

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В МОРЕ  
ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ  
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРОЕКТОВ.  
ЧАСТЬ 2. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ\***

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

Во второй части статьи отмечены особенности постановки задачи моделирования разливов нефти для (подготовки планов ликвидации разливов нефти в море (ПЛАРН), анализа совокупной экологической выгоды при выборе стратегий реагирования на разливы (АСЭВ) и оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), представлены примеры результатов моделирования. В качестве примера модели нефтяного разлива, обеспечивающей потребности информационного обеспечения ПЛАРН и АСЭВ, в заключительной части статьи приведено описание модели SPILLMOD с набором параметризаций, позволяющих учитывать роль гидрометеорологических условий при использовании в операции ЛАРН скиммеров и боновых заграждений.

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

При подготовке ПЛАРН, при анализе совокупной экологической выгоды в результате реализации тех или иных стратегий реагирования, при оценке воздействия на окружающую среду необходимо рассматривать множество сценариев распростране-

\* Часть 1. Методология см: Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4 (106). С. 26–38.

ния нефти в море, обусловленных изменчивостью гидрометеорологических условий и невозможностью заранее предсказать момент будущей аварии. В статье обсуждаются современные возможности математического моделирования для обеспечения информационной поддержки при решении перечисленных прикладных задач (ПЗ). Для анализа сценариев распространения нефти используются различные модели и методы оценки. Рассмотрим особенности формулировок каждой из перечисленных задач и общие вопросы, возникающие при их решении.

Для подготовки ПЛАРН необходимо оценить:

- существует ли угроза уязвимым ресурсам;
- какова вероятность воздействия на области акватории и побережий;
- как быстро следует реагировать, чтобы минимизировать последствия;
- какие технические средства и в каком количестве необходимо предусмотреть для эффективного реагирования на разлив нефти.

Моделирование должно дать ответ на вопрос о том, насколько планирование ликвидации разливов нефти и готовность к действиям адекватны имеющимся угрозам (Журавель и др., 2013).

Для АСЭВ при реагировании на разливы нефти принципиальным является выбор критериев и приоритетов защиты. В рамках АСЭВ осуществляется:

- оценка угрозы уязвимым ресурсам, в том числе особо охраняемым природным территориям (ООПТ);
- выбор сценариев распространения нефти, приводящих к значительным последствиям;
- расчет распространения разливов для выбранных сценариев с учетом применения технических средств реагирования;
- оценка воздействия разливов на уязвимые объекты в рамках рассматриваемых сценариев с учетом применения различных стратегий реагирования.

Моделирование должно дать ответ на вопрос о том, какие стратегии реагирования следует предусмотреть в ПЛАРНе, чтобы обеспечить защиту ООПТ с минимальными экологическими потерями.

При оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) следует обратить внимание на несколько типов загрязнения среды — поверхностное, внутримассовое, загрязнение берегов и донных отложений. Пленочное загрязнение среды впоследствии может перейти в загрязнение берега, а внутриводное — в донные отложения. Оценка воздействия разливов нефти на окружающую среду проводится в два этапа. На первом этапе следует определить, какие ресурсы в регионе интереса относятся к уязвимым в результате разливов нефти. На втором — оценивается вероятность возникновения высоких уровней загрязнения в районах ценных экологических ресурсов.

Моделирование должно дать ответ на вопрос, где и с какой вероятностью могут возникнуть высокие уровни загрязнения водной среды и побережий, которые могут привести к тяжелым последствиям для экосистем и населения.

Во всех перечисленных выше ПЗ общим вопросом является оценка зоны потенциального воздействия от источников разливов нефти. Размеры этой зоны будут определяться процессами распространения и выветривания нефти. Для их оценки необходимо рассчитать ансамбль возможных сценариев распространения нефти или нефтепродуктов, используя траекторные модели с довольно простыми параметризациями процессов выветривания нефти и взаимодействия с берегом. Расчеты по траекторным

моделям следует проводить до момента времени, когда толщина нефтяной пленки станет пренебрежимо малой, чтобы быть источником загрязнения, как для водной толщи, так и для побережий. Предварительные ансамблевые расчеты сценариев распространения нефти дают основания для анализа возможных ограничений на реагирование при разливах по гидрометеорологическим причинам и для отбора вариантов распространения разливов для более тщательного рассмотрения, в том числе с учетом возможных мер. Для решения этой задачи требуются модели и методы, позволяющие описывать формирование области поверхностного нефтяного загрязнения с максимально возможной подробностью. В качестве примера модели нефтяного разлива, обеспечивающей потребности информационного обеспечения ПЛАРН и АСЭВ, в заключительной части статьи приведено описание модели SPILLMOD (Овсиенко и др., 1999; 2005) с набором параметризаций, позволяющих учитывать роль гидрометеорологических условий при использовании в операции ЛАРН скиммеров и боновых заграждений.

### ПЛАРН

Ответ на вопрос — существует ли угроза ресурсам при возникновении ЧС, связанной с разливом нефти в море, — может быть дан при проведении риск-анализа распространения аварийных разливов нефти в море (Зацепя и др., 2014). Математические модели нефтяного разлива, используемые в риск-анализе распространения разливов, должны по возможности адекватно описывать процессы трансформации нефти в морской среде. Но, 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.

При подготовке ПЛАРН информационная поддержка со стороны математического моделирования сводится к определению зоны потенциального воздействия вместе с необходимым комплексом оценок вероятности, масштабов и временных факторов распространения аварийного разлива нефти для каждого из вариантов технической аварии, возможной по результатам анализа технического риска (Зацепя и др., 2015). При подготовке плана ЛАРН необходимо определить состав и необходимое количество технических средств, предназначенных для противодействия распространению разлива нефти. При определении необходимого количества боновых заграждений для различных сценариев технических аварий следует использовать расчеты геометрических характеристик разлива нефти, которые могут быть проведены с учетом неравномерной толщины слоя нефти на поверхности моря.

Как правило, оценка геометрических характеристик разливов проводится для набора скоростей ветра ( $w$ ) 0 (штилевые условия), 3, 5 (слабые ветра), 7 и 10 м/с

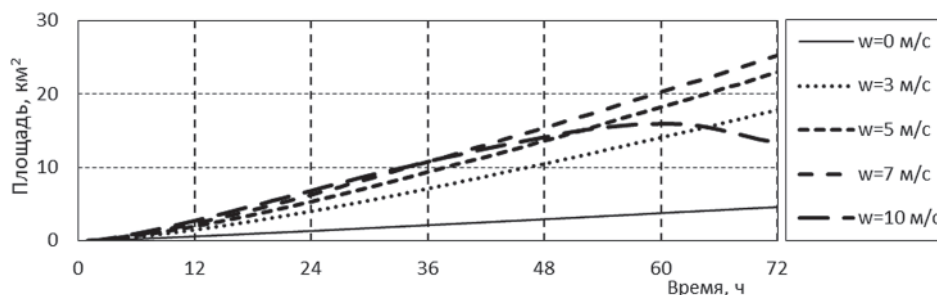


Рис. 1. Эволюция площади нефтяного разлива для различных значений скорости ветра.

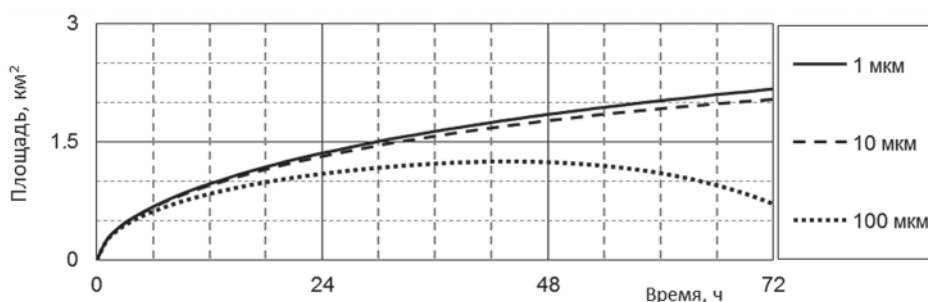


Рис. 2. Эволюция площади нефтяного разлива ( $400 \text{ м}^3$  дизельного топлива) для различных значений толщины при скорости ветра  $7 \text{ м/с}$ .

(критическая скорость ветра для операций ЛАРН). На рис. 1 приведен для примера расчет эволюции площади разлива дизельного топлива с толщиной более  $10 \text{ мкм}$  для нескольких значений скорости ветра\*.

Обращает на себя внимание факт немоного изменения части площади нефтяного разлива, внутри которой толщина нефти более  $10 \text{ мкм}$ , при увеличении скорости ветра от умеренного ( $7 \text{ м/с}$ ) до сильного ( $10 \text{ м/с}$ ). Это связано с удалением нефти с поверхности моря за счет процессов выветривания — испарения и диспергирования.

Подобные оценки носят справочный характер, так как рассчитываются для ветра, не меняющегося в течение трех суток, что представляется несколько искусственным. Тем не менее именно эти оценки наглядно показывают, что в зависимости от ветровой ситуации размеры разлива нефти, в первую очередь продолжительного, могут меняться на порядок и более.

Аналогичные оценки имеют место при расчете размеров областей внутри области нефтяного загрязнения. Результаты расчета, приведенные на рис. 2, показывают, что при скорости ветра  $7 \text{ м/с}$  «толстая» область нефтяного пятна (толщина более  $100 \text{ мкм}$ ) сначала растет, а затем начинает уменьшаться. Более тонкие части нефтяного сляка эволюционируют подобным образом на существенно больших временных масштабах.

Кроме приведенных результатов моделирования разливов нефти интерес представляют оценки выветривания нефти, в том числе с учетом возможного образования эмульсии, что необходимо для расчета емкостей для промежуточного хранения нефти или нефтепродуктов в ходе операции ЛАРН.

Количество нефти на поверхности моря в каждый момент времени после начала разлива зависит от ветровых условий. На рис. 3 показано, как может меняться объем нефтеводяной эмульсии на поверхности моря, рассчитанный для разлива нефти продолжительностью трое суток и с заданной предельной долей воды в нефти, равной  $0,56$ , для ансамбля метеорологических сценариев, возможных в северной части Охотского моря в безледный период.

\* 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.

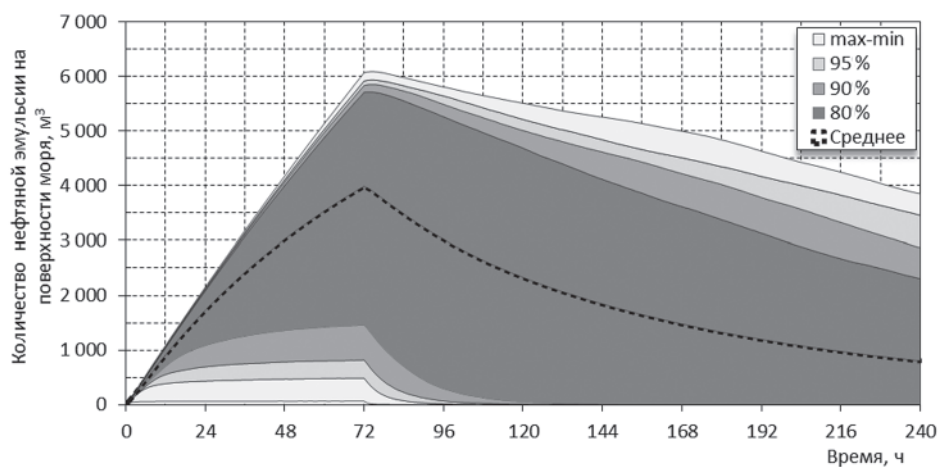


Рис. 3. Пример расчета выветривания нефти с учетом образования эмульсии. Продолжительность сброса 72 ч, объем 4800 м<sup>3</sup>.

Линии, ограничивающие односторонние области, представляют соответствующие двусторонние процентилю выборки данных. Максимальное выветривание (max) происходит при штормовых ситуациях и имеет малую вероятность реализации. Минимальное выветривание (min) происходит в штилевых условиях. Среднее (по сценариям) значение количества нефти на поверхности моря, показанное на рисунке, примерно соответствует медиане распределения.

Из приведенных данных следует, что при сбросе на поверхность воды 4800 м<sup>3</sup> нефти в течение 72 ч количество нефтяной эмульсии может достигать 6000 м<sup>3</sup>. Количество нефти на поверхности моря уменьшается за счет процессов испарения и диспергирования волнами, но может превысить первоначальный объем сброса при образовании эмульсии типа вода-в-нефти.

#### АСЭВ

АСЭВ (в англоязычной литературе NEBA — Net Environmental Benefit Analysis) представляет собой процесс принятия решения при выборе методов ликвидации разливов нефти, обеспечивающих наименьшее негативное влияние на окружающую среду.

Анализ суммарной экологической выгоды проводится после определения зоны потенциального воздействия для сценариев разливов нефти и оценки угрозы экологической безопасности для объектов на акватории и на побережье, аналогично тому, как это делается при информационном обеспечении подготовки ПЛАРН. Поскольку разлив нефти представляется случайным событием, то варианты воздействия на окружающую среду могут быть весьма разнообразными. Для АСЭВ можно использовать консервативный подход или выбор сценариев распространения нефти, во время которых негативные последствия для уязвимых объектов окружающей среды максимальны. Выбор этих сценариев производится с учетом «окна возможностей» для операций ЛАРН, т.е. совокупным набором ограничений для немедленного реагирования, обусловленных гидрометеорологическими условиями.

Для каждого из выбранных сценариев распространения разливов рассчитывается базовый вариант, при условии, что никаких мер по локализации и ликвидации

разлива нефти в море не проводится. Для этого варианта (т.н. режим «мониторинг») рассчитывается количество нефти, достигающее береговой зоны, и оценивается протяженность загрязненной береговой полосы. На следующем этапе результаты моделирования ранжируются, чтобы определить сценарии распространения нефти с наибольшими экологическими последствиями и отличающиеся по метеоусловиям, чтобы проанализировать в дальнейшем эффективность стратегий реагирования для каждой метеорологической ситуации. Если в будущем разлив нефти все же случится, то заранее проведенный АСЭВ позволит сделать выбор стратегии реагирования более обоснованным.

После выбора представительных метеорологических сценариев, как правило, сравнению подвергаются стратегии реагирования, предполагающие механический сбор нефти с помощью локализации нефтяного пятна боновыми заграждениями и с использованием различных нефтесборных систем, применением химических диспергентов или комбинации этих методов.

Для расчета эффективности стратегий ЛАРН должны быть разработаны и применены дополнительные модели процессов, описывающие воздействие на разлив технических средств локализации, сбора и ликвидации разливов на поверхности моря.

Приведем пример расчетов распространения разлива нефти для оценки стратегий реагирования и принятия решения о целесообразности использования диспергентов, реализованный авторами в одном из проектов. Анализ подвергались следующие варианты реагирования:

- а) мониторинг — осуществление слежения за пятном нефти (без применения средств);
- б) сбор механическими средствами (боны и скиммеры);
- в) совместное применение механических средств сбора и использование нанесения диспергентов с борта судна;
- г) совместное применение механических средств (М), нанесения диспергентов с судов (D), использования вертолета с внешней подвеской для нанесения диспергентов (H).

При моделировании были приняты во внимание исходные данные о возможном времени начала аварии (1), продолжительности светлого времени суток (2), месте сдачи собранной в море нефти (3), времени, необходимом для швартовых операций (4), времени, необходимом для погрузки диспергента на внешнюю подвеску вертолета (5), скорости судов при механическом сборе нефти (6), эффективности скиммеров (7), ширине захвата (8), скорости судна при обработке диспергентом (9), эффективности диспергента (10), ширине полосы обработки при использовании штанг (11), скорости судов на переходе в порт (12), скорости вертолета с пустой корзиной (13), скорости вертолета при обработке пленки нефти (14), ширине обработки с воздуха (15) и другие.

На рис. 4 показан пример расчета количества собранной/удаленной нефти при применении средств удаления нефти с поверхности моря по варианту реагирования «г» в рамках АСЭВ в сценарии технической аварии (ТА), при которой в море сбрасывается порядка 2000 т нефти в течение 72 ч. В примере было промоделировано развитие аварийной ситуации, когда в борьбе с разливом нефти были задействованы механические средства сбора (нефтесборщик), два судна с различным оборудованием для нанесения диспергента, вертолет с подвесной корзиной для обработки нефтяного пятна с воздуха.

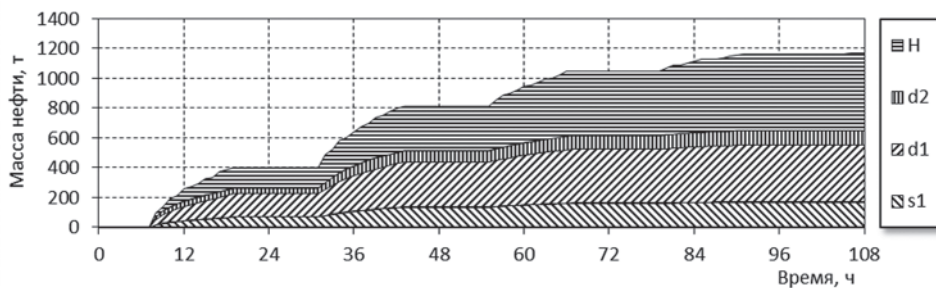


Рис. 4. Пример расчета эффективности различных средств борьбы с разливом. Н — удаление нефти с поверхности моря с использованием вертолета; d1 и d2 — удаление нефти с поверхности судами с оборудованием для нанесения диспергентов; s1 — сбор нефти судном с навесной системой траления нефти.

На рисунке видны области с нулевой эффективностью удаления нефти с поверхности моря, соответствующие темному времени суток. Результаты расчетов демонстрируют тенденцию к уменьшению эффективности нефтесборных систем и эффективности судов с оборудованием для нанесения диспергентов со временем за счет уменьшения толщины пленки нефти на поверхности моря. Проведенное моделирование показывает, что, начиная со вторых суток после аварии при метеоусловиях, использованных на рис. 5, наибольшую эффективность удаления нефти с поверхности демонстрирует вертолет с подвеской для обработки диспергентом пятна нефти.

На рис. 5 показана эволюция массы нефти на поверхности моря при реализации описанных выше стратегий реагирования для сценария ТА, и приведен временной ход модуля скорости ветра. Как следует из приведенных данных, в силу значительного объема разлива, на поверхности моря нефть остается продолжительное время, несмотря на естественное выветривание и применение различных средств противодействия.

Результаты применения стратегий реагирования приведены в табл. 1. Результаты моделирования показывают, что эффективность всех средств реагирования значительно уменьшается со временем, и причина заключается в быстром уменьшении толщины пленки нефти за счет растекания и деформации поверхностного нефтяного slickа полем течений. В рассмотренном варианте только стратегия реагирования «г» с применением вертолета в дополнение к судну-нефтесборщику и судам с системами нанесения диспергентов позволила исключить загрязнение берегов (рис. 5, табл. 1).

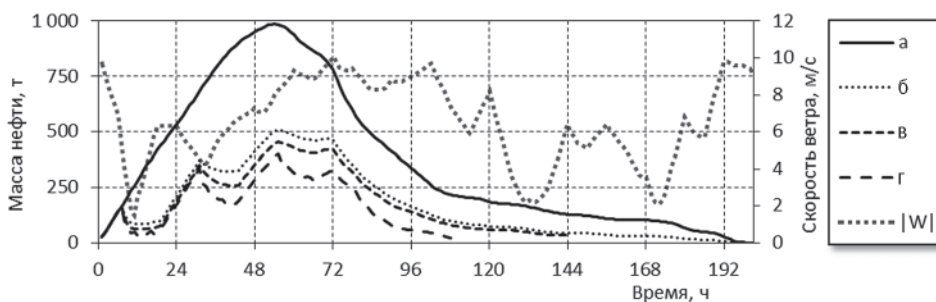


Рис. 5. Пример расчета баланса массы нефти на поверхности в сценарии распространения нефти при различных вариантах реагирования.

Таблица 1

Эффективность реагирования с применением различных стратегий	
Вариант реагирования	Результат применения стратегии
а) в условиях мониторинга	Время достижения берега 132 ч, масса на берегу на 8 сутки составила 121 т, протяженность загрязненной береговой линии составила 40 км. Количество диспергированной в водную толщу нефти — 1368 т, испарившейся — 536 т.
б) в условиях применения механических средств	Масса нефти на берегу составила 28 т, протяженность загрязненной береговой линии составила 36 км. Количество диспергированной в водную толщу нефти — 714 т, испарилось — 450 т. Собрано 856 т нефти.
в) в условиях применения механических средств + диспергирование (борт судна)	Масса нефти на берегу 9 т, протяженность загрязненной береговой линии составила 11 км. Количество диспергированной в водную толщу нефти — 1339 т, испарилось — 437 т. Собрано 235 т и диспергировано диспергентами 716 т нефти.
г) в условиях применения механических средств + диспергирование (борт судна + вертолет)	Загрязнение берегов не прогнозируется. Количество диспергированной в водную толщу нефти — 1444 т, испарилось — 415 т. Собрано — 172 т и диспергировано диспергентами 998 т нефти.

#### ОВОС

Нефтяной разлив в море приводит к загрязнению атмосферы, водной толщи, морской поверхности и морского дна, а также берегов. Для отдельно взятого метеорологического сценария можно рассчитать внутриводную концентрацию диспергированной или растворенной нефти  $C_{oil}^k(x, y, z)$  ( $k$  — номер метеорологического сценария) в каждый момент времени после разлива. Поле концентрации определяется положением источника сброса, продолжительностью его действия и интенсивностью, полем течений в море и характеристиками турбулентного перемешивания в районе распространения нефти.

В отличие от пятна нефти на поверхности моря область внутримассового загрязнения имеет большие размеры и принципиально трехмерна, однако, вследствие положительной плавучести капель нефти, загрязнение в большинстве случаев будет сконцентрировано в верхнем слое моря.

Задачу ОВОС можно сформулировать как оценку риска или вероятности возникновения в данной области пространства/акватории концентраций нефтепродуктов выше заданных значений, оценку средних значений объемов загрязненных вод и среднего времени существования этих воздействий (время экспозиции) для набора пороговых значений концентрации. Предельные значения концентраций зависят от чувствительности конкретных гидробионтов к нефтяному загрязнению. Кроме концентрации нефтепродуктов, в заданных точках акватории можно рассчитывать и другие основанные на ней функционалы, если подобная информация будет востребована. Вероятность возникновения высоких уровней загрязнения в отличие от вероятности появления нефти на поверхности моря для задач ПЛАРН не следует дифференцировать по времени, прошедшему после аварии. Таким образом, выходную продукцию моделирования распространения нефти для ОВОС должны представлять собой карты вероятности возникновения высоких уровней загрязнения морской сре-



ды для различных типов уязвимых ресурсов, а также табличные данные об объемах загрязненной воды и времени их существования.

В отличие от рассматриваемых в рамках подготовки ПЛАРН сбросов нефти с максимальными объемами и интенсивностью, обеспечивающих защиту в случае более «легких» вариантов аварий, для ОВОС следует проводить расчеты для сценариев сбросов с меньшими объемами, но имеющими значительно более высокую вероятность реализации.

Существуют виды гидробионтов, которые совершают случайные миграции, и для них возможность нахождения в некоторой области акватории носит случайный характер, то же самое относится и к малочисленным видам. В этом случае вероятность воздействия может быть оценена как произведение вероятности возникновения высоких уровней загрязнения, вероятности возникновения технической аварии определенного уровня и вероятности появления в заданной области акватории уязвимых морских организмов.

Зоны потенциального воздействия при ОВОС необходимо рассчитывать по сценариям распространения внутримассового загрязнения до момента разбавления загрязненного объема воды до безопасных концентраций.

Определенной оптимизацией вычислений может стать фильтрация сценариев распространения нефти по поверхности моря по оценке выветривания слика и «отсев» сценариев, развивающихся, например, в штилевых условиях; другой возможностью оптимизации проводимых расчетов является сужение области расчета вероятности воздействия до отдельных районов, прилегающих к особо охраняемым природным территориям (ООПТ). В общем случае номенклатура характеристик, необходимых для расчетов ущерба морской биоте, должна быть определена на стадии изучения фоновых характеристик окружающей среды, насыщенной морскими организмами.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В МОДЕЛИ SPILLMOD

Модель SPILLMOD описывает процессы физико-химической трансформации разлива нефти на поверхности моря. В основе математической постановки задачи лежат осредненные по вертикальной координате уравнения Навье–Стокса для тонкого слоя легкой жидкости на поверхности более тяжелого субстрата. Особенность постановки и реализации модели SPILLMOD заключается в том, что решение задачи ищется в области, которая сама является искомой величиной. Приведем необходимые сведения об основных уравнениях модели и постановке задачи в целом.

Рассматривается двумерная область  $\Omega(x, y)$  с границей  $d\Omega$ . Нефть или нефтепродукт занимает подобласть  $\Omega' \in \Omega$ . В подобласти  $\Omega'' \in \Omega'$  действует источник, обеспечивая поток нефтепродуктов —  $Q_0$  на поверхность моря. Область  $\Omega$  ограничена кусочно-линейной функцией, аппроксимирующей береговой контур. Основные уравнения модели для области  $\Omega'$  представляются в следующем виде:

$$h \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -hg' \nabla h - \beta |(\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c))| (\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c)), \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h\mathbf{u}) = - \frac{Q_e + Q_{n-d} + Q_{ch-d} - Q_0 + Q_{sc}}{\rho_0}, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — плотность нефти;  $\mathbf{u}$  — вертикально осредненная скорость движения нефти;  $\mathbf{u}_d$  — скорость поверхностного дрейфового течения, задаваемая параметрически;

$\mathbf{u}_c$  — скорость течения неветрового происхождения; рассчитанная по модели течений или определенная экспериментальным путем;  $h$  — толщина нефти;  $\beta$  — коэффициент трения;  $Q_e$  — поток массы за счет испарения;  $Q_{n-d}$  — поток массы за счет естественного диспергирования;  $Q_{ch-d}$  — поток массы за счет химического диспергирования;  $Q_0$  — поток нефти на поверхность от источника разлива;  $Q_{sc}$  — поток нефти с поверхности за счет применения скиммерных систем;  $g' = g(\rho_w - \rho_o)/\rho_o$  — редуцированное ускорение силы тяжести;  $\rho_w$  — плотность воды.

Если граница области  $\Omega'(t, x, y)$  есть  $L(t, x, y)$  и  $L = L_1(t, x, y) \cup L_2(x, y)$ , где  $L_1$  — свободная граница и  $L_2$  — контактная (твердая) граница, система уравнений (1)–(2) должна быть дополнена кинематическим граничным условием:

$$L1: R_t + \mathbf{u}\nabla R = 0, \quad (3)$$

где  $R(t, x, y) = 0$  — уравнение свободной границы; и динамическим условием:

$$L1: h(x, y) = 0. \quad (4)$$

Соотношение (3) справедливо, когда перемещение границы обусловлено динамическими факторами. В некоторых случаях граница области может изменяться за счет удаления нефти с поверхности как под действием природных факторов — за счет испарения и диспергирования волнами, так и в ходе операций по борьбе с разливом нефти.

На твердой границе  $L_2$  (если таковая присутствует) должно выполняться условие непротекания:

$$L_2: \mathbf{u}_n = 0, \quad (5)$$

где  $\mathbf{u}_n$  — нормальная к  $L_2$  компонента  $\mathbf{u}$ .

В начальный момент времени распределение толщины  $h(x, y, 0)$ , поле скорости  $\mathbf{u}(x, y, 0)$  и область  $\Omega'(0)$  предполагаются известными. Требуется определить  $h(x, y, t)$ ,  $\mathbf{u}(x, y, t)$  и  $\Omega'(t)$  при  $t > 0$ .

Постановку задачи необходимо дополнить параметризациями потоков нефти с поверхности моря за счет различных процессов (Овсиенко, 2005). Здесь обратим внимание, что параметрически описываются потоки с единицы поверхности нефтяного пятна, а общее количество нефти, удаленное из пятна в единицу времени, будет зависеть от величины потоков и площади пятна, от точности определения которой зависит результат.

При расчетах разлива нефти с учетом установки боновых заграждений граница  $L = L_1(t, x, y) \cup L_2(x, y)$  области  $\Omega'$  «дополняется» участком  $L_3(t)$ , ограничивающим движение нефти.

Границы  $L_3(t)$  представляют собой один или несколько контуров (боны), вообще говоря, движущихся, трансформирующихся под действием течений в верхнем слое моря как многозвенная гибкая нить, закрепленная в конечных точках.

На границе  $L_3(t)$  задается условие ограниченного пропускания, зависящего от эффективности удержания нефти в боновой системе в конкретных гидрометеорологических условиях.

$$L_3: \mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{bn}, \quad (6)$$

$$L_3: Q_b = (1 - E_b)\rho h(\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c - \mathbf{u}_b) \cdot \mathbf{n}, \quad (7)$$

где  $Q_b$  — поток нефти через бон;  $E_b$  — эффективность удержания нефти боном, зависящая от типа бона и гидрометеорологических условий;  $\mathbf{u}_b$  — скорость границы

(бона);  $\mathbf{n}$  — единичный вектор нормали к элементу бона;  $\mathbf{u}_n$  — скорость движения нефти, нормальная к ближайшему участку бона.

При натуральных испытаниях эффективности бонов в различных гидрометеорологических условиях определяются специальные параметры:  $\mathbf{u}_{fl}$  — скорость течения начала пропуска (first loss speed), при которой боны начинают пропускать нефть, и  $\mathbf{u}_{cl}$  — критическая скорость течения (critical loss speed), после превышения которой боны считаются малоэффективными. Указанные величины зависят от параметров ветрового волнения.

Эффективность  $E_b$  удержания нефти боновыми системами параметризуется как

$$E_b = \begin{cases} 1, & (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} < u_{fl} \\ 1 - \frac{(\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} - u_{fl}}{u_{cl} - u_{fl}}, & u_{fl} \leq (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} < u_{cl} \\ 0, & (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} \geq u_{cl}. \end{cases} \quad (8)$$

Если в операции ЛАРН принимает участие скиммер или судно-нефтеборщик, то отток (сбор) нефти из нефтяного слика в области действия скиммерной системы  $\Omega_{sc}(t, x, y)$  параметризуется как:

$$\Omega_{sc}: Q_{sc} = P_{100} \cdot E_{sc}(H_s, h), \quad (9)$$

где  $P_{100}$  — «паспортная» производительность скиммерной системы;  $E_{sc}(H_s, h)$  — эффективность работы в конкретных гидрометеорологических условия и в зависимости от толщины пленки нефти  $h$ ;  $H_s$  — высота значительных волн (significant wave height).

Ниже перечислены параметры, определяющие эффективность сбора нефти.

Максимально возможная скорость сбора нефти, при данной толщине нефти, скорости перемещения и ширины захвата скиммерной системы (*Encounter Rate (ER)*, м<sup>3</sup>/ч) определяется как  $ER = W_h V_{sc}$ , где  $W$  — ширина полосы захвата скиммерной системы;  $h$  — толщина нефти;  $V_{sc}$  — скорость перемещения скиммерной системы.

Эффективность сбора ( $E_{sc}$ ) — доля нефти, собранная скиммером, по отношению к максимально возможной зависит от параметров слика, скорости сбора и параметров окружающей среды.

Объем нефти (эмульсии), собираемый скиммером в единицу времени (*Oil/Emulsion Recovery Rate (ORR)*):

$$OPR(\text{м}^3/\text{ч}) = ER(\text{м}^3/\text{ч}) \cdot E_{sc}, \quad (10)$$

$$E_{sc} = P_{wave} \cdot P_h, \quad (11)$$

$$P_{wave} = \begin{cases} 1, & H_s < H_{cr-sc} \\ 1 - \frac{H_s - H_{cr-sc}}{H_{l-sc} - H_{cr-sc}}, & H_{cr-sc} \leq H_s < H_{l-sc} \\ 0, & H_s \geq H_{l-sc}, \end{cases}$$

где  $H_{cr-sc}$  — критическое значение высоты волны, после которого эффективность работы скиммерной системы падает;  $H_{l-sc}$  — пороговое значение высоты волны, после превышения которого скиммер малоэффективен.

$$P_h = \begin{cases} 1, h > h_{cr-sc} \\ 1 - \frac{h_{cr-sc} - h}{h_{cr-sc} - h_{l-sc}}, h_{l-sc} \leq h < h_{sr-sc} \\ 0, h < h_{l-sc} \end{cases} \quad (12)$$

где  $h_{cr-sc}$  — критическое значение толщины пленки нефти, при котором начинаются ограничения эффективности действия скиммерной системы;  $h_{l-sc}$  — пороговое значение толщины пленки, после которого эффективность работы скиммерной системы равна нулю. Используемые в модели SPILLMOD параметризации эффективности действий средств сбора нефти построены по результатам испытаний бонов и скиммеров (Fingas, 2004).

Некоторым упрощением задачи, в ряде случаев приемлемым, можно считать распространение области действия скиммерной системы  $\Omega_{sc}(t, x, y)$  на всю область нефтяного пятна. Такой подход эффективен, когда в операции участвуют несколько судов с навесной системой траления и их позиционирование в конкретный момент времени неизвестно. В этом случае удаление нефти с поверхности моря техническими средствами рассчитывается «добавлением» к обычным потокам нефти с поверхности моря (испарение и диспергирование волнами) дополнительных «потоков» за счет действия скиммеров и химических диспергентов. Величина этих потоков будет определяться гидрометеорологическими условиями, состоянием пятна нефти и графиком применения средств сбора, так как в ночное время операции по локализации разликов нефти не проводятся, а состояние моря и толщина пленки нефти существенно изменяют эффективность реагирования.

Для решения задачи в модели SPILLMOD используется оригинальная вычислительная технология. Объект моделирования (нефтяной разлив) представляется как ансамбль лагранжевых частиц, каждая из которых обладает набором параметров, таких как пространственные координаты  $\{x_i, y_i\}$ , скорость  $\{u_i, v_i\}$ , масса  $\{m_i\}$ , фракционный состав  $\{c_i^k\}$ , где  $i$  — номер частицы в ансамбле,  $c_i^k$  — концентрация  $k$ -ой фракции. Начальное состояние задано, если известны все параметры частиц. Прямоугольная эйлерова сетка «натягивается» на лагранжев ансамбль частиц, так чтобы все частицы содержались внутри сеточной области. После этого скорость нефти  $\mathbf{u}(x, y, t)$  и ее толщина  $h(x, y, t)$  определяются в эйлеровом представлении на сетке «С» по классификации Аракавы. Расчетная сетка, используемая в данной технологии, не вполне эйлерова, так как реконструируется на каждом временном шаге в зависимости от конфигурации частиц и отличается от традиционного эйлерова представления о фиксированных точках пространства. Как только сетка построена, все свойства среды (скорость движения нефти  $\mathbf{u}(x, y, t)$  и ее толщина  $h(x, y, t)$ ) определяются как сеточные функции. Толщина  $h_{ij}$  подсчитывается как сумма масс отдельных частиц, отнесенная к площади ячейки, занятой частицами:

$$h_{i,j} = \frac{\rho_0}{\gamma \Delta x \Delta y} \sum_k^{N_{ij}} m_k, \quad (13)$$

где  $\gamma$  — часть площади ячейки, занятая частицами;  $m_k$  — масса  $k$ -ой частицы;  $N_{ij}$  — количество частиц в  $(i, j)$ -ой ячейке  $\Delta x$ ;  $\Delta y$  — размер ячейки по двум горизонтальным координатам соответственно. В качестве метода восстановления скорости с частиц

на сетку в SPILLMOD используется линейная регрессия, имеющая более высокий порядок точности в отличие от метода «ближайшего узла», использовавшийся в оригинальном методе PIC (Harlow, 1964).

После того как сеточные функции определены, полный вычислительный цикл может быть представлен как последовательность нескольких шагов. На первом шаге проводится расчет промежуточных значений  $\mathbf{u}_{int}(x, y, t)$  и  $h_{int}(x, y, t)$  в соответствии с уравнениями (1) и (2) без адвективных членов и пренебрегается всеми эффектами, связанными с движением среды. На этом шаге характеристики среды определены в эйлеровом представлении. На втором шаге проводится интерполяция значений скорости с узлов сетки на частицы и расчет новых значений массы частиц, меняющихся из-за процессов выветривания или в ходе операции ЛАРН. В конце этого шага все характеристики среды полностью определены в лагранжевом представлении. Третий шаг представляет перенос всех свойств частиц через границы эйлеровой сетки и определение новых значений  $h_{ij}$  и  $\mathbf{u}_{ij}$  на «эйлеровой» сетке, построенной с учетом новой конфигурации частиц. В конце этого шага характеристики объекта моделирования переносятся с лагранжевой сетки на эйлерову.

Важно отметить, что границы области, в которой ищется решение задачи, не фиксированные. При определенных условиях часть границы области, которая рассматривалась как контактная, может стать подвижной (свободной). Например, когда нефть отходит от берега под действием ветра. И, наоборот, кинематическое условие, реализующееся на подвижной границе, при подходе к берегу или бону трансформируется в условие непротекания. Это означает, что граничные условия в задаче определяются в ходе моделирования путем проверки условий на каждом шаге. Таким образом, модель SPILLMOD может быть отнесена к классу гибридных моделей, в которых решение уравнений гидродинамики с помощью традиционных конечно-разностных схем дополняется элементами имитационного моделирования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обсуждаются вопросы, возникающие при подготовке методами математического моделирования информации о распространении разливов нефти на поверхности моря для целей составления планов ЛАРН, проведения АСЭВ и ОВОС. Перечисленные задачи имеют мультидисциплинарный характер, а математическое моделирование — единственный инструмент для оценки наличия и степени угрозы уязвимым ресурсам, позволяющий проанализировать возможные стратегии действий для минимизации последствий аварии. Моделирование не ограничивается проведением расчетов по моделям нефтяного разлива, но предполагает обязательный анализ результатов и на каждом этапе сопровождается оценками и комментариями экспертов. В работе показаны примеры использования математических моделей для информационной поддержки планирования операций по локализации и ликвидации аварийных разливов нефти в море, получения данных для проведения процедуры АСЭВ и расчета параметров, необходимых для расчета ущерба морским гидробионтам в рамках ОВОС.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Журавель В.И., Журавель И.В.* Количественная оценка риска и ограничение последствий выбросов. URL: <http://www.ogjussia.com/issues/article/issue-article-17-2013> [Дата обращения 12.07.2015].
- Зацена С.Н., Дианский Н.А., Журавель В.И., 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.
- 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.
- 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.
- Fingas M.* Weather Windows for Oil Spill Countermeasures // Report for Prince William Sound Regional Citizens' Advisory Council (PWSRCAC). January 2004. Anchorage, Alaska.
- Harlow F.H.* The particle-in-cell Computing Method in fluid dynamics // Meth. Comput. Phys. 1964. Vol. 3. P. 319–343.
- Ovsienko S., Zatsëpa S., Ivchenko A.* Study and modelling of behavior and spreading of oil in cold water and in ice conditions // Proceeding to the 15th International conference on port an ocean engineering under Arctic conditions, 1999. P. 848–857.

*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 II. FEATURES OF REALIZATION FOR APPLIED PROBLEMS**

In the second part of the article, peculiarities of the oil spills modeling for applied problems are marked, and some examples of simulation results are submitted. As an example of a oil spill model, which able to ensure the needs of information support of applied problems, the description of model SPILLMOD is presented in the final part of the article. Also a set of parameterizations allowing to take into account the role of hydrometeorological conditions for use skimmers and booms in oil spill response operations are described.

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