)$  как эмпирическую вероятность достижения разливом точки области  $\{x, y\}$  акватории, где  $t$  — время от начала разлива. Выберем набор отметок времени  $t = \{t_1, t_2, \dots\}$  (например, 1 сутки, 2 суток, ...). Назовем экстремальными зонами риска совокупность областей акватории  $\delta S(t_m)$ ,  $m = \{1, 2, 3, \dots\}$ , для которых выполняется условие

$$P(x, y, t_m) > t_0, \quad (2)$$

а зонами риска с уровнем вероятности  $P_0$  набор областей  $\delta S_{P_0}(t_m)$ ,  $m = \{1, 2, 3, \dots\}$ , для которых выполняется условие

$$P(x, y, t_m) > P_0. \quad (3)$$

Данная характеристика может быть связана с количеством метеорологических сценариев, при которых разлив нефти достигает участка акватории в пределах заданных значений времени и при соблюдении некоторых условий, например, средняя толщина нефтяного пятна должна превышать заданное значение, определенное из соображений экологической безопасности или эффективности реагирования.

На рис. 2а показаны экстремальные зоны риска распространения разливов нефти в безледный период для одного из возможных сценариев технической аварии



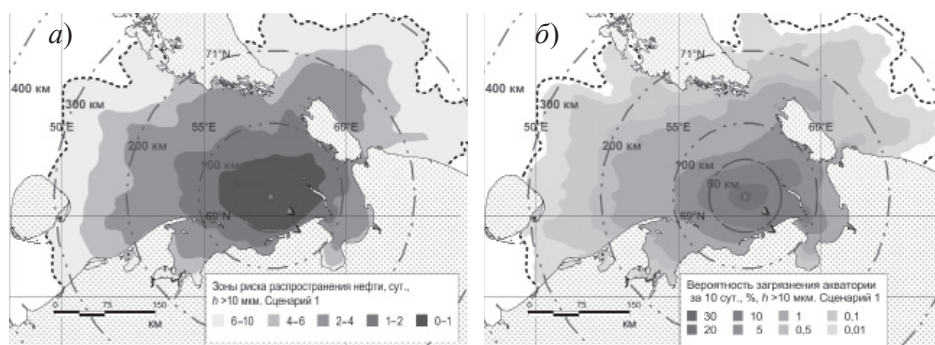


Рис. 2. Зоны риска распространения нефти с учетом экстремальных сценариев (а) и вероятность загрязнения участков акватории (б).

в районе МЛСП «Приразломная» в Печорском море, а на рис. 2б вероятности загрязнения участков акватории за 10 суток. Все характеристики рассчитаны при условии, что в момент обнаружения нефти в соответствующих областях акватории ее средняя толщина превышала 10 мкм.

В отличие от результатов расчетов экстремальных зон риска, показанных на рис. 3б, обуславливающих необходимость защиты ООПТ на острове Колгуев на седьмые сутки после аварии, результаты, представленные на рис. 3а, говорят о том, что поскольку вероятность достижения острова за 10 суток от начала аварии менее 0,5 %, то с большой вероятностью время для проведения операций ЛРН и защиты побережий составит более 7 суток. Аналогично, поскольку вероятность достижения

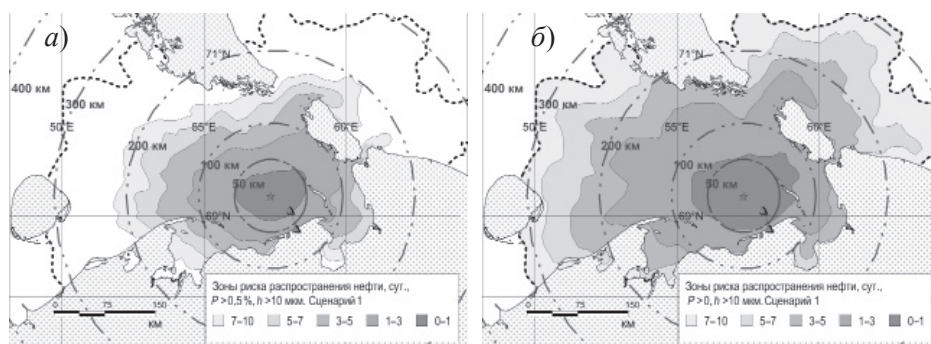


Рис. 3. Зоны риска с учетом экстремальных значений (а) и отфильтрованные по уровню вероятности (б).

областей побережья острова Долгий в течение первых суток после аварии менее 0,5 %, то 24-часовая готовность для развертывания мероприятий по защите берегов по факту разлива нефти может считаться приемлемой, что не следует из рассмотрения экстремальных зон риска. Определенные с учетом уровня вероятности зоны риска при сравнении с экстремальными оказываются более устойчивыми к «выбросам» траекторий, которые соответствуют событиям редкой повторяемости.

#### ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИВА НЕФТИ НА БЕРЕГОВУЮ ЗОНУ

В простом случае одномоментного/залпового сброса нефти неблагоприятным событием можно считать пересечение траектории движения нефтяного пятна с ли-

нией берегового контура при условии, что количество нефти при подходе разлива к берегу достаточно, чтобы вызвать существенное загрязнение береговой полосы. На практике бывают ситуации, когда траектория движения нефтяного пятна, рассчитанная по численным моделям, не пересекает береговой контур, но проходит в «опасной» близости от него. В работе (Зацева и др., 2014б) было отмечено, что неизбежные погрешности, возникающие при расчете характеристик гидрометеорологических условий, приводят к необходимости определения области вероятного обнаружения (ОВО) разлива нефти, наряду с его наиболее вероятным положением. Из этого следует, что факт воздействия на береговую зону может быть определен как реализация события, состоящего из «подхода» разлива к берегу на расстояние, меньшее, чем радиус ОВО. Альтернативным технологическим решением для оценки вероятности воздействия на берега может быть расчет пересечения траектории движения нефтяного разлива или семейства траекторий движения элементарных разливов, в совокупности представляющих реализацию сценария более сложной технической аварии, с границей буферной зоны, определяемой средствами современных ГИС для любого географического объекта.

Во время продолжительного сброса нефти область нефтяного загрязнения растет пропорционально скорости течения, и, таким образом, протяженный разлив можно рассматривать как суперпозицию точечных источников. Вероятность достижения какой-либо частью протяженного разлива береговой зоны, как правило, выше, чем в случае залпового сброса нефти, однако количество нефти, которое может быть выброшено волнами на погонный метр берега, оказывается существенно ниже, чем при залповом сбросе того же объема.

Береговой контур в моделях динамики атмосферы и океана, как правило, задается соответствующим выделением ячеек сетки, относящихся к суше. Использование геоинформационных систем в модельных комплексах для расчетов распространения нефти в море создает удобную возможность для анализа вероятных последствий при взаимодействии нефтяного разлива с берегом. Береговой контур в ГИС задается в виде полилинии с детальностью, зависящей от масштаба карты. Факт пересечения траектории(ий) движения разлива(ов) нефти с участком береговой линии может рассматриваться как загрязнение данного участка и, возможно, соседних, что зависит от соотношения размера пятна при подходе к берегу и протяженности фрагментов полилинии, аппроксимирующей береговой контур.

#### **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

При определении вероятности поражения какого-либо объекта разливом нефти использование понятия «траектория» перемещения слика может приводить к значительным ошибкам. Более корректно определять пересечение двух областей — области уязвимого объекта (УО) и последовательных конфигураций области нефтяного загрязнения. В статистических оценках необходимо учитывать все последовательные конфигурации нефтяного разлива в рассматриваемом интервале времени на предмет их пересечения либо с контуром интересующего нас объекта, либо с определенной областью акватории.

Если хотя бы одна из последовательных конфигураций нефтяного разлива, пересекает область рассматриваемого УО, то этот факт считается неблагоприятным событием. Отношение определенных таким образом неблагоприятных событий к общему количеству рассмотренных сценариев представляет оценку вероятности

достижения разливом нефти УО. При этом могут быть использованы дополнительные условия. Например, событие можно считать неблагоприятным, если к моменту достижения разливом УО толщина пленки нефти будет выше заданной, а в случае внутриводного загрязнения — концентрация ЗВ выше ПДК.

Определенная таким образом вероятность достижения УО зависит от времени и может быть рассчитана для заданных промежутков времени после начала разлива. Вероятность достижения разливом нефти УО при соблюдении вышеуказанных условий будет стремиться к некоторой предельной величине при увеличении указанного промежутка времени, так как, например, превышение средней толщины нефти заданных значений существует ограниченное время из-за процессов растекания и выветривания.

Для каждого метеорологического сценария можно определить время, в течение которого нефтяной разлив (нефтяная пленка) находится в области УО, и среднее время по всему ансамблю гидрометеорологических сценариев. Для ансамбля метеорологических сценариев можно определить среднее время существования условий (например, толщины пленки нефти, концентрации нефти в воде выше заданных значений и др.). Отношение среднего времени воздействия на УО к среднему времени существования условий является оценкой вероятности воздействия на УО.

Первое из вышеприведенных определений (вероятность достижения) используется при подготовке плана ЛАРН, второе — вероятность воздействия — при решении экологических задач.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены общие принципы и некоторые технические приемы, использующиеся при проведении математического моделирования распространения аварийных разливов нефти в море, для обеспечения информационной поддержки при планировании комплекса первоочередных мер по защите морской среды и побережий от негативного влияния нефтяного загрязнения. Определение будущего разлива нефти как случайного события обуславливает необходимость вероятностных оценок возможного воздействия разливов на уязвимые объекты. Предложена новая формулировка определения зон риска распространения нефти, учитывающая оценку вероятности достижения соответствующих областей акватории и устойчивая к «выбросам» траекторий с редкой повторяемостью. В работе обсуждаются новые определения для вероятности достижения/воздействия на уязвимые объекты на поверхности моря и на побережье. Перечисленные характеристики определяют масштабы, характер и географическое положение потенциального воздействия разливов, что является, по сути, основой для решения различных прикладных задач.

Исходные данные для моделирования разливов требуют задания всех возможных гидрометеорологических условий в районах добычи и на маршрутах транспортировки нефти, что обеспечивается актуализированными гидрометеорологическими моделями регионального уровня. Подготовка таких исходных данных весьма трудоемка, но только в этом случае могут быть проверены, оценены и обоснованы плановые стратегии и технологии борьбы с разливами, выявлены объективные ограничения для реагирования по гидрометеорологическим условиям и обеспечено оперативное прогнозирование с целью управления операциями ЛРН.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Русского географического общества в рамках проектов № 14-07-00513, № 14-07-00434 и № 15-07-04871, № 13-05-41214 РГО\_а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дианский Н.А.* Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
- Зацена С.Н.* Динамика растекания нефти по поверхности моря: Автореф. ... дис. канд. физ.-мат. наук. М., 1989. 32 с.
- Зацена 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.
- Зацена С.Н., Ивченко А.А., Москвичев А.М., Солбаков В.В., Становой В.В.* К оценке области возможного обнаружения нефтяного загрязнения при прогнозировании распространения аварийных разливов нефти в море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 4 (102). С. 61–70.
- Кулаков М.Ю., Макитас А.П., Шутилин С.В.* AARI–IOCM — совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 6–18.
- Овсиенко С.Н., Зацена С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Труды ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 248–271.
- Попов С.К.* Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 2004. № 5. С. 76–84.
- Становой В.В., Лавренов И.В., Неглов И.А.* Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 77. С. 7–16.
- Bao X., Zhang F.* Evaluation of NCEP–CFRSR, NCEP–NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau // J. of Climate. 2013. Vol. 26. № 1. P. 206–214.
- Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-dimensional coastal ocean models / Ed. N. Heaps. American Geophysical Union, 1987. P. 1–16.
- Castanedo S., Medina R., Losada I.J., Vidal C., Méndez F.J., Osorio A., Juanes J.A.* The Prestige oil spill in Cantabria (Bay of Biscay). Part I: Operational forecasting system for quick response, risk assessment, and protection of natural resources // J. of Coastal Research. 2006. Vol. 22 (6). P. 1474–1489.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. № 656. P. 553–597.
- Dietrich D.E., Bowman M.J., Korotenko K.A., Bowman M.H.* Oil spill risk management. Modelling Gulf of Mexico Circulation and dispersion. Scrivener Publishing, 2014. 216 p.
- Fay J.A.* Physical processes in the spread of oil on a water surface // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 1971. Vol. 1971. № 1. P. 463–467.
- Haidvogel D.B., Arango H.G., Hedstrom K., Beckmann A., Malanotte-Rizzoli P., Shchepetkin A.F.* Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2000. Vol. 32. № 3. P. 239–281.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. of the American meteorological Society. 1996. Vol. 77. № 3. P. 437–471.
- Klemas V.* Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills // J. of Coastal Research. 2010. Vol. 26. Issue 5. P. 789–797.
- Korotenko K.A., Bowman M.J., Dietrich D.E., Bowman M.H.* Modeling 3-D Transport and Dispersal of Oil Plume Released During BP/Horizon Accident in the Gulf of Mexico in 2010 // J. of Sustainable Energy Engineering. 2013. Vol. 1. № 1. P. 85–104.

- Lehr W., Jones R., Evans M., Simecek-Beatty D., Overstreet R.* Revisions of the ADIOS oil spill model // *Environmental Modelling & Software*. 2002. Vol. 17. № 2. P. 191–199.
- Liungman O., Mattsson J.* Scientific Documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2011. 32 p.
- Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson S.* Oil spill processes and models // Environment Canada Report No EE-8. Ottawa, Ontario, 1980. 96 p.
- North E.W., Adams E.E., Schlag Z., Sherwood C.R., He R., Hyun K.H., Socolofsky S.A.* Simulating oil droplet dispersal from the Deepwater Horizon spill with a Lagrangian approach // *Geophys. Monogr. Ser.* 2011. Vol. 195. P. 217–226.
- Reed M., Johansen O., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R.* Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state-of-the-art // *Spill Science Technology Bull.* 1999. № 5. P. 3–16.
- Saha S., Moorthi S., Pan H. et al.* The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2010. Vol. 91 (8). P. 1015–1057.
- Saha S., Moorthi S., Wu X. et al.* The NCEP Climate Forecast System Version 2 // *J. Climate*. 2010. Vol. 27. P. 2185–2208.
- Spaulding M., Howlett E., Anderson E., Jayko K.* OILMAP: a global approach to spill modelling // *Proc. of 15th Arctic Marine Oil Spill Program Tech. Seminar*, Environment Canada, Ottawa, Ontario. 1992. P. 15–21.
- Vos R.J.* Comparison of 5 oil weathering models // *Werkdocument RIKZ/ZD/2005.011W*. 49 p. URL: <http://edepot.wur.nl/174594>. [Дата обращения 03.08.2015]

*S.N. ZATSEPA, N.A. DIANSKY, V.I. ZHURAVEL, A.A. IVCHENKO,  
K.A. KOROTENKO, V.V. SOLBAKOV, V.V. STANOVOY, V.V. FOMIN*

**SIMULATION OF OIL SPILLS IN THE SEA FOR PLANNING MEASURES  
TO ENSURE ENVIRONMENTAL SAFETY IN OIL AND GAS PROJECTS.  
PART I. METHODOLOGY**

In the first part of the paper, the problem of oil spills forecasting and hindcasting support with hydrometeorological information, models and methods is discussed. The issue is considered in the context of the applied problems – oil spills response planning, analysis of cumulative environmental benefits, the environment impact assessment. A new approach for evaluation of oil spill potential impact risk zones is proposed, as coastal sections and vulnerable regions possible impact probabilities.

*Keywords:* Mathematical modeling, oil spills in sea, oil spill response plans, analysis of total environmental benefits, environmental impact assessment.