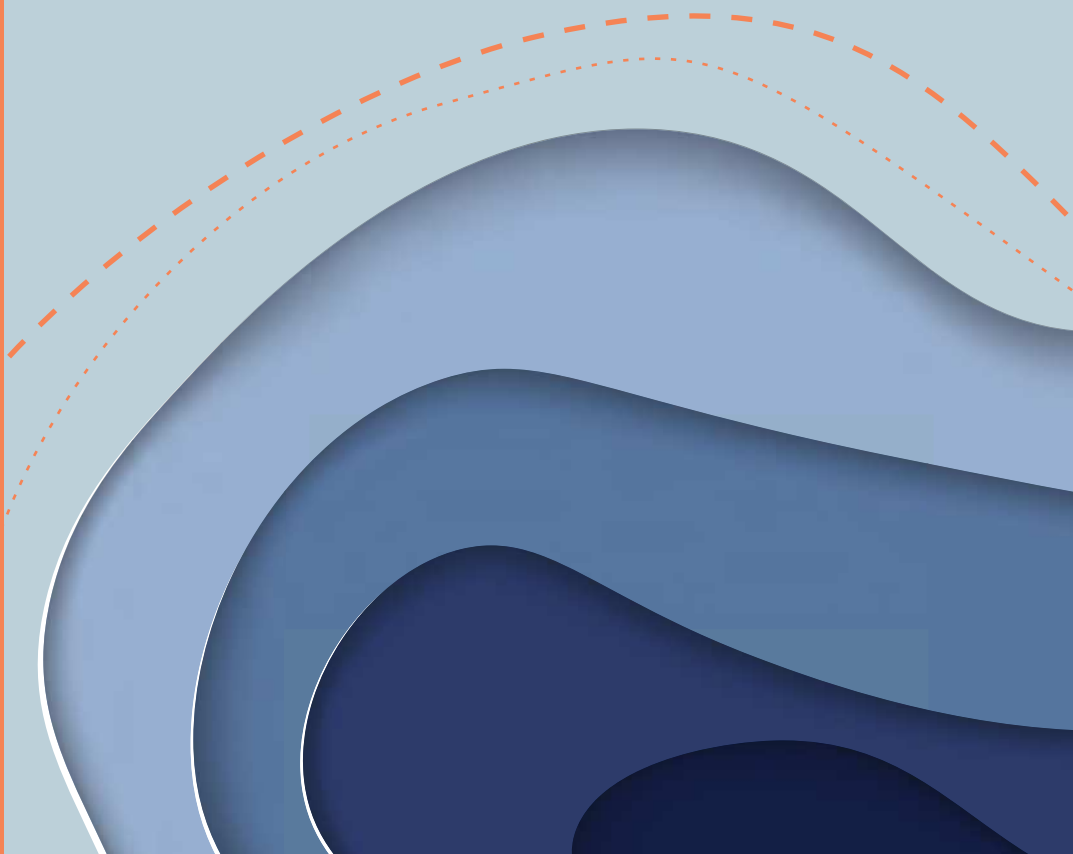


Зацева С.Н., Ивченко А.А.,
Солбаков В.В., Становой В.В.

Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ Н.Н. ЗУБОВА (ФГБУ «ГОИН»)

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ (ФГБУ «АНИИ»)

Зацева С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В.

**Прогнозирование
распространения нефти и нефтепродуктов
в случае аварийного разлива
на морских акваториях**

(научно-методическое пособие)

Москва, 2018

Рецензенты: профессор ИШ ДВФУ, д-р технических наук Блиновская Я.Ю.,
заведующая кафедрой РГГМУ, кандидат физико-математических наук Еремина Т.Р.

Зацепа С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В.

П78 Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях (научно-методическое пособие). – М.: АО «Финпол», 2018. – 140 с., формулы, ил.
ISBN 978-5-7637-0112-8

Знак информационной продукции **16+**

В научно-методическом пособии приведены сведения, необходимые для понимания физической картины эволюции нефтяных разливов в море после аварийного сброса в морскую среду. Эти сведения необходимы для учета основных факторов, определяющих физико-химическую трансформацию разлива нефти или нефтепродуктов на поверхности моря, в водной толще или в ледовых условиях. Прогнозирование распространения нефти в море представляет пример технологии оперативной океанографии и основано на последовательном применении численных моделей динамики атмосферы и океана, моделей ветрового волнения и ледовых условий, модели нефтяного разлива. Изменение состояния разлива нефти в морской среде зависит от разнообразных процессов, некоторые из которых определяются свойствами нефти, другие обусловлены гидрометеорологическими условиями. Наиболее распространенные расчетные соотношения для оценки изменения отдельных характеристик разлива приведены в пособии.

В пособии обсуждаются вопросы информационного обеспечения в связи с тем, что точность оценок характеристик разлива зависит от того, насколько адекватная информация об источнике сброса нефти и гидрометеорологических условиях в районе распространения разлива доступна прогнозисту. Также в пособии приводятся сведения о важных практических задачах, решение которых связано с моделированием разливов нефти до их возникновения для оценки риска воздействия разливов на морскую среду и побережья в районах разведки, добычи и транспортировки нефти и нефтепродуктов. В пособии кратко описаны наиболее распространенные модели нефтяных разливов, используемые в мировой практике, более подробно представлено описание моделей, разработанных в ГОИНе (SPILLMOD) и в ААНИИ (OilMARS).

Пособие предназначено для специалистов подразделений Росгидромета, Морспасслужбы Росморречфлота, МЧС РФ и других ведомств, в чью компетенцию входит предупреждение и ликвидация загрязнения морской среды нефтью и нефтепродуктами и оценка возможных угроз для окружающей среды в результате техногенных аварий на море.

Пособие содержит актуальные сведения о состоянии исследований по рассматриваемой проблеме и может представлять интерес для студентов и аспирантов, специализирующихся в области геофизики, океанологии и геоэкологии, техносферной безопасности.

ISBN 978-5-7637-0112-8

© Зацепа С.Н., Ивченко А.А.,
Солбаков В.В.,
Становой В.В., 2018.
© ФГБУ «ГОИН», 2018.
© ФГБУ «ААНИИ», 2018.
© АО «Финпол», 2018.

ISBN 978-5-7637-0112-8



9 785763 701128

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
ТЕРМИНЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	10
Термины, сокращения	10
Обозначения основных переменных	12
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАЦИИ НЕФТИ В МОРЕ	13
1.1. Основные процессы, определяющие поведение нефти в морской среде	13
1.1.1. Свойства нефти	13
1.1.2. Процессы трансформации	14
1.1.3. Подводный нефтегазовый выброс	19
2. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ НЕФТИ В МОРЕ	23
2.1. Параметризации основных процессов	23
2.1.1. Перенос нефти по поверхности моря	23
2.1.2. Площадь нефтяного пятна	24
2.1.3. Испарение нефти	26
2.1.4. Диспергирование	27
2.1.5. Образование эмульсии типа вода-в-нефти	28
2.1.6. Изменение плотности и вязкости	30
2.1.7. Внутриводное загрязнение	31
2.1.8. Формирование агрегатов	31
2.1.9. Растворение нефти	32
2.1.10. Взаимодействие с берегом	32
2.1.11. Взаимодействие со льдом	33
2.1.12. Подводный нефтегазовый выброс	35
2.1.12.1. Модель нефтегазового выброса	35
2.1.12.2. Оценка параметров распределения капель нефти по размерам	37
2.1.12.3. О подъеме отдельных капель нефтепродуктов	38
2.2. Постановка задачи и вычислительная технология в модели SPILLMOD	39
2.2.1. Модель распространения нефти на открытой воде	39
2.2.2. О моделировании распространения разливов нефти в дрейфующем льду	43
2.2.3. Особенности численной реализации в модели SPILLMOD	45
3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ В МОРЕ – ТЕХНОЛОГИЯ	47
3.1. Концепция	47
3.2. Модели нефтяного разлива в море	49
3.2.1. PADM	49
3.2.2. OSCAR	49
3.2.3. OILMAP	50
3.2.4. ADIOS2	50
3.2.5. MOHID	52
3.2.6. MEDSLIK-II	52
3.2.7. OilMARS	52
3.2.8. SPILLMOD	60

3.3. Технологическая линия прогнозирования	63
3.3.1. SPILLMOD (Россия)	63
3.3.2. SeaTrackWeb (Швеция)	65
3.3.3. ГеоЕСИМО (Россия)	67
4. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОГНОЗА	73
4.1. Информация об источнике аварии	73
4.1.1. Информация по данным МЧС, МСКЦ или РСЧС	73
4.1.2. Подготовка информации по результатам спутникового мониторинга	75
4.1.3. Форма информации об обнаруженных нефтяных пятнах на поверхности моря	78
4.1.4. Идентификация источников	79
4.1.5. Рекомендации по информационному обмену при ЧС	79
4.2. О прогнозе гидрометеорологических условий	81
5. ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ	83
5.1. Современное состояние исследований	83
5.2. Проблемы верификации метода прогноза распространения нефтяного разлива в море	87
5.3. Расчет наиболее вероятной траектории распространения разлива нефти	89
5.4. О ГИС-форматах и картографическом обеспечении	91
5.5. Оценка выноса нефти на берег	96
5.6. Системный подход к обеспечению прогнозирования разливов нефти в море	99
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
7. СПИСКИ ЛИТЕРАТУРЫ	102
7.1. Список основной литературы	102
7.2. Список дополнительной литературы	108
ПРИЛОЖЕНИЯ	110
Приложение 1. Примерная форма справки о прогнозе распространения в море аварийного разлива нефти и нефтепродуктов	110
Приложение 2. Инструкция по работе с ПО SPILLMOD	112
Приложение 3. Моделирование разливов нефти в море для решения прикладных задач ...	135

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Подготовка настоящего пособия вызвана необходимостью дать представление о современных возможностях математического моделирования в области прогнозирования распространения нефти в море. Формально, с математической точки зрения, можно сказать, что необходимо решить начально-краевую задачу об эволюции в конкретных гидрометеорологических условиях ограниченного объема нефти или нефтепродукта, движущегося по поверхности более плотного субстрата. При этом необходимо принять во внимание, что граница области распространения нефти сама является искомой величиной, а свойства растекающейся субстанции меняются за счет процессов выветривания. Решение этой задачи связано с преодолением целого ряда проблем, как в области математической физики и вычислительной математики, так и в области океанологии и смежных дисциплинах.

В данном пособии мы рассмотрим основные физические процессы, отвечающие за распространение нефтяного разлива в море, возможные математические формулировки задачи для описания этих процессов, их различные параметризации, в некоторых случаях – приближенные решения и оценки – полезные и оправданные с практической точки зрения.

Результаты прогнозирования распространения нефти в море представляют собой комплекс выходной продукции, неполный перечень которой включает расчеты последовательных конфигураций нефтяного загрязнения на поверхности моря, оценку загрязнения верхнего слоя океана, оценку изменений физико-химических свойств нефти или нефтепродуктов, вылитых в море, оценку загрязнения атмосферы парами легколетучих фракций нефти.

Время от времени авторы сталкиваются с вопросом: «Какая модель нефтяного разлива на сегодняшний день самая лучшая?» В пособии авторы постарались показать, что каждая из описанных моделей может дать полезные результаты. Выбор определяется задачей, которую необходимо решить, кроме того, каждой модели необходима настройка или адаптация под конкретные условия региона, в котором модель будет использоваться.

Успех прогнозирования распространения нефти в море определяется не только используемыми соотношениями для расчета характеристик разлива, но и возможностью использовать результаты метеорологического прогноза, прогноза морской динамики, включая расчеты морского ветрового волнения и характеристик ледяного покрова, поставляемые моделями, адаптированными и верифицированными для рассматриваемого региона.

С точки зрения авторов, важным является системный подход при реализации задачи о прогнозировании распространения нефти в море. Сведения о процессах трансформации нефти в морской среде и моделях для их расчета, о возможностях средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для обнаружения и определения характеристик нефтяного загрязнения в море, обсуждение проблем, связанных с информационным обеспечением прогноза и интерпретацией его результатов, представляются одинаково важными для успешного решения задачи. В пособии в качестве примера приведена инструкция по использованию модели SPILLMOD как демонстрация необходимости разработки дружественного интерфейса для

использования модели специалистом по прогнозированию. Некоторые из затронутых в пособии вопросов, такие как, например, разработка регламента информационного обмена при чрезвычайных ситуациях, связанных со сбросом нефти или нефтепродуктов в морскую среду для отдельных субъектов морской деятельности или административных территориальных единиц, выходят за рамки компетенции авторов, однако наличие такого регламента представляется необходимым.

В рамках настоящего пособия невозможно подробно изложить все необходимые для построения успешного прогноза вопросы. Более полные сведения читатель сможет получить воспользовавшись многочисленными ссылками на научные публикации, приведенные в пособии.

В фокусе нашего внимания в пособии находятся разливы нефти в море, возникающие в результате чрезвычайных ситуаций при разведке, добыче или транспортировке нефти. Несмотря на то, что крупные аварийные разливы нефти в море составляют всего лишь несколько процентов от общего объема нефтяного загрязнения морской среды, последствия от их воздействия на уязвимые объекты на акваториях и побережьях оказываются весьма значительными.

Данное пособие подготовлено как результат совместной деятельности группы специалистов Государственного океанографического института имени Зубова Н.Н. (ГОИН) и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИ).

Авторы считают необходимым отметить большую роль заведующего лабораторией ГОИНа, к.ф.-м.н. С.Н. Овсиенко, много лет посвятившего исследованиям в области моделирования распространения нефти в море, созданию и модернизации математических моделей динамики морского льда и другим задачам в области прикладной океанологии. Выполнение многочисленных прикладных задач было бы невозможно без сотрудничества с коллегами из Института океанологии и Института вычислительной математики РАН, со специалистами Центрального научно-исследовательского института морского флота (АО ЦНИИМФ) и научно-методического центра «Информатика риска» (НМЦ «Информатика риска»), без помощи коллег, осуществляющих выпуски региональных гидрометеорологических прогнозов и проводящих реанализ гидрологических параметров морской среды по данным метеорологического реанализа. Существенное развитие направление получило в рамках и в результате реализации Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). Авторы благодарят за всестороннюю поддержку и взаимодействие при разработке расчетно-модельных комплексов экспресс-анализа разливов нефти команду специалистов ВНИИГМИ-МЦД и прежде всего Белова С.В. и Михайлова Н.Н., и ИППИРАН – д.т.н. Гитиса В.Г., к.т.н. Вайнштока А.П., к.т.н. Дерендяева А.Б. Реализация этого проекта всегда была в фокусе внимания коллег из Управления мониторинга загрязнения окружающей среды, полярных и морских работ (УМЗА) Росгидромета.

Отдельной благодарности заслуживают наши коллеги из Северного УГМС и Дагестанского ЦГМС-Р – филиала Северо-Кавказского УГМС, чьи инициативы привели к созданию первых технологических линий для прогнозирования распространения аварийных разливов нефти на Белом, Баренцевом и Каспийском морях, а также коллеги из Гидрометцентра России, создавшие оперативные

технологии региональных прогнозов приводного ветра, уровня, течений и волнения на морях России, продукция которых размещается на ресурсах ЕСИМО.

Авторы благодарят д.г.н. профессора Грузинова В.М. (ГОИН), по инициативе и при поддержке которого было подготовлено это пособие.

Обсуждение вопросов, рассмотренных в Пособии, с коллегами из профессионального сообщества позволили на этапе подготовки Пособия избежать значительного количества возможных неточностей изложения. Всем им и прежде всего д.т.н. Блиновской Я.Ю. (Инженерная школа ДВФУ), д.ф.-м.н. Дианскому Н.А. (ИВМ РАН), к.т.н. Журавелю В.И. (НМЦ «Информатика риска»), д.ф.-м.н. Коротенко К.А. и д.ф.-м.н. Костяному А.Г.(ИО РАН), д.г.н. Нестерову Е.С., д.ф.-м.н. Зеленько А.А. (Гидрометцентр России), к.ф.-м.н. Ереминой Т.Р. (РГГМУ), к.х.н. Семанову Г.Н. (АО ЦНИИМФ), к.т.н. Соколову О.В. (ДВНИГМИ), д.б.н. Шавыкину А.А. (ММБИ РАН), прочитавшим первую редакцию Пособия и высказавшим полезные замечания по его содержанию и оформлению, авторы выражают признательность и надеются на дальнейшее сотрудничество.

ВВЕДЕНИЕ

Принятие эффективных управленческих решений, направленных на минимизацию негативных последствий аварийной ситуации, связанной с аварийным сбросом нефти или нефтепродуктов в морскую среду, возможно при наличии прогноза распространения разлива нефти. На основании прогноза поведения нефтяного пятна¹, а также изменения его физико-химических характеристик, выбираются стратегии борьбы с разливом для защиты в первую очередь приоритетных объектов.

Задача прогнозирования распространения нефти в море имеет особенности при необходимости оценки выбросов из подводных источников или при распространении нефти в ледовых условиях. Эти вопросы заслуживают отдельного рассмотрения, в целом, выходящего за рамки данного пособия. Тем не менее необходимые сведения о феноменологии распространения нефти от источников на морском дне и при наличии ледового покрова также представлены в пособии.

Прогнозирование распространения разливов нефти и нефтепродуктов в морской среде может применяться до возникновения аварийной ситуации на море для расчета риска и оценки воздействия разливов на уязвимые объекты на акватории и побережье. Прогнозирование необходимо и после проведения операций по ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН), как средство целеуказания для мониторинга загрязнения окружающей среды.

Прогнозирование распространения нефти в море осуществляется с помощью комплекса математических моделей, для которых разработаны соответствующие вычислительные технологии, реализованные в виде специализированного программного обеспечения. Математические модели, как правило, представляют собой системы уравнений термогидродинамики для нескольких сред – атмосферы, моря, слоя нефти на водной поверхности. В современных условиях для прогноза, как правило, используют программное обеспечение, созданное на основе математических моделей физических процессов для решения конкретных задач. В задачу специалиста по прогнозированию входит подготовка исходных данных по факту аварии на море, связанной с разливом нефти или нефтепродуктов, и подготовка отчета о проведении расчетов с описанием полученных результатов.

Авторы пособия считают необходимым, чтобы специалисты по прогнозированию распространения нефти в море, которым адресован настоящий документ, представляли себе проблему в целом. С этой целью в первой главе пособия приводятся сведения об эволюции нефтяного разлива в море. Здесь же у читателя должно сложиться понимание комплексного характера взаимодействия между отдельными процессами трансформации нефти в морской среде, понимание того, что (1) процессы трансформации существенным образом зависят от свойств разлитой на поверхность моря субстанции и (2) от складывающихся гидрометеорологических условий.

Во второй главе приведены многочисленные соотношения для расчета изменений характеристик разлива нефти со временем. В пособии приведены наиболее распространенные параметризации для оценки, например, переноса нефтяного пятна

¹ Термин «пятно нефти» (или нефтепродуктов) здесь и далее в пособии используется как определение области нефтяного загрязнения на поверхности моря.

по поверхности моря или процесса испарения в атмосферу легколетучих фракций из нефтяного пятна.

Третья глава пособия знакомит читателя с концепцией современного прогнозирования распространения аварийных разливов нефти в море. Прогнозирование представляется как технология, задача которой обеспечить прогнозиста, во-первых, результатами гидрометеорологического прогноза приводного ветра и морских течений, во-вторых, средствами для расчета взаимосвязанных процессов трансформации нефти в море, и в-третьих, создать среду, в которой будут представлены результаты прогноза распространения нефти. Последнее необходимо для принятия управленческих решений на основе информации о том, есть или нет при распространении разлива угроза уязвимым ресурсам на акватории или побережьях и есть ли ограничения на проведение операций ЛАРН по гидрометеорологическим условиям.

Четвертая глава посвящена информационному обеспечению и исходным данным для составления прогноза. Отмечена необходимость до возникновения аварийной ситуации продумать в деталях регламент и механизм обмена информацией между заказчиком прогноза и осуществляющим прогнозирование подразделением, для того чтобы обеспечить бесперебойное функционирование системы прогноза распространения нефти в оперативном режиме. Учитывая, что в условиях чрезвычайной ситуации (ЧС) нередки случаи, когда информация об инциденте бывает неполной, даются рекомендации, как действовать прогнозисту, чтобы составить прогноз распространения нефти, ориентируясь на имеющиеся нормативные документы.

В пятой главе пособия рассматривается ряд вопросов, от решения которых зависит корректность интерпретации результатов прогноза. В главе обсуждаются проблемы описания физической картины растекания нефти по поверхности моря и связанные с этим трудности постановки и решения математической задачи. Приведена методика оценки зоны вероятного обнаружения нефти, обусловленная погрешностью используемого гидрометеорологического прогноза, обращается внимание на важность использования адекватного задачам прогноза картографического обеспечения. Кратко обсуждается вопрос о системном подходе к обеспечению прогнозирования распространения разлива после аварийного сброса в морскую среду, который позволяет повысить надежность и оперативность получения результатов.

В пособии использованы примеры расчетов распространения аварийных разливов нефти, выполнявшиеся авторами. В большинстве примеров, приведенных в целях демонстрации выходной продукции моделирования, было использовано программное обеспечение (ПО) SPILLMOD. Описание программного интерфейса и функциональных особенностей разработанного ПО SPILLMOD приведено в Приложении 2 к основному тексту пособия. В Приложении 3 пособия приведены сведения об особенностях использования моделирования распространения нефти в море для решения прикладных задач, ориентированных на планирование мер защиты морской среды и побережий от возможных негативных последствий нефтяного загрязнения.

ТЕРМИНЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Термины, сокращения

24/7	обеспечение прогноза 24 часа в сутки 7 дней в неделю
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar – радиолокатор с синтезированной апертурой
OilMARS	(Oil Spill Model for the Arctic Seas) – название модели и программного обеспечения для расчета распространения нефтяных загрязнений в арктических ледовитых морях, созданной в ФГБУ «ААНИИ»
SPILLMOD	(Spill Modelling) название модели нефтяного разлива и соответствующего ПО, разработанных в ФГБУ «ГОИН»
АПС	аппаратно-программные средства
АРМ	автоматизированное рабочее место
АСООИ	автоматизированная система обработки оперативной информации в Гидрометцентре России
АСЭВ	анализ совокупной экологической выгоды
BCV (UTM)	всемирное скоординированное время (бывший Гринвич)
ГИС	геоинформационная система
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли из космоса
ЕСИМО	Единая система информации об обстановке в Мировом океане
ИК	инфракрасный диапазон спектра излучения
ИМО	международная морская организация (International Maritime Organization)
ИО РАН	Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук
ИППИ РАН	Институт проблем передачи информации им. Харкевича Российской академии наук
ЛАРН	операции по локализации и ликвидации аварийного разлива нефти, действия по возможно большему удалению нефти, находящейся на поверхности моря в результате разлива
ЛКМ	левая клавиша мыши
МСКЦ	морской спасательный координационный центр
МЧС	Министерство по чрезвычайным ситуациям
НИУ	научно-исследовательские учреждения
НЦУКС	национальный центр по управлению в кризисных ситуациях
ОВО	область вероятного обнаружения нефтяного разлива
ОВОС	оценка воздействия на окружающую среду
ООПТ	особо охраняемые природные территории

ПАВ	поверхностно-активные вещества
ПЛАРН	План предупреждения и ликвидации аварийных разливов нефти
ПК	программный комплекс
ПКМ	правая клавиша мыши
ПО	программное обеспечение
РЛИ	радиолокационное изображение
РМК	расчетно-модельный комплекс
Росгидромет	Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
РСЧС	Российская единая система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций
СВЧ	диапазон электромагнитного излучения в пределах длин волн 1–100 см
ТЛ SPILLMOD	технологическая линия для прогнозирования распространения аварийных разливов нефти в море на базе модели SPILLMOD
УГМС	Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
УФ	ультрафиолетовый диапазон спектра излучения
ФГБУ	федеральное государственное бюджетное учреждение
ФГБУ «ААНИИ»	Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»	Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных
ФГБУ «Гидрометцентр России»	Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
ФГБУ «ГОИН»	Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова
ФГБУ «ДВНИГМИ»	Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
ЧС	чрезвычайная ситуация
ЭКО ЕСИМО	электронная картографическая основа ЕСИМО

Обозначения основных переменных

Обозначение	Комментарий
Нижние индексы	
o, oil	нефть
w	вода
a	атмосфера
ice	лед
Основные переменные	
μ	динамическая вязкость
ν	кинематическая вязкость
ρ	плотность
γ	$(\rho_w - \rho_{oil})/\rho_w$
τ	тангенциальное напряжение трения
σ	межфазное натяжение
$\sigma = \sigma_{ow} - \sigma_{oa} - \sigma_{ow}$	коэффициент растекания (по Харкинсу)
$A(t)$	площадь нефтяного пятна
C	концентрация нефтеуглеводородов
C_{ice}	сплоченность ледяного покрова
d	диаметр капли
g	ускорение силы тяжести
$g' = \gamma g$	редуцированное ускорение силы тяжести
$h(t)$	толщина нефтяного пятна на поверхности
H_b	глубина моря
M	масса нефти
Q	поток нефтеуглеводородов
$R(t)$	радиус нефтяного пятна
T	температура
T_w	температура поверхности моря
t	время
Δt	шаг по времени
U	вектор скорости переноса
$V, V(t)$	объем нефти
V_0	начальный (постоянный) объем нефти в разливе
W_{10}	скорость ветра на стандартном горизонте 10 метров
u, v, w	компоненты скорости по осям x, y, z , соответственно
w_c	собственная вертикальная скорость капли, частицы

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАЦИИ НЕФТИ В МОРЕ

1.1. Основные процессы, определяющие поведение нефти в морской среде

1.1.1. Свойства нефти

Нефть – природная маслянистая горючая жидкость от почти бесцветного и светло-коричневого до темно-бурого и практически черного цвета. Средняя молекулярная масса 220–400 г/моль. Плотность нефти составляет 0,65–1,05 г/см³, но чаще 0,82–0,95 г/см³. Нефть, плотность которой ниже 0,84 г/см³, называется легкой, от 0,84 г/см³ до 0,88 г/см³ – средней, от 0,88 г/см³ до 0,92 г/см³ – тяжелой и выше 0,92 г/см³ – очень тяжелой [Патин, 2008]. Принципиальным для понимания проблемы трансформации нефтяного разлива в морской среде является то, что нефть или нефтепродукты состоят из сложной смеси углеводородов различной молекулярной массы и некоторых других химических соединений.

Нефть и нефтепродукты характеризуются температурой начала кипения жидких углеводородов (обычно >28 °С, реже ≥100 °С в случае тяжелых сортов нефти) и фракционным составом. Температура кристаллизации изменяется в пределах от –60 до +30 °С для разных сортов нефти и зависит преимущественно от содержания парафинов (чем больше, тем температура кристаллизации выше) и легких фракций (чем их больше, тем эта температура ниже). Кинематическая вязкость нефти при нормальных условиях изменяется в широких пределах от 1 до 300 мм²/с (сСт) для различных типов нефти и определяется фракционным составом и температурой, а также содержанием смолисто-асфальтеновых веществ. Нефть растворима в органических растворителях, в обычных условиях плохо растворима в воде, но может образовывать с ней стойкие эмульсии. Для многих практических задач, включая и расчеты испарения нефти с поверхности воды, удобно использовать представление нефти в виде псевдо-компонент, отличающихся температурой кипения.

Плотность нефти или нефтепродукта определяет ее плавучесть, влияет на процессы растекания и на естественную дисперсию. Как правило, нефти с низкой плотностью обладают малой вязкостью, и в них содержится большое количество летучих компонентов, которые быстро испаряются при попадании нефти на поверхность воды.

Нефть с высокой вязкостью растекается медленнее, чем нефть маловязкая, обладающая высокой подвижностью. Вязкость нефти значительно увеличивается при низкой температуре воды и воздуха, что определяет специфику трансформации разлива в зимних условиях.

Температурой застывания нефти считается температура, ниже которой нефть становится полутвердой и теряет текучесть. Застывание происходит в результате образования внутренних микрокристаллических структур.

Температура вспышки – минимальная температура, при которой над поверхностью разлитой нефти образуются пары в достаточном количестве для создания воспламеняющейся смеси. Многие сорта свежеразлитой нефти могут легко воспламеняться, пока не испарились и не рассеялись в атмосфере наиболее летучие фракции.

1.1.2. Процессы трансформации

Независимо от расположения источника аварийного сброса в морскую водную среду (разлив на поверхности моря, подповерхностный или глубоководный), нефть или нефтепродукт находятся в море в виде пятна на поверхности и взвешенных в водной толще капель. Между поверхностной и взвешенной в верхнем слое моря нефтью происходит непрерывный массообмен. Пятно на поверхности воды подвержено, с одной стороны, переносу под действием течений и ветра и, с другой стороны, множеству процессов физико-химической трансформации. Подробные обзоры этих процессов рассмотрены в трудах по нефтяному загрязнению морей [например, Патин, 2008; Техника и технологии, 2008; Oil spill science, 2011].

Одним из самых важных процессов является гравитационное растекание нефти на поверхности моря. Благодаря растеканию пленка нефтяного загрязнения может покрывать десятки и сотни квадратных километров морской поверхности.

Выветривание или «старение» нефти на поверхности моря – изменение физико-химических свойств и фракционного состава вызывают несколько процессов – испарение и растворение легких фракций, проникновение капель нефти в воду и обратный процесс, формирование эмульсии типа вода-в-нефти.

Кроме того, в морской среде происходит сорбирование нефти твердыми частицами, образование агрегатов и их последующее осаждение на дно, взаимодействие с береговой линией и/или со льдом, фотохимические реакции и биodeградация. Последние два процесса могут изменять физико-химические свойства и уменьшать количество нефти в морской среде на длительных временных масштабах.

Измерения уровня загрязнения нефтяными углеводородами Балтийского моря и Финского залива, проведенные в 1980-е годы, показали, что на поверхности моря в виде пленки содержится только 3,6% загрязнения, 15% загрязнения содержится в донных осадках и около 80% загрязнения содержится в воде в виде эмульсий, коллоидных растворов, взвесей и др. [Нестерова и др., 1986].

Основной причиной загрязнения нефтью водной толщи является диспергирование пленки нефти при обрушении ветровых волн, в результате чего возникает шлейф загрязнения в виде капель нефти в верхнем слое моря с возможной последующей адсорбцией капель нефти на взвешенных минеральных частицах.

Трансформация и перенос нефтяного разлива в воде происходят в результате целого набора сложных, взаимосвязанных физико-химических процессов, протекание которых зависит от свойств нефти и гидрометеорологических условий. На рисунке 1.1 показаны основные процессы (1–14), определяющие эволюцию нефтяного разлива после попадания в море, перечислены состояния нефтяного загрязнения (I–IX) и указаны различные среды ($a - i$), в которых происходит физико-химическая трансформация нефти. Прежде чем дать пояснения упомянутым на рисунке 1.1 процессам трансформации нефтяного разлива, заметим, что нефть в морской среде после аварийного сброса может присутствовать в различных состояниях: I – захваченная льдами нефть; II – нефть в виде линз подо льдом; III – нефть в солевых каналах; IV – нефть в виде линз внутри снежного покрова; V – капли нефти, инкапсулированные в лед; VI – нефть, скопившаяся в ледяной каше; VII – нефть, диспергированная в водной толще; VIII – нефтяная эмульсия; IX – нефть в пленочной форме на поверхности моря.

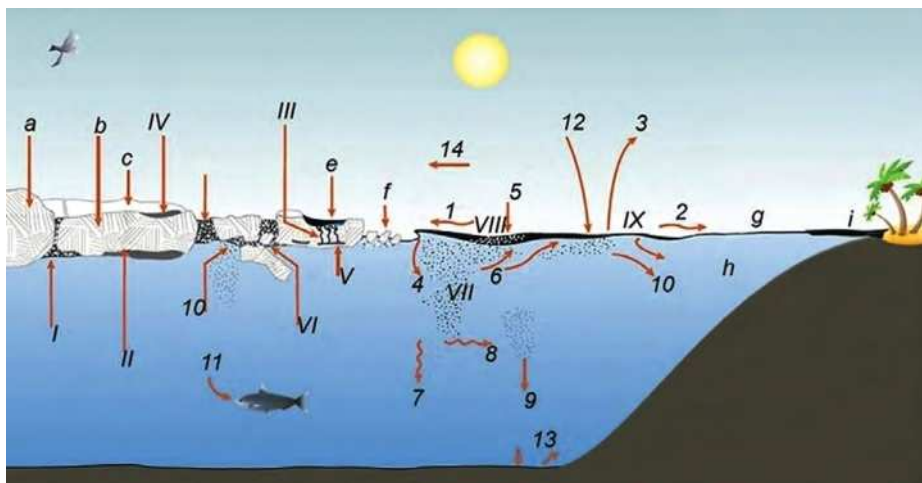


Рис. 1.1. Совокупность состояний нефтяного разлива в морской среде и основных процессов трансформации в различных средах

Морская среда весьма разнообразна и нефтяной разлив может трансформироваться в различных условиях, среди: *a* – многолетних льдов; *b* – однолетних льдов; *c* – в снегу; *d* – в разводах между льдин; *e* – в проталинах при весеннем таянии; *f* – в дрейфующем льду; *g* – на поверхности моря; *h* – в водной толще; *i* – в береговой зоне. Взаимодействие с берегом происходит за счет переноса нефти в направлении берега поверхностными течениями, выноса пленки нефти волнами и осаждение на элементах берегового ландшафта (пляжи, камни, марши и пр.).

В зависимости от состояния разлива нефти и условий, в которых происходит физико-химическая трансформация разлива, различные процессы могут рассматриваться как основные. Ниже даны краткие определения и пояснения упомянутых на рисунке процессов, от которых зависит судьба нефтяного разлива в море.

1. Перенос/адвекция – перемещение нефти по поверхности водного объекта под действием ветра, волн и течений.
2. Растекание – увеличение площади нефти на водной поверхности за счет положительной плавучести, поверхностного натяжения и турбулентной диффузии.
3. Испарение – физико-химический процесс, приводящий к массопереносу углеводородов с водной поверхности в атмосферу. Это основной процесс, связанный с атмосферой, в результате которого все легколетучие фракции нефти удаляются из нефтяного пятна в течение первых нескольких часов/суток после разлива нефти. Другая важная роль процесса испарения заключается в изменении физических и химических свойств оставшейся на поверхности моря нефти, в частности, ее плотности, вязкости и межфазного натяжения.
4. Проникновение нефти в водную толщу/диспергирование – перенос нефти из пленочной фазы с поверхности в водную толщу, вызванный обрушением волн, образование эмульсии типа нефть-в-воде. Диспергирование представляет собой физический процесс, при котором вследствие обрушения

гребней ветровых волн пленка нефти дробится на мелкие капли, некоторые из которых (самые крупные) всплывают обратно к поверхности, а мелкие распространяются процессами турбулентной диффузии в толщу воды. Диспергированная нефть подвергается растворению и биодеструкции.

5. Эмульсификация – физико-химический процесс формирования эмульсии типа вода-в-нефти, в результате чего она приобретает коричневый оттенок, поэтому иногда именуется «шоколадный мусс». Изучение эмульсий вода-в-нефти показало, что в зависимости от содержания в нефти смол и асфальтенов эмульсии могут быть трех категорий: устойчивые, среднеустойчивые (время существования – несколько дней) и неустойчивые (время существования – несколько часов). Образование эмульсий приводит к существенным изменениям свойств и характеристик нефти. Вода проникает в нефтяную фазу вследствие разрушения или деформации поверхности раздела вода – нефть.
6. Всплытие крупных капель нефти за счет положительной плавучести.
7. Вертикальная турбулентная диффузия.
8. Горизонтальная диффузия и перенос течениями.
9. Поглощение взвешенных минеральных частиц. При адсорбции капель нефти образуются агрегаты нефть-ил с соответствующим увеличением плотности. В результате осаждения на дне водного объекта образуются отложения адсорбированных нефтяных осадков. Количество образующихся агрегатов находится в прямой зависимости от концентрации взвешенных частиц в поверхностном слое моря. Наибольшая концентрация взвешенных частиц наблюдается в устьевых областях рек. Также высокая концентрация взвешенных частиц наблюдается в прибрежных зонах при эрозии берегов и в портовых районах при дноуглубительных работах.
10. Растворение – физико-химический процесс, в результате которого часть массы нефти (растворимых в воде фракций углеводородов) из пленочной или капельной фазы переходит в водную толщу. Этот массоперенос, происходящий вследствие молекулярной диффузии, протекает медленнее по сравнению с испарением. Однако именно растворенные в воде компоненты из нефтяного разлива оказывают токсическое воздействие на морские организмы.
11. Усвоение биотой (биodeградация) – это биохимический процесс, изменяющий или разлагающий углеводороды нефти благодаря жизнедеятельности микроорганизмов, который приводит к уменьшению массы нефти в водной толще. В южных морях (при температуре воды 20–25 °C) процесс биodeградации протекает намного интенсивнее по сравнению с северными холодными [Израэль и Цыбань, 1989; Измайлов, 1988].
12. Фотоокисление – трансформация нефтяных углеводородов под действием солнечного света в соединения с большей химической активностью и биологической доступностью. В результате фотоокисления увеличивается доля водорастворимых компонентов. Фотоокисление может быть важным при трансформации нефти в высоких широтах в условиях полярного дня [Измайлов, 1988]. Под воздействием солнечного света ароматические соединения в нефти окисляются до смол и в конечном итоге до асфальтенов.

13. Донное загрязнение.

14. Атмосферный перенос – перенос испарившихся нефтепродуктов в атмосфере.

Говоря о трансформации нефтяного пятна на поверхности моря, следует упомянуть также о том, что по мере уменьшения толщины слоя нефти существует тенденция разделения пятна на отдельные полосы вследствие действия волн или циркуляции Ленгмюра, которая представляет собой наблюдаемые в верхнем слое океана в широком диапазоне гидрометеорологических условий когерентные вихревые структуры с горизонтальными осями, параллельными направлению приводного ветра [Craik, Leibovich, 1976]. Расстояние между соседними полосами конвергенции или поперечный размер циркуляционных ячеек изменяются в широких пределах: от нескольких метров до сотен метров.

Хотя за последние 35–40 лет было выполнено большое количество лабораторных и натурных экспериментов по исследованию взаимодействия между нефтью и ледяным покровом [Clark and Finley, 1982; Bobra and Fingas, 1986; Измайлов, 1988; Fingas and Hollebone, 2003; Drozdowski et al., 2011], описание поведения нефти во льдах остается слабо изученной областью, во многом из-за огромного разнообразия характеристик ледового покрова в море на масштабах десятков и сотен метров, соответствующих распространению разливов в сплоченном льду. Качественное представление о сегодняшнем уровне знаний в отношении трансформации нефти во льдах можно получить из работы [Журавель, 2015].

При растекании нефти в разводах загрязнения льда практически не происходит, так как боковая инфильтрация в лед незначительна. Но при сжатии и торошении льда нефть может как заплескиваться на поверхность льда, так и уходить под ледяной покров.

Нефть, попавшая на верхнюю поверхность снежно-ледяного покрова в результате сжатия льда либо при сбросе нефти непосредственно на лед, растекается по поверхности, частично испаряется, частично впитывается в снежно-ледяной покров и переносится дрейфующим ледовым полем.

В условиях низких температур нефть будет более вязкой по сравнению со стандартными условиями. Если температура поверхности снежно-ледяного покрова оказывается ниже точки текучести нефтепродукта, то происходит только его перенос дрейфующим льдом без растекания и впитывания.

Под лед нефть попадает в результате сжатия льда, при сбросе нефти непосредственно под лед, при выходе загрязнения от подводного источника или вторичного загрязнения под лед. Этот вид загрязнения льда самый сложный для прогнозирования, поскольку оценить количество и положение нефти подо льдом методами дистанционного зондирования затруднительно.

Поведение нефти под ледяным покровом изучалось экспериментальным путем как в натурных условиях [Wadhams, 1976; Clark and Finley, 1982; Bobra and Fingas, 1986; Измайлов, 1988], так и с использованием специальных лабораторных установок [Wolfe and Hoults, 1974; Cox et al., 1980; Weerasuriya and Yapa, 1993; Yapa and Belaskas, 1993; Izumiyama et al., 20026].

Нефть, попавшая под лед, растекается и скапливается в полостях и карманах на нижней поверхности ледяного покрова, часть нефти может заполнять трещины и разводы. При этом процесс загрязнения льда зависит от шероховатости

и топографии его нижней поверхности. Чем больше впадин и углублений и чем они глубже, тем больше нефти может быть задержано льдом и тем меньше площадь растекания нефти.

Толщина нефтяного пятна под ровным льдом определяется соотношением сил плавучести и межфазного натяжения и в зависимости от свойств нефти может составлять от 5–7 мм (под ровным льдом) [Wadhams, 1976] до 3 см [Bobra and Fingas, 1986].

Процесс загрязнения льда зависит и от сезона, т.к. если разлив произошел в период нарастания льда, то растекшаяся подо льдом нефть может оказаться вмороженной (encapsulated) в лед. В таком состоянии нефть остается до начала таяния, перемещаясь вместе с льдиной [Wolfe and Hault, 1974; Clark and Finley, 1982; Bobra and Fingas, 1986].

Весной при таянии льда открываются солевые капилляры и поры (brine drainage channels), и нефть, находящаяся подо льдом или вмороженная в лед, начинает подниматься по этим капиллярам [Wadhams, 1976; Clark and Finley, 1982; Bobra and Fingas, 1986; Измайлов, 1988]. При выходе на верхнюю поверхность льда нефть растекается, способствуя таянию.

Скорость поднятия нефти, по данным экспериментов, может иметь величины от нескольких миллиметров до 50 см в сутки [Измайлов, 1988]. Максимальная скорость была зафиксирована в рыхлом многолетнем льду. Отмечается также различие скорости подъема у разных нефтепродуктов.

Пятна нефти на поверхности снежно-ледяного покрова изменяют альбедо поверхности льда (до 75% [Clark and Finley, 1982]). По этой причине весной под действием солнечной радиации может наблюдаться усиленное таяние льда и образование луж со смесью талой воды с нефтью. Эта смесь частично испаряется, а частично оказывается в воде после таяния льдины.

При выносе дрейфующего льда из района загрязнения нефть, находящаяся в порах и капиллярах, переносится вместе с ним, так же как и нефть, успевшая выйти на поверхность ледяного покрова, где подвергается фотоокислению и испарению.

В процессе эволюции нефти в морской среде относительная роль упомянутых процессов может меняться. Временные рамки доминирования того или иного процесса существенным образом зависят от масштабов сброса и типа нефти и нефтепродукта. Так, бензин или газовый конденсат может полностью исчезнуть с поверхности моря за счет процессов испарения фракций в течение первых часов после сброса, а мазут представляет собой нефтепродукт, в котором легколетучие фракции практически отсутствуют. Трансформация разлива мазута на поверхности моря будет зависеть от температуры верхнего слоя моря и точки текучести конкретного сорта мазута, а перенос комков мазута может происходить недели, месяцы и годы, если раньше не произойдет его вынос на берег или осаждение на дно.

В большинстве моделей и методов расчета распространения нефти в морской среде, прежде всего ориентированных на краткосрочное (для целей операций ЛАРН в пределах нескольких суток) прогнозирование, редко учитываются процессы растворения, фотоокисления и биологического разложения нефтяных углеводородов. Растворение нефтяных углеводородов в морской воде имеет существенное экологическое значение за счет их токсичности, но растворяются, в основном, лег-

кие фракции, которые испаряются в первую очередь, при этом скорость испарения гораздо выше, чем скорость растворения. По этой причине с точки зрения баланса нефти на поверхности моря растворение является менее значимым процессом удаления нефти с поверхности по сравнению с испарением или диспергированием, однако важным фактором токсикологического воздействия на биоту.

1.1.3. Подводный нефтегазовый выброс

Развитие подводного выброса нефтегазовой смеси может варьироваться в широких пределах в зависимости от характеристик источника выброса – глубины моря, расхода, скорости выхода и состава нефтегазовой смеси, и от гидрологических факторов – течений и плотностной стратификации морской воды.

Согласно современным представлениям [Fannelop and Sjoen, 1980; Yapa and Zheng, 1997; Johansen, 2000; Drozdowski et al., 2011], судьбу подводного выброса нефти определяет целый ряд процессов.

На первом этапе происходит выброс пластового продукта² в виде струи, содержащей нефть, газ и, возможно, сильноминерализованную воду. Плотность пластовых вод изменяется в диапазоне 1010–1210 кг/м³. Нефть в сильно турбулизированном потоке разбивается на капли диаметром от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Расширяющиеся пузырьки газа служат причиной быстрого подъема этого облака к поверхности. Вследствие вовлечения окружающей воды, радиус плавучей струи растет, а вертикальная скорость быстро падает от нескольких метров в секунду до величины порядка 0,2–0,5 м/с.

При достаточно большой глубине выброса, в результате контакта газа с водой в условиях высокого давления могут образовываться гидраты – клатратные соединения, внешним видом напоминающие снег или рыхлый лед [Бык, 1968]. В результате нефтегазовая смесь теряет газовую фракцию – основной источник плавучести. Газовые гидраты имеют относительно малую область термодинамической устойчивости и поэтому чрезвычайно чувствительны к изменениям условий равновесия, кинетика процесса образования подобных клатратных соединений в настоящее время изучена недостаточно. Образовавшиеся частицы газовых гидратов имеют плотность 920–960 кг/м³, их подъем к поверхности может происходить как в струе, так и за счет сил плавучести. При падении давления они теряют устойчивость и превращаются в газ, частично растворяющийся в морской воде. Фазовая диаграмма смеси газ – вода приведена на рисунке 1.2.

Обычно принимается, что гидраты образуются на глубинах выброса более 500–600 м, но при очень низких температурах воды (в арктических морях) гидраты могут образоваться при глубине 200–300 м.

Выше глубины потери импульса струи подъем капель нефти происходит под действием собственной плавучести, со скоростью, зависящей от размеров капель, образовавшихся в процессе первой фазы выброса и разности плотностей нефти и морской воды. Количество нефти, выходящей на поверхность моря, и размеры образовавшие-

² Смесь жидких и газообразных углеводородов, содержащаяся в нефтеносном пласте при характерных для него давлениях и температурах, в зависимости от которых она может представлять собой либо однофазную жидкость, либо распадаться на жидкую и газовую фазы.

гося пятна определяются гидрологическими характеристиками, прежде всего плотностной стратификацией морской воды в районе выброса и распределением капель нефти по размерам.

Газ часто сопровождает нефть в подводном выбросе. При этом возможны 3 режима: (1) когда газ присутствует в виде пузырьков в непрерывной жидкой фазе, (2) медленный поток, в котором жидкая и газовая фазы сменяют последовательно друг друга, (3) поток распыленной жидкости в газе. Категория, к которой следует отнести реальный поток, зависит от соотношения жидкой и газовой фаз, или газового фактора, а также скорости потока и параметров жидкости.

Выходящий из устья скважины поток пластового продукта, содержащего сырую нефть и растворенный газ, трансформируется в дисперсную систему из капель нефти и пузырьков газа в морской воде. Распределение капель нефти по размерам определяется скоростью истечения пластового продукта из скважины, межфазным натяжением на границе нефть – вода, вязкостью нефти и морской воды, в некоторой степени, размером выходного отверстия скважины, и газовым фактором *GOR* (Gas-Oil_Relation).

Расширяющиеся пузырьки газа служат основной причиной быстрого подъема этого облака к поверхности. В зависимости от газового фактора смеси и стратификации морской среды, подобный «лифт» может обеспечивать подъем капель нефти на десятки и сотни метров над уровнем дна.

Подводные выбросы газоконденсата или нефти с высоким газовым фактором, как правило, характеризуются более высокой по сравнению с выбросом нефти скоростью выхода струи и более протяженным участком со струйным характером течения, в котором можно пренебречь выталкивающей силой по сравнению с начальным импульсом. Весь поток можно разделить на три качественно различных области (см. рисунок 1.3) [Котеров и др., 2007], а именно на начальный участок, участок однородно перемешанной газожидкостной струи (иногда называемый «кипящим сломом») и наиболее протяженную область – «пузырьковый факел» (в англоязычной лите-

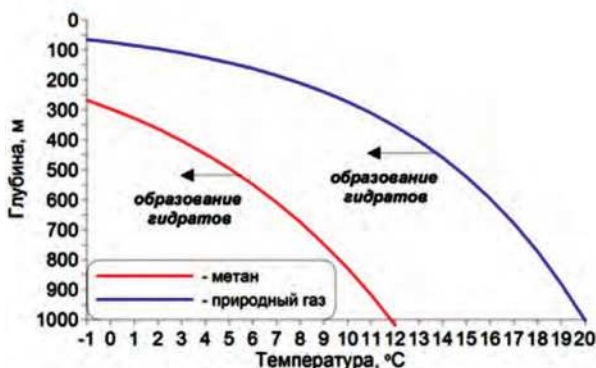


Рис. 1.2. Диаграмма равновесия для гидратов в морской воде

ратуре называемую «Bubble plume») или «пузырьковая колонна» («Bubble column»). В отечественной литературе иногда встречается выражение «пузырьковый шлейф».

Начальный участок струи характеризуется наличием газового ядра, в которое жидкость практически не проникает. Он отделяется от окружающей среды турбулентными слоями смешения, расширяющимися в направлении потока газа. Этот участок может иметь довольно сложную и плохо предсказуемую структуру. В конце начального участка скорость потока уменьшается, слои смешения проникают до центра струи, и, как правило, образуется область однородно перемешанной струи, которая характеризуется интенсивным перемешиванием фаз за счет мощных турбулентных пульсаций, постоянством статического давления поперек струи и малостью поперечных составляющих скорости потока. На данном участке обе фазы вещества в струе (жидкая и газовая) движутся с практически одинаковыми скоростями (скольжением фаз можно пренебречь). Если направление движения струи в конце начального участка имело горизонтальные составляющие, то струя под действием архимедовых сил может начать искривляться, отклоняясь к вертикали.

На участке однородно перемешанного двухфазного³ движения происходит интенсивное вовлечение окружающей жидкости в струю, а также могут иметь место заметные потери продольного импульса, обусловленные турбулентным перемешиванием жидкой и газовой фаз. В результате скорость движения вещества падает, и в некоторый момент однородно перемешанная струя преобразуется в «пузырьковый шлейф», поднимающийся вертикально вверх к поверхности лишь под действием архимедовых сил. Центральная часть участка «пузырькового шлейфа» содержит пузырьки газа различного размера. Характерный радиус области, в которой происходит вертикальное движение жидкости, при этом заметно (примерно в полтора раза) превышает характерный радиус двухфазной области («пузырькового ядра»), содержащей жидкую фазу и пузырьки газа.

Таким образом, рассматриваемая струя представляет собой двухфазное образование, поднимающееся к поверхности преимущественно под действием архимедовых



Рис. 1.3. Структура мощной газовой струи в воде

³ При нефтегазовом выбросе – трехфазное движение.

сил и вовлекающее в движение значительное количество окружающей жидкости. На поверхности жидкость растекается в радиальном направлении, а газовая фаза выделяется в атмосферу. Отметим, что реализующаяся на практике картина распространения газового выброса в водной среде существенным образом зависит от двух главных факторов: от глубины выброса и от начального (рассчитанного по условиям на дне акватории) объемного расхода газа в струе. Например, в том случае, когда мал объемный расход газа, начальный участок и область однородно перемешанной струи могут практически отсутствовать. Напротив, при малой глубине акватории и больших объемных расходах газа участок «пузырькового шлейфа» может не успевать образовываться. Последнюю ситуацию называют режимом «мелкой воды». На поверхности жидкости восходящий «пузырьковый шлейф» приводит к повышению уровня, и в месте выхода газа на поверхности воды должен наблюдаться более или менее интенсивный газоводяной «султан».

2. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ НЕФТИ В МОРЕ

2.1. Параметризации основных процессов

Приведенные в данном разделе соотношения для расчетов параметров состояния нефтяного разлива на поверхности моря, по мнению авторов, отражают современный уровень понимания основных процессов, определяющих эволюцию разлива, и широко используются разными коллективами специалистов во всем мире. Приведенные в этом разделе параметризации процессов физико-химической трансформации нефтяных разливов в море обосновывались теоретически и экспериментально. Однако на сегодняшний день решения задачи в полной постановке или хотя бы ее формулировки с учетом всех факторов, определяющих судьбу нефти в море, нет. Как следует из феноменологии распространения нефти в море, основные черты которой показаны в предыдущем разделе пособия, из многообразия форм присутствия нефти в морской среде, представленной в том числе границами раздела вода – воздух, вода – лед, вода – морское дно, вода – суша, вариабельности метеорологических и гидрологических условий следует, что в рамках одной модели эволюцию разлива нефти в море описать затруднительно. Тем не менее ниже мы приводим расчетные соотношения для оценок всех основных параметров состояния разлива нефти после сброса в морскую среду, а обсуждение проблем, решение которых позволит уточнить результаты расчетов, относим в раздел 5 пособия.

2.1.1. Перенос нефти по поверхности моря

Трансформация и перенос нефтяного разлива в воде происходит в результате комплекса взаимосвязанных физико-химических процессов, которые зависят от свойств нефти, гидродинамических параметров и условий окружающей среды. Математические модели отдельных процессов трансформации используются для расчета параметров нефтяного разлива, к которым относятся: положение и конфигурация нефтяного разлива в последовательные моменты времени, количество нефти на поверхности моря и концентрация нефтепродуктов в водной толще, вязкость, плотность нефтяного остатка на поверхности моря и некоторые другие.

Скорость переноса отдельных нефтяных пятен по поверхности моря U_a описывается в большинстве моделей соотношением типа [ASCE, 1996; Reed et al., 1999]:

$$U_a = U_{current} + U_{drift}(W_{10}) + U_{wave} + U_{dif}, \quad (2.1)$$

где $U_{current}$ – скорость течения, рассчитанная в модели течений, W_{10} – скорость ветра над нефтяным пятном на стандартном горизонте 10 метров, $U_{drift}(W_{10})$ – скорость дрейфового течения, рассчитанная параметрически, U_{wave} – скорость переноса пленки нефти за счет волн, U_{dif} – случайная добавка к скорости переноса, обусловленная процессами турбулентной диффузии⁴.

⁴ Пояснения к обозначениям основных переменных указываются при первом их появлении в тексте, дублируются в разделе «Обозначения основных переменных» и в случае использования эмпирических расчетных соотношений с оригинальными размерными величинами.

По данным измерений в открытом море и вдали от берегов скорость дрейфового течения находится в пределах от 2,5% до 4,4% от скорости ветра, среднее значение составляет 3–3,5% от скорости ветра. Направление дрейфа не совпадает с направлением ветра, в северном полушарии – поворот вправо, значение угла поворота лежит в пределах 0–25°, для умеренных скоростей ветра – 15° [Stolzenbach et al., 1977; Huang and Monastero, 1982]. Распространенной параметризацией для угла отклонения дрейфа α_{dev} нефтяного пятна от направления ветра является [Samuels et al., 1982]:

$$\alpha_{dev} = 25 \exp(-W_{10}^3 / 1184,75). \quad (2.2)$$

При скорости ветра больше 20 м/с угол отклонения принимается равным нулю.

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 воздействия, и чем лучше модели течений описывают динамику верхнего слоя моря, тем меньшее значение может иметь добавочный член $U_{drift}(W_{10})$. 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.

Перенос отдельного нефтяного пятна по поверхности моря может быть рассчитан шагами по времени, и положение пятна нефти в момент времени t_n после начала сброса определится из соотношения:

$$\mathbf{X}^n(t_n) = \mathbf{X}_0 + \Delta t \sum_{i=1}^n \mathbf{U}_a^i(\mathbf{X}^i, t_i), \quad (2.3)$$

где Δt – шаг интегрирования по времени, n – количество шагов, $\mathbf{X}_0$ – вектор начального положения пятна нефти (источника сброса), $\mathbf{U}_a^i(\mathbf{X}^i, t_i)$ – скорость адвекции нефтяного пятна на i -м шаге в точке $\mathbf{X}^i$ в момент времени $t_i = i\Delta t$ после начала разлива.

2.1.2. Площадь нефтяного пятна

Площадь отдельного нефтяного пятна часто рассчитывается с использованием полуэмпирических зависимостей, предложенных Фэем [Fay and Hout, 1971], или их модификаций [Mackay et al., 1980; ASCE, 1996; Reed et al., 1999]. Считается, что процесс растекания состоит из трех фаз: инерционная, гравитационно-вязкая и фаза поверхностного натяжения. В большинстве моделей при одномоментном или «залповом» сбросе пятно нефти представляется в виде круга с радиусом $R(t)$, рассчитанным по следующим соотношениям:

а) инерционная фаза:

$$R(t) = 1,14 \cdot (\gamma g V_0)^{1/4} t^{1/2}, \quad (2.4)$$

где $\gamma = \frac{\rho_w - \rho_{oil}}{\rho_w}$, ρ_w – плотность воды, ρ_{oil} – плотность нефти, V_0 – объем залпового

сброса нефти, g – ускорение свободного падения, t – время от начала сброса. Фаза

заканчивается при толщине пятна: $h_1 = \frac{V_0}{\pi R(t)^2} = (v_w t)^{1/2}$, где v_w – кинематическая вязкость воды.

b) гравитационно-вязкая фаза:

$$R(t) = 1,45 \cdot \left(\frac{\gamma g V_0^2}{v_w^{1/2}} \right)^{1/6} t^{1/4}. \quad (2.5)$$

Фаза заканчивается при толщине пятна: $h_2 = \frac{V_0}{\pi R(t)^2} = \left(\frac{\sigma}{\mathcal{P}_{oil} g} \right)^{1/2}$, где σ – суммарное поверхностное натяжение, иногда называемое коэффициентом Харкинаса, $\sigma = \sigma_{aw} - \sigma_{ow} - \sigma_{ao}$, где σ_{aw} – поверхностное натяжение на границе воздух – вода, σ_{ow} – поверхностное натяжение на границе нефть – вода, σ_{ao} – поверхностное натяжение на границе воздух – нефть.

c) фаза поверхностного натяжения:

$$R(t) = 2,30 \cdot \left(\frac{\sigma^2 t^3}{\rho_{oil}^2 v_w} \right)^{1/4}. \quad (2.6)$$

Фаза заканчивается при достижении максимального размера A_{max} площади пятна:

$$A_{max} = \pi R_{max}^2 = 10^5 \cdot V_0^{0,75}. \quad (2.7)$$

Соотношение (2.7) получено в предположении, что растекание прекращается, когда суммарное поверхностное натяжение поменяет знак из-за изменения межфазного натяжения на границах нефть – вода и нефть – воздух, связанного с растворением/испарением наиболее легколетучих и растворимых компонент, которые диффундировали из объема нефтяного пятна к его поверхности за счет молекулярной диффузии.

Соотношения (2.4) – (2.7) дают возможность оценить геометрические характеристики пятна нефти в предположении о мгновенном (i) попадании нефти на поверхность моря при отсутствии ветра и течений, не учитывают изменения массы нефти в результате выветривания (ii) и изменения физических свойств (iii) растекающегося нефтепродукта. Соотношения (2.4) – (2.7) имеют так называемый логарифмический порядок точности, позволяя оценить порядок рассматриваемых величин. Более подробно проблемы, связанные с оценками параметров разлива, будут обсуждаться в разделе 5.

Как правило, вместо соотношений (2.4) – (2.7) в моделях нефтяных разливов используется модифицированное соотношение (2.5) [Mackay et al., 1980]:

$$\frac{dA}{dt} = K_1 A(t)^{1/3} h(t)^{4/3}, \quad (2.8)$$

где $A(t)$ – площадь разлива нефти, $h(t)$ – средняя толщина нефтяного пятна, K_1 – эмпирический коэффициент. В некоторых моделях [Nihoul, 1984; Zatsepa et al., 1992; Овсиенко и др., 2005] для расчета растекания нефти по поверхности моря используется численное решение уравнений мелкой воды.

2.1.3. Испарение нефти

Расчет испарения из нефтяного пятна основывается на предположении, что нефть или нефтепродукт можно рассматривать как смесь нескольких, как правило, от 8 до 20, фракций или псевдокомпонентов с известными свойствами [Yang and Wang, 1977; Reed et al., 1999]. Поток массы нефти за счет испарения Q_e из пятна на поверхности моря представляется как:

$$Q_e = k_e \sum_i \frac{MW_i P_i X_i}{R_g T_{wK}} = \sum_i Q_i, \quad (2.9)$$

где k_e – эмпирический коэффициент, зависящий от скорости ветра, P_i – давление насыщенного пара i -й фракции нефти, MW_i – молекулярный вес фракции, X_i – молярная доля фракции, R_g – универсальная газовая постоянная, T_{wK} – температура подстилающей поверхности (температура воды) [°K], Q_i – поток массы i -й фракции нефти. Если молекулярный вес фракции неизвестен, то он рассчитывается, например, по формуле Воинова [Мановян, 2001]:

$$MW_i = 60 + 0,3T_{bi} + 0,001T_{bi}^2, \quad (2.10)$$

а давление насыщенного пара по формуле Ашфорта:

$$\lg P_i = 2,68 \left[1 - \frac{1250 / \left(\sqrt{T_{wK}^2 + 10800} - 307,6 \right) - 1}{1250 / \left(\sqrt{T_{bi}^2 + 10800} - 307,6 \right) - 1} \right], \quad (2.11)$$

где T_{bi} – температура кипения i -й фракции [°K].

Для эмпирического коэффициента может быть выбрана следующая параметризация [Yang and Wang, 1977]:

$$k_e = \begin{cases} 0,0018 \cdot W_{10}^{0,78} & W_{10} > 4 \text{ м/с} \\ 0,005 & W_{10} \leq 4 \text{ м/с} \end{cases}. \quad (2.12)$$

В процессе испарения меняется процентное соотношение между фракциями с различными температурами кипения. Как следствие, меняется плотность и вязкость нефти в пятне на поверхности моря.

Для величин (2.10) – (2.12) имеются альтернативные формулировки (см., например, [Ткалин, 1986]). Соотношение (2.9) служит для определения потока массы с единицы площади поверхности нефтяного пятна. Общий отток нефти из нефтяного пятна ΔM_e на временном шаге Δt за счет испарения оценивается как:

$$\Delta M_e = Q_e(t) \cdot A(t) \cdot \Delta t, \quad (2.13)$$

и зависит от корректного расчета площади пятна $A(t)$ на каждом шаге расчетов.

Сведения о других, менее популярных параметризациях процесса испарения, можно найти, например, в [Quiroga et al., 2002].

Полезным для практики способом оценивания является тот факт, что при свободном растекании нефти или нефтепродукта компоненты с температурой кипения

до 200 °С испаряются в течение 24 часов, в то время как фракции с температурами кипения от 200 до 270 °С могут оставаться на поверхности в течение нескольких дней. Потеря летучих и среднелетучих соединений увеличивает количество соединений с более высокой молекулярной массой, что сильно меняет химические и физические свойства остающейся нефти.

2.1.4. Диспергирование

При ветровом волнении нефть в виде капель может переходить в водную толщу и распространяться как внутримассовое загрязнение, в виде дисперсии, состоящей из капель различного размера. Процесс диспергирования поверхностного нефтяного пятна относится к одному из важнейших процессов трансформации разлива на поверхности моря, и его расчет представляет важную часть в процессе моделирования распространения нефти. До последнего времени наиболее распространенной моделью диспергирования была параметризация трансформации пятна нефти на поверхности в дисперсию нефти в водной толще, предложенная в работе [Delvigne and Sweeney, 1988; Delvigne and Hulsen, 1994; Reed et al., 1999].

В цитируемых работах основное расчетное соотношение представляется в виде:

$$Q_{disp} = C_{oil} D^{0,57} f_s F_{wc} d_o^{0,7} \delta d, \quad (2.14)$$

где Q_{disp} – поток нефти в воду в виде капель ($\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$), f_s – часть поверхности моря, покрытая нефтью, d_o – средний диаметр капель, δd – интервал диаметров d капель относительно d_o , C_{oil} – коэффициент, зависящий от свойств нефти и выбранных единиц измерения для сомножителей в (2.14), D – диссипация волновой энергии на единицу площади:

$$D = 0,0034 \cdot \rho_w g H_{rms}^2, \quad H_{rms} = H_{sw} / \sqrt{2}, \quad (2.15)$$

где H_{rms} – среднеквадратическая высота волн, H_{sw} – высота значительных волн.

F_{wc} – часть поверхности моря, покрытая «барашками» (whitecaps):

$$F_{wc} = 0,032 (W_{10} - W_s) / T_{wave}, \quad (2.16)$$

где W_s – скорость ветра, при которой начинается образование «барашков» (5 м/с), T_{wave} – период волн.

Считается, что нефть проникает в воду в виде капель с широким спектром размеров, но капли большого размера сразу же всплывают на поверхность. Пороговый размер капель, которые остаются в воде, оценивается в 70–150 мкм [Reed et al., 1999]. В работе [Delvigne and Sweeney, 1988] эксперименты проводились с тремя сортами нефти, в результате величина параметра C_{oil} оценивалась от 510 до 1800. В следующей работе [Delvigne and Hulsen, 1994] исследования были продолжены еще с двумя десятками разных типов нефти. Было отмечено, что коэффициент C_{oil} обратно пропорционален вязкости нефти [Reed et al., 1999]. Альтернативная параметризация для коэффициента C_{oil} была предложена в модели MOHID [Miranda et al., 2000]:

$$C_{oil} = -312,25 \cdot \ln(\nu_{oil}) + 2509,8. \quad (2.17)$$

В соотношении (2.17) кинематическая вязкость нефти определена в сантистоксах (cSt). При $C_{oil} \leq 0$ принимается, что $C_{oil} = 0$ и диспергирование нефти отсутствует.

В настоящее время по результатам целого ряда экспериментов, проведенных как в натурных условиях, так и в лаборатории, предложена новая феноменологическая модель процесса диспергирования и предложены новые параметризации составляющих его процессов [Зацепя и др., 2018а; Зацепя и др., 2018б]. Показано, что расчет проникновения капель нефти в водную толщу определяется тремя процессами – вовлечением капель в слой волнового перемешивания за счет обрушения волн, дроблением пленки нефти на капли в турбулентном потоке и турбулентной диффузией ансамбля капель диспергированной нефти с учетом их положительной плавучести. Выбор пригодной параметризации коэффициента вертикального турбулентного обмена следует производить с учетом региональных гидрологических условий.

2.1.5. Образование эмульсии типа вода-в-нефти

Для образования эмульсии вода-в-нефти необходим минимальный уровень энергии турбулентности. В работе [Fingas et al., 1999] по результатам лабораторных экспериментов минимальный уровень энергии был оценен как 0,05–0,24 Дж/м³. Турбулентная энергия рассчитывается по формуле [Xie et al., 2007]:

$$E = \rho_w e = 0,5 \rho V_e^2 = \sqrt{\rho_w \mu_T \varepsilon / C_\mu}, \quad (2.18)$$

где E – турбулентная энергия на единицу объема воды (Дж/м³); e – турбулентная энергия на единицу массы воды (Дж/кг); V_e – вихревая скорость (м/с); ε – скорость диссипации турбулентной энергии на единицу массы воды (м²/с³); μ_T – турбулентная вязкость (кг/м с); C_μ – константа ($\approx 0,09$).

$$\mu_T = 0,1825 \cdot 10^{-4} W_{10}^{5/2}, \quad (2.19)$$

где W_{10} [см/с], μ_T [г/см с].

В работе [Terray et al., 1996] была предложена шкала для оценки скорости диссипации турбулентной энергии в верхнем слое моря, основанная на параметрах ветра и волн. Считается, что скорость диссипации турбулентной энергии квазипостоянна в интервале глубин от поверхности моря до уровня z_b , где происходит «прямое инжектирование» энергии волн в толщу воды, далее до границы переходного слоя z_t , после которой диссипация энергии происходит по обычным законам теории пограничного слоя:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0,3 u_{*w}^2 \cdot \bar{c} \cdot H_{sw} / z_b^2, & 0 < z < z_b \\ 0,3 u_{*w}^2 \cdot \bar{c} \cdot H_{sw} / z^2, & z_b < z < z_t \\ u_{*w}^3 / (\kappa z), & z_t < z < H_b \end{cases}, \quad (2.20)$$

где $z_b = 0,6 H_{sw}$ (м), κ – постоянная Кармана, $\bar{c}$ – эффективная фазовая скорость (м/с), u_{*w} – динамическая скорость в воде (м/с), H_b – глубина моря. Минимальным значением z для использования в соотношении (2.20) предлагается считать $z = 0,2$ (м).

$$z_t = 6 \frac{\bar{c}}{u_{*a}} z_b, \quad (2.21)$$

где u_{*a} – динамическая скорость в воздухе (м/с).

Для расчета динамических скоростей в воде и воздухе используется соотношение:

$$u_{*a} = \kappa \frac{W_{10}}{\ln(10/z_0)} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} u_{*w}^2 \right)^{1/2}, \quad (2.22)$$

где ρ_a – плотность воздуха (кг/м³), z_0 – параметр шероховатости морской поверхности (м):

$$z_0 = 1,38 \cdot 10^{-4} (W_{10}/c_p)^{2,66} H_{sw}, \quad (2.23)$$

где c_p – фазовая скорость волн.

На основе экспериментальных данных было получено соотношение:

$$\frac{\bar{c}}{c_p} = \begin{cases} 10 \cdot u_{*a}/c_p - 0,25, & u_{*a}/c_p \leq 0,075 \\ 0,5, & u_{*a}/c_p > 0,075 \end{cases}. \quad (2.24)$$

В глубоком море фазовая скорость волны (c_p) и период волны (T_{wave}) связаны соотношением:

$$c_p = gT_{wave}/(2\pi). \quad (2.25)$$

В работе [Terray et al., 1996] было отмечено, что при скорости ветра более 12 м/с достаточно быстро происходит диспергирование нефти волнами и эмульсия вода-нефти почти не образуется, однако подобные оценки должны связываться с масштабами сброса нефти.

Изучение эмульсий вода-в-нефти показывает, что в зависимости от содержания в нефти смол и асфальтенов эмульсии могут быть трех категорий: устойчивые, среднеустойчивые (время существования – несколько дней) и неустойчивые (время существования – несколько часов). Среднеустойчивые эмульсии образуют нефти, содержащие асфальтенов и смол больше 3%, но меньше 7%. При содержании асфальтенов более 7% образуется устойчивая эмульсия [Fingas et al., 1999].

Для определения устойчивости эмульсии вводится индекс стабильности $S = (S_1 + S_2)/2$ [Xie et al., 2007]. Устойчивые эмульсии образуются при $S \geq 1,22$, среднеустойчивые – при $0,67 \leq S < 1,22$ и неустойчивые – при $S < 0,67$.

$$S_1 = X_a \exp \left[K_{ao} (1 - X_a - X_w)^2 + K_{aw} X_w^2 \right] \exp \left[-0,04 (T_{wK} - 293) \right], \quad (2.26)$$

$$S_2 = \begin{cases} (0,04 \cdot CCI + W_s)/5,6 & \text{при } 5,24CCI - 9W_{10} > 0, \\ CCI/9,0 & 5,24CCI - 9W_{10} < 0 \end{cases}, \quad (2.27)$$

$$CCI = Asph + Res + 0,4Wax, \quad (2.28)$$

где $K_{ao} = 3,3$, $K_{aw} = 200$, T_{wK} – температура (°K), X_a – содержание асфальтенов, X_w – содержание парафинов (в долях от целого), CCI – индекс химического со-

става (Chemical Composition Index), *Asph* – процентное содержание асфальтенов; *Res* – процентное содержание смол, *Wax* – процентное содержание парафинов.

В случае, благоприятном для образования эмульсии ($E > 0,24$ и $S > 0,67$), производится расчет этого процесса.

А) Метод, предложенный в работе [Rasmussen, 1985], используется, когда известно содержание асфальтенов и парафинов.

$$\frac{dF_{wo}}{dt} = R_1 - R_2, \quad (2.29)$$

$$R_1 = \frac{k_{1e}}{\mu_{oil}} (1 + W_{10})^2 (F_{fin} - F_{wo}), \quad (2.30)$$

$$R_2 = \frac{k_{2e}}{\mu_{oil}} \frac{1}{Asph \times Wax} F_{wo}, \quad (2.31)$$

где F_{wo} – объемное содержание воды в эмульсии, F_{fin} – конечное содержание воды в эмульсии (как правило, используется $F_{fin} = 0,7$ для сырых нефтей и $0,5$ для мазута), k_{1e} и k_{2e} – эмпирические константы: $k_{1e} = 5 \cdot 10^{-7}$ (кг/м³) и $k_{2e} = 1,2 \cdot 10^{-7}$ (кг сек²/м).

Б) Метод, предложенный в [Mackay et al., 1980], используется, когда содержание асфальтенов и парафинов неизвестно.

$$\frac{dF_{wo}}{dt} = k_{em} (1 + W_{10})^2 (1 - F_{wo} / F_{fin}), \quad (2.32)$$

где k_{em} – эмпирическая константа ($\sim 10^{-6}$).

2.1.6. Изменение плотности и вязкости

Плотность и вязкость нефти значительно увеличиваются при испарении легких фракций нефти, при образовании эмульсий вода-в-нефти и зависят от температуры окружающей среды, что особенно важно при расчетах нефтяных разливов в арктических морях.

Для расчета изменений плотности и вязкости нефти применяются соотношения [Mackay et al., 1980; Reed, 1989; Luk and Kuan, 1993; Miranda et al., 2000; Quiroga et al., 2002].

$$\rho_{oil} = F_{em} \rho_w + \rho_{oil}^{(0)} (1 - F_{em}) [1 + c_{ev} F_{ev}] [1 - c_T (T_{wK} - T_{0K})], \quad (2.33)$$

$$\mu_{oil} = \mu_{oil}^{(0)} \exp \left[a_T (1/T_{wK} - 1/T_{0K}) \right]; \mu_{oil} = \mu_{oil}^{(0)} \exp (a_{ev} F_{ev}); \mu_{em} = \mu_{oil}^{(0)} \exp \left(\frac{a_1 F_{em}}{1 - a_2 F_{em}} \right), \quad (2.34)$$

где $\rho_{oil}^{(0)}$ – начальная плотность нефти, $\mu_{oil}^{(0)}$ – начальная вязкость нефти, T_{0K} – относительная (или предыдущая) температура воды, F_{ev} – массовая доля испарившейся нефти, F_{em} – объемная доля воды в эмульсии; c_{ev} , c_T , a_T , a_{ev} , a_1 , a_2 – эмпирические коэффициенты.

По данным, приведенным в работе [Нельсон-Смит, 1977], коэффициент $c_{ev} = 0,14-0,25$. В статье [Belore and Buist, 1994] приводятся результаты анализа для 13 сортов сырой нефти и показано, что коэффициент a_T изменяется в пределах от 1085 до 17 838, коэффициент a_{ev} изменяется в пределах от 2,8 до 16,95.

2.1.7. Внутриводное загрязнение

Для расчета распространения нефтяного загрязнения в водной толще используется численное решение трехмерного уравнения адвекции и диффузии для неконсервативной примеси:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w + w_c) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_L \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_L \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} + Q_{subm}, \quad (2.35)$$

где $C(x, y, z, t)$ – концентрация диспергированной нефти, u, v, w – составляющие скорости течения по осям x, y, z соответственно, $w_c(d)$ – собственная гравитационная вертикальная скорость примеси, зависящая от размера капель и их плотности, K_L и K_z – горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии, $Q_{subm}(x, y, z, t)$ – удельный поток нефти, представляет собой все источники и стоки загрязнения в водной толще, в том числе уход за счет растворения в воде, поглощение биотой и т.д. Ось z направлена вертикально вниз, область решения от $z = H_b$ на дне до $z = 0$ на поверхности.

Граничные условия на поверхности:

$$\left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_c C \right)_{z=0} = q_{up} + q_{down}, \quad (2.36)$$

где q_{up}, q_{down} – поток капель к поверхности за счет положительной плавучести и в воду за счет обрушения волн, соответственно.

Граничные условия на дне:

$$\left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_c C \right)_{z=H_b} = q_{si}, \quad (2.37)$$

где q_{si} – поток примеси на дно, нулевое значение потока соответствует условию непротекания.

2.1.8. Формирование агрегатов

Нефтяные агрегаты – одна из распространенных форм нефтяного загрязнения в море. При выветривании вязкость и плотность нефти увеличиваются и формируются смоляные комки или агрегаты. Сорбируя взвешенные минеральные и органические частицы, такие образования постепенно уплотняются до весьма твердых комочков и шаров.

В некоторых моделях, например, MOHID [Miranda et al., 2000], OILTOX [Brovchenko et al., 2003], потеря массы нефти, адсорбированной на взвешенных минеральных частицах (m_{sed}), рассчитывается по формуле [Payne et al., 1987]:

$$\frac{dm_{sed}}{dt} = 1,3 \sqrt{E/\mu_w} K_a C_{oil} C_{sed} z_i A_s, \quad (2.38)$$

где K_a – параметр «липкости» (stick parameter), принимается равным 10^{-4} м³/кг; z_i – глубина интрузии капель нефти в воду ($1,5 H_{wave}$); C_{sed} – концентрация взвешенных частиц в воде, C_{oil} – концентрация капель нефти в воде, A_s – площадь пятна, E – скорость диссипации энергии ветровых волн:

$$E = \frac{D}{z_i T_{sw}}, \quad (2.39)$$

где D – диссипация энергии ветровых волн, определяется из соотношения (2.15).

2.1.9. Растворение нефти

Как и испарение, растворение нефти определяется ее составом. Поток массы i -й компоненты с единицы площади нефтяного slicka в процессе растворения Q_{si} рассчитывается по соотношению:

$$Q_{si} = K_s (X_i S_i - C_i^{(0)}), \quad (2.40)$$

где K_s – коэффициент массообмена при растворении [м/с], S_i – растворимость i -го компонента, $C_i^{(0)}$ – фоновая концентрация i -го компонента. При расчете растворения учитывается фоновая концентрация компонентов в морской воде.

Растворимость компонентов S_i [моль/л] в нефтяном пятне может быть рассчитана по молекулярному весу [Riazi and Alenzi. 1999, Riazi and Roomi, 2008].

$$S_i = \exp\left((3,6 - 0,0036 MW_i) + (0,1 - 0,0018 \cdot MW_i) \cdot S_w - 4250 / T_{wK}\right), \quad (2.41)$$

где MW_i – молярная масса псевдокомпонента нефти, [г/моль], и S_w – соленость воды в весовых процентах.

Отметим, что растворение многокомпонентной смеси нефтепродуктов для поверхностного slicka будет зависеть от процесса испарения, который может существенно изменять молярные доли псевдокомпонентов X_i (см. (2.40)).

Некоторую проблему представляет собой определение коэффициента массообмена K_s , поскольку наряду с молекулярным возможен и турбулентный (конвективный) характер массообмена. В этом случае распространенным приемом является задание коэффициента K_s через число Шервуда – параметр подобия, определяемый как отношение конвективного переноса к диффузионному переносу для рассматриваемого процесса и зависящий от чисел Рейнольдса и Шмидта.

Растворение компонентов нефтяного slicka в воде в большей степени представляет собой экологическую проблему, поскольку отток массы нефти с поверхности моря незначителен по сравнению с испарением и диспергированием, однако приводит к токсическому воздействию на биоту, поскольку к водорастворимым компонентам нефти относятся ароматические углеводороды, такие как бензол и толуол, и полициклические углеводороды, такие как нафталин.

2.1.10. Взаимодействие с берегом

На процессы взаимодействия нефтяного разлива и берега влияют локальные гидрометеорологические условия (скорости ветра и течений, ветровое волнение), свойства нефтяного пятна, а также характеристики берегов. Наиболее подробно процессы взаимодействия нефтяного пятна с берегом, например, были отражены в модели COZOIL [Reed et al., 1989], в которой была предпринята попытка учесть вынос нефти на берег, впитывание в грунт и частичный вынос обратно в море. Для

реализации этой модели (или подобной) необходимо использовать модель прибрежной циркуляции высокого разрешения (локальную модель) и иметь детальную информацию о морфометрии и морфологии береговой зоны. Анализ состояния вопроса о взаимодействии нефтяных разливов с берегом был предпринят в работе [Etkin et al., 2007], где констатировалось, что вследствие недостаточной информационной и физической изученности процесса, на сегодняшний день взаимодействие с берегом рассматривается гораздо проще: либо принимается, что вся подошедшая к берегу нефть оказывается на берегу, либо для определения части нефти, оставшейся на берегу, используются параметризации, полученные с использованием данных наблюдений.

2.1.11. Взаимодействие со льдом⁵

Для учета влияния ледяного покрова на процесс растекания предложено соотношение [Fingas and Hollebone, 2003], связывающее площадь растекания на открытой поверхности воды S_0 и в ледовом покрове S :

$$S = \alpha_{ice} S_0, \quad (2.42)$$

$$\alpha_{ice} = [\mu_{oil} / \mu_w]^{-0.15} (1 - C_{ice}), \quad (2.43)$$

где C_{ice} – сплоченность ледяного покрова.

При наличии ледяного покрова скорость переноса нефти в зависимости от сплоченности льда принимается либо равной скорости на чистой поверхности (до 3–5 баллов в OSCAR [Aamo et al., 1997] и до 7 баллов в PADM [Liungman and Mattsson, 2011]), либо равной скорости дрейфующего льда.

Нефть на поверхности льда. Для расчетов процесса осесимметричного растекания залпового сброса нефти на верхней поверхности снежного/ледового покрова в работе [Belore and Buist, 1988] используется полуэмпирическая параметризация:

$$R(t) = \left(\frac{g V_0^2}{\pi \nu_{oil}^{1/2}} \right)^{1/6} t^{1/4}. \quad (2.44)$$

Соотношение (2.44) по форме аналогично (2.5), за исключением того, что в него входит ускорение силы тяжести, а не редуцированное ускорение, и вязкость нефти, а не воды.

Для расчета растекания постоянного объема нефти на верхней поверхности ледяного покрова (аналогично растеканию по твердой подложке) также используется полуэмпирическая параметризация [Huppert, 1982]:

$$R(t) = 0,894 \left(g V_0^3 / 3 \nu_{oil} \right)^{1/8} t^{1/8}. \quad (2.45)$$

Скорость фильтрации растекающейся нефти в пористую подложку [Зацева и др., 2009] оценивается как:

$$u_f = (\rho g k_p / \mu) \left(1 + h / h_f \right) \approx \rho g k_p / \mu, \quad (2.46)$$

⁵ Соотношения в этом разделе, как правило, эмпирические, получены при обработке результатов единичных экспериментов.

где u_f – скорость фильтрации, определяемая из закона Дарси, k_p – коэффициент проницаемости грунта. Параметр проницаемости снега k_p определяется выражением [Belore and Buist, 1988]:

$$k_p = 7,7 \cdot 10^{-2} d_s^2 \exp[-7,8(1 - E_s)], \quad (2.47)$$

где d_s – размер зерна снега, E_s – пористость снега ($E_s = 1 - \rho_s/\rho_i$), ρ_s – плотность снега; ρ_i – плотность пресного льда (917 кг/м³).

Предельный размер (радиус) R_{max} для одномоментного/залпового сброса нефти на снег в соответствии с [Зацева и др., 2009]

$$R_{max} \approx 1,3 \left(\frac{g}{v_{oil} u_f} \right)^{1/10} V_0^{2/5}. \quad (2.48)$$

Нефть под ледяным покровом. В работе [Weerasuriya and Yapa, 1993] приводится вывод уравнений для расчета растекания нефти и определение неизвестных параметров путем лабораторных экспериментов. Растекание нефти подо льдом происходит в основном под действием силы плавучести, поэтому доминирующей является вязко-гравитационная фаза, в которой сила вязкого сопротивления уравнивается гравитационной. В итоге получено полуэмпирическое выражение для радиуса пятна нефти при постоянном объеме V [Yapa and Chowdhury, 1990; Yapa and Belaskas, 1993; Fingas and Hollebone, 2003]:

$$R(t) = k_1 \left[(\rho_w - \rho_{oil}) / \mu_{oil} \cdot g V_0^3 \right]^{1/8} t^{1/8}, \quad (2.49)$$

где k_1 – безразмерный коэффициент, зависящий от шероховатости нижней поверхности льда и определяемый из результатов лабораторных экспериментов (в работе [Yapa and Belaskas, 1993] $k_1 = 0,51$).

Заканчивается растекание нефти при равенстве сил плавучести и поверхностного натяжения, при этом окончательный радиус нефтяного пятна R_f будет равен [Yapa and Chowdhury, 1990; Fingas and Hollebone, 2003; Izumiyama and Konno, 2002a; Izumiyama et al., 1998]:

$$R_f = k_2 \left(g (\rho_w - \rho_{oil}) / \sigma_n \right)^{1/4} V^{1/4}, \quad (2.50)$$

где $\sigma_n = \sigma_{ow} \cos(\phi_c) + \sigma_{oi} - \sigma_{iw}$, σ_{oi} – межфазное натяжение на границе нефть – лед, σ_{iw} – межфазное натяжение вода – лед, ϕ_c – контактный угол на линии тройного контакта (ЛТК) фаз, k_2 – безразмерный коэффициент (0,467 [Yapa and Chowdhury, 1990]).

Как показали экспериментальные исследования, перемещение нефти относительно нижней поверхности льда начинается при достижении некоторого критического значения скорости течения воды относительно льда, которое оценивается разными авторами от 0,1 м/с до 0,2–0,25 м/с в зависимости от шероховатости нижней поверхности льда [Wadhams, 1976; Clark and Finley, 1982; Bobra and Fingas, 1986; Измайлов, 1988]. При скорости течения меньше критической нефть перемещается вместе со льдом.

Величина критической скорости течения зависит от плотности нефти, поверхностного натяжения нефть – вода, шероховатости льда и толщины нефтяного пятна. По результатам лабораторных экспериментов [Cox et al., 1980] при относительно гладкой поверхности льда критическую скорость (u_{cr}) можно рассчитать по уравнению [Liu and Leendertse, 1981]:

$$u_{cr} = 1,5 \left(2 \frac{\rho_{oil} + \rho_w}{\rho_{oil} \rho_w} \left[\sigma_{ow} g (\rho_w - \rho_{oil}) \right]^{1/2} \right)^{1/2}. \quad (2.51)$$

Когда критическое значение достигнуто, нефть начинает передвигаться относительно льда со скоростью [Cox et al., 1980; Liu and Leendertse, 1981]:

$$u_{oil} = u_{water} \left[1 - \left(\frac{K}{0,115 F_\delta^2 + 1,105} \right)^{1/2} \right], \quad (2.52)$$

где K – параметр усиления, который определяется экспериментально и зависит от шероховатости нижней поверхности льда ($K = 1$ для гладкого льда и больше 1 для шероховатого льда) [Cox et al., 1980]. F_δ – параметр (денсиметрическое число Фруда), определяемый по формуле [Cox et al., 1980]:

$$F_\delta^2 = u_{water} \left[(\rho_w - \rho_{oil}) / \rho_w \cdot h_{oil} \right]^{-1/2}. \quad (2.53)$$

Скорость выветривания нефти и нефтепродуктов в условиях сплоченного ледового покрова уменьшается пропорционально сплоченности льда, что физически обусловлено уменьшением поверхности контакта на границе нефть – воздух и нефть – вода, низкими температурами и ограничением развития ветрового волнения в пространствах между льдинами за счет лимитированного разгона.

2.1.12. Подводный нефтегазовый выброс

После катастрофического выброса нефти в 2010 году в Мексиканском заливе с глубоководной скважины Deep Water Horizon (DWH) активность разработки методов расчета подводных выбросов резко возросла. В списке дополнительной литературы можно найти ссылки на современные и классические работы.

2.1.12.1. Модель нефтегазового выброса

В большинстве работ предполагается, что при наличии газа в выбросе на первом этапе подъем нефти к поверхности осуществляется так называемым «газовым лифтом», или «пузырьковым шлейфом».

Модель развитого «пузырькового шлейфа», использующая гипотезу вовлечения, основывается на работах [Fannelop and Sjoen, 1980; Гебхарм и др., 1991; Yapa and Zheng, 1997; Johansen, 2000; Johansen, 2003; Комаров и др., 2007; Drozdowski et al., 2011] и включает в себя:

- уравнение изменения массового расхода вещества вдоль струи за счет вовлечения окружающей жидкости;
- уравнение изменения потока импульса под действием архимедовой силы;
- уравнение сохранения массового расхода газа в струе.

Предполагается, что:

- профили вертикальной скорости и плотности вещества струи в каждом ее сечении являются подобными и описываются гауссовыми функциями;
- давление в сечении струи равно давлению в окружающей жидкости;
- плотность газа в пузырьках по мере их подъема к поверхности изменяется по политропическому закону;
- отношение поперечных размеров (радиусов) пузырькового ядра и всей области, где происходит восходящее движение жидкости, постоянно (см.1.1.3);
- справедливо так называемое приближение Буссинеска, заключающееся в том, что в уравнениях движения во всех членах, за исключением слагаемых, описывающих силы плавучести, плотность вещества струи полагается равной плотности окружающей воды.

Уравнение изменения массового расхода

$$\frac{\partial}{\partial z}(b^2 v) = 2\alpha b v, \quad (2.54)$$

где b – радиус «пузырькового шлейфа», v – скорость нефтегазовой смеси на оси шлейфа, α – константа вовлечения (по аналогии с термическими струями).

Данное соотношение отражает предположение о том, что изменение массы жидкости в струе происходит за счет вовлечения окружающей жидкости пропорционально характерной скорости в струе, за которую в данном случае может принимается скорость в центре струи. Как правило, принимается, что $\alpha = 0,057$ для обычной струи и $\alpha = 0,082$ для факелов.

Предполагается, что концентрация нефти в «пузырьковом шлейфе» подчиняется гауссову распределению:

$$C(r, z) = C(z) \exp\left(-\frac{r^2}{\lambda_c^2 b^2}\right), \quad (2.55)$$

где λ_c – параметр распределения концентрации нефти в шлейфе.

Сохранение массы нефти

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\pi (\lambda b)^2 v}{\lambda_c + 1} + \pi (\lambda b)^2 W_s C \right) = 0, \quad (2.56)$$

где W_s – скорость всплывания капельки нефти, $\lambda = 0,65$ – отношение поперечных размеров пузырькового ядра и всей области, где происходит восходящее движение жидкости. Данное уравнение можно проинтегрировать, считая поток нефти Q_{oil} постоянным и равным начальному расходу. Тогда:

$$C(z) = \frac{Q_{oil}}{\frac{\pi (\lambda b)^2 v}{\lambda_c + 1} + \pi (\lambda b)^2 W_s}. \quad (2.57)$$

Предполагая, что приближение Буссинеска адекватно описывает изменение плотности, уравнение сохранения количества движения записывается в виде:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{2} b^2 v^2 \right) = \lambda^2 b^2 g' . \quad (2.58)$$

Сохранение плавучести

Принимая во внимание эффект плотностной стратификации в водной толще и возрастание объема газа с подъемом к поверхности, уравнение сохранения плавучести будет:

$$\frac{d}{dz} \frac{\pi \lambda^2 b^2 v g'}{\lambda^2 + 1} = -\pi b^2 v N^2 + \frac{d}{dz} \frac{Q_0 P_a v}{(H - z) \rho_r (v + U_B)} , \quad (2.59)$$

где $g' = g(\rho_w - \rho_r)/\rho_w$ – редуцированное ускорение силы тяжести, $\rho_r = \rho(r, z)$ – плотность нефтегазовой смеси в шлейфе на расстоянии r от оси, $U_B = U_s(1 + \lambda)$, скорость подъема пузырьков, U_s – «slip velocity» вводится для относительного движения водной струи и струи с пузырьками, $N^2(z) = -\frac{g}{\rho_w} \frac{d\rho_w}{dz}$ – частота Вайселя – Брента.

Изменение плавучести с глубиной происходит:

- 1) за счет расширения газа – увеличения его объема;
- 2) за счет изменения плотности вследствие стратификации;
- 3) за счет расширения струи вследствие вовлечения окружающей воды.

Объемный расход газа в струе/факеле можно определить по формуле:

$$Q_0 = Q_{oil} \cdot GOR \cdot H_a / H_b , \quad (2.60)$$

где Q_{oil} – расход нефти, GOR – газовый фактор (соотношение газ/нефть), H_a – глубина, соответствующая давлению 1 атм, H_b – глубина источника выброса.

В трехмерной модели CDOG (Comprehensive Deepwater Oil and Gas) [Zhen *et al.*, 2002; Chen and Yapa, 2002] используется другой метод решения, а именно Лагранжев подход расчета распространения контрольных объемов (КО), которые перемещаются со средней скоростью вдоль центральной линии струи/факела.

2.1.12.2. Оценка параметров распределения капель нефти по размерам

Важным параметром при оценке распространения нефти к поверхности моря является размер капель, который определяет их вертикальную скорость всплытия, и, следовательно, время и место выхода на поверхность воды.

Для описания спектра размера капель используется функция распределения Розина – Раммлера, имеющая вид:

$$V(d) = 1 - \exp \left(-k_i \left(d/d_i \right)^\alpha \right) , \quad (2.61)$$

и представляющая объемную долю капель, размером не превышающих d , привязанная к какому-либо характерному размеру d_i , $k_i = -\ln(1 - V_i)$. Для $V_i = 50\%$, d_i – медианный диаметр (d_{50}), $k_i = -\ln(0,5) = 0,693$, $\alpha = 1,8$ [Johansen *et al.*, 2013].

Медианный диаметр (d_{50}) капель можно определить по соотношению [Johansen *et al.*, 2013]:

$$d_{50} / D = AWe^{-3/5} \left(1 + BVi \left(d_{50} / D \right)^{1/3} \right)^{3/5}, \quad (2.62)$$

где число вязкости $Vi = \mu_o U / \sigma = We / Re$, число Вебера $We = \rho U^2 D / \sigma$, число Рейнольдса $Re = \rho U D / \mu_o$, D – диаметр устья скважины, через которое нефть поступает в морскую среду со скоростью U , σ – поверхностное натяжение нефть – вода (0,03 Н/м), A и B – эмпирические коэффициенты. В [Johansen et al., 2013] предложены значения коэффициентов $A = 15,0$ и $B = 0,8$.

Присутствие газовой фазы следует учесть в безразмерных параметрах, определяющих режим истечения. В отсутствии газового компонента скорость истечения нефти из отверстия с диаметром D можно определить как $U = Q / AN$, где $A_N = \frac{\pi D^2}{4}$, Q – расход жидкости в единицу времени.

Если обозначить объемную долю газа через $n = GOR(1 - GOR)$, где GOR – объемное отношение газ/нефть *in situ*, и пренебречь долей газа в импульсе струи, «эквивалентную» (в смысле сохранения потока импульса) скорость выхода струи можно определить как $U_n = U(1 - n)^{1/2}$.

При больших объемах выброса, когда динамика факела вблизи устья скважины определяется не только начальным импульсом, но и плавучестью, ее влияние необходимо учесть. Для этого при определении числа We вместо скорости истечения можно использовать величину $U_c = U_n(1 + Fr^{-1})$ [Johansen et al., 2013]. Здесь $Fr = U_n / (g'D)^{1/2}$ – число Фруда, $g' = g(\rho_w - \rho_{oil}(1 - n)) / \rho_w$.

2.1.12.3. О подъеме отдельных капель нефтепродуктов

В ситуациях, когда струя теряет импульс, не доходя до поверхности моря, учитывая полученное из параметров источника распределение частиц нефти по размерам, с помощью модели турбулентной диффузии рассчитывается их дальнейшая судьба в толще воды и на поверхности.

Скорость подъема сферических капель w_t (terminal velocity) с диаметром d рассчитывается как:

$$w_t = \begin{cases} -\frac{1}{18} g' d^2 (1 - \rho_{oil} / \rho_w) / \nu_w, & d < d_{cr} \\ -\left(\frac{8}{3} g' d (1 - \rho_{oil} / \rho_w) \right)^{1/2}, & d > d_{cr} \end{cases}, \quad d_{cr} = \frac{9,52 \nu_w^{2/3}}{(g')^{1/3} (1 - \rho_{oil} / \rho_w)^{1/3}}, \quad (2.63)$$

где d_{cr} – критический размер капель, после превышения которого движение капель вверх проходит в турбулентном режиме.

Поднимаясь к поверхности за время равное $T_{up} = \frac{H_b}{w_t}$, нефтяные капли рассеиваются за счет горизонтальной турбулентной диффузии до размеров облака частиц на поверхности моря [Okubo, 1971]:

$$L(t) = 0,00155 \cdot t^{1,17}, \quad L_s = 0,00155 \cdot T_{up}^{1,17}, \quad (2.64)$$

где $L(t)$ – радиус облака, (м), формирующегося за время t , (с), L_s – размер пятна на поверхности моря глубиной H_b .

Время подъема для больших и маленьких капель нефти отличается на несколько порядков. Размеры пятна будут определяться исходя из параметров горизонтальной турбулентной диффузии и в большей степени времени всплытия для капель различных диаметров, а центр пятна смещен от места выброса в направлении, определяемом господствующими в данный момент глубинными и поверхностными течениями.

2.2. Постановка задачи и вычислительная технология в модели SPILLMOD

2.2.1. Модель распространения нефти на открытой воде

Модель SPILLMOD, созданная в Государственном океанографическом институте имени Н.Н. Зубова, описывает процессы физико-химической трансформации разлива нефти на поверхности моря. В отличие от многих моделей распространения нефти в море, в которых используются соотношения Фэя, в модели SPILLMOD конфигурация нефтяного загрязнения зависит от гидрометеорологических условий и режима сброса нефти или нефтепродукта. При этом способы описания процессов выветривания нефти в модели SPILLMOD довольно традиционные, аналогичные описанным в разделах 2.1, за исключением параметризации процесса диспергирования нефти ветровыми волнами. Параметризация этого важного процесса удаления нефти с поверхности моря будет приведена ниже. Принципиальное отличие между моделью SPILLMOD и другими моделями заключается в способе расчета площади нефтяного пятна и распределения толщины нефти внутри области нефтяного загрязнения. 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. При расчетах распространения нефти от источников, расположенных на морском дне, в модельный комплекс включаются дополнительные модули (1) для описания первоначального диспергирования нефтегазового выброса, (2) для расчета подъема нефти вверх за счет положительной плавучести газовых пузырьков (режим плавучей струи) и (3) подъема к поверхности за счет плавучести капель нефти. Последний процесс сопровождается диффузионным рассеянием капель диспергированной нефти и их переносом течениями, главным образом в верхнем слое океана.

Приведем необходимые сведения об основных уравнениях математической модели распространения нефти по поверхности моря 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 Ω ограничена кусочно-линейной функцией, аппроксимирующей береговой контур. Основные уравнения модели для области Ω' представляются в следующем виде:

$$h \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -g' h \nabla h - \frac{\beta}{\rho_{oil}} \left| \left(\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \right) \right| \left(\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \right), \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h\mathbf{u}) = -\frac{Q_e + Q_{n_d} + Q_{ch_d} - Q_o + Q_{sc}}{\rho_o}, \quad (2.66)$$

где ρ_o – 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, β – 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_o – поток нефти на поверхность от источника разлива, Q_{sc} – поток нефти с поверхности за счет применения скиммерных систем, $g' = g(\rho_w - \rho_{oil})/\rho_w$ – редуцированное ускорение силы тяжести, ρ_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 (2.65) – (2.66) должна быть дополнена следующими граничными условиями:

кинематическое:

$$L_1: B_t + \mathbf{u}\nabla B = 0, \quad (2.67)$$

где $B(t, x, y) = 0$ – уравнение свободной границы;
и динамическое условие:

$$L_1: h(x, y) = 0. \quad (2.68)$$

Соотношение (2.67) 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:

$$L_2: \mathbf{u}_n = 0, \quad (2.69)$$

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 процессов испарения и диспергирования, притока нефти на поверхность от подводного источника и источника на поверхности моря, изменения плотности, вязкости и межфазного натяжения нефти из-за выветривания. Подобные параметризации приведены в разделе 2.1. 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.

Для расчета потока нефти за счет диспергирования ветровыми волнами в модели SPILLMOD используется система расчетных соотношений, физический смысл которых подробно описан в статьях авторов [Зацена и др., 2018b; Зацена и др., 2018c]:

$$Q_{z+} = \begin{cases} \rho_{oil} TOR \cdot h_{oil} \cdot F_{up} \left(d_{50}^N \right) \cdot F_m \left(d_{max}, v_d \right), & h_{oil} \geq h_T, \\ \rho_{oil} TOR \cdot h_T \cdot h_{oil} < h_T \end{cases} \quad (2.70)$$

где $TOR \approx 1,4 \cdot 10^{-2} u_*^3 g c_T^{-4}$, c_T – пороговая фазовая скорость волн, при которой начинается обрушение, u_* – динамическая скорость в приводном слое атмосферы, h_T – пороговая толщина нефти на поверхности моря, при достижении которой капли нефти при проникновении в водную толщу уже не возвращаются к поверхности.

Медиана распределения капель нефти по размерам при дроблении в слое волнового перемешивания d_{50}^N определяется физическими свойствами нефти, толщиной пленки на поверхности и скоростью ветра:

$$d_{50}^N = A \frac{h_{oil}^{0,4} \sigma_{ow}^{0,6}}{\rho_{oil}^{0,6}} \frac{1 + 0,02 \left(\mu_{oil} W_{10} / \sigma \right)^{0,6}}{0,57 \cdot W_{10}^{1,2}}. \quad (2.71)$$

Корректирующий множитель в соотношении (2.70) $F_{up} \left(d_{50}^N \right)$ определяет долю нефти, возвращающуюся к поверхности между последовательными обрушениями волн.

$$F_{up} \left(d_{50}^N \right) = \left(1 - K_{up} \frac{1}{W_{cr}} k_{St} \left(d_{50}^N \right)^2 \right), \quad (2.72)$$

где $K_{up} = \left(e^{3S^2} \right)^2 \int_0^{\infty} \zeta^2 f_{norm} \left(1, S, \zeta \right) d\zeta$, $f_{norm} \left(1, S, d \right)$ – логнормальное распределение для размеров капель, нормированных на d_{50}^V – медианный диаметр распределения объема нефти по размерам капель, коэффициент $k_{St} = - \frac{g'}{18 v_w}$.

Множитель $F_m \left(d_{max}, v_d \right)$ определяет долю капель, не возвращающихся к поверхности за счет турбулентной диффузии:

$$F_m \left(d_{max}, v_d \right) = v_d \int_0^{d_{max}} \frac{f_v \left(d' \right)}{w_d + v_d} dd', \quad (2.73)$$

где $v_d = 0,14 v_w^*$, v_w^* – динамическая скорость в воде, максимальный размер капель при диспергировании волнами $d_{max}^N = d_{50}^N \cdot e^{3S}$, S – дисперсия логнормального распределения, $f_v(\zeta)$ – функция плотности распределения объема нефти по размерам капель, ζ – диаметр капли нефти.

При расчетах разлива нефти с учетом установки боновых заграждений граница $L = L_1(t, x, y) \cup L_2(x, y)$ области Ω' 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.

$$L_3: \mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{bn} \quad (2.74)$$

$$L_3: Q_b = (1 - E_b) \rho h (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c - \mathbf{u}_b) \cdot \mathbf{n}, \quad (2.75)$$

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 натурных испытаниях эффективности бонов в различных гидрометеорологических условиях определяются специальные параметры: u_{fl} – скорость течения начала пропуска («first loss speed»), при которой боны начинают пропускать нефть и 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:

$$E_b = \begin{cases} 1, & (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} < u_{fl} \\ 1 - \frac{(\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} - u_{fl}}{u_{cl} - u_{fl}}, & u_{fl} \leq (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} < u_{cl} \\ 0, & (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} \geq u_{cl} \end{cases} \quad (2.76)$$

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

$$Q_{sc} = P_{100} \cdot E_{sc}(H_s, h), \quad (2.77)$$

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

Допускается задание области работы скиммерной системы виде окружности (эллипса) или полигона, при этом сбор будет производиться в указанной области с учетом осредненных по этой области параметров разлива.

Некоторым упрощением задачи 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 трабления и их позиционирование в конкретный момент времени неизвестно. 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 условия-

ми, состоянием пятна нефти и графиком применения средств сбора, так как в ночное время операции по локализации разливов нефти не проводятся, а состояние моря и толщина пленки нефти существенно изменяют эффективность реагирования.

2.2.2. О моделировании распространения разливов нефти в дрейфующем льду

Задачу о распространении по поверхности моря, частично покрытого льдом, естественно рассматривать в двух предельных случаях. Если характерный масштаб разлива *существенно меньше, чем характерные размеры льдин*, что, видимо, может реализоваться возле кромки припая, лед рассматривается как фиксированная контактная граница, на которой задаются условия непротекания. Уравнения баланса импульса и массы будут иметь вид, аналогичный распространению нефти на открытой воде (2.65) – (2.66), но с некоторой модификацией граничных условий, определяемых конфигурацией ледового массива.

При растекании нефти в разводах загрязнения льда практически не происходит, т.к. боковая инфильтрация в лед незначительна. Но при сжатии и торошении льда нефть может как заплескиваться на поверхность льда, так и уходить под ледяной покров.

Другим предельным случаем следует считать ситуацию, когда размеры нефтяного разлива *значительно больше характерных размеров льдин*. В этом случае уравнения движения для нефти, движущейся в битом льду со сплоченностью C_{ice} , характерным размером льдин d_i и занимающей область $\Omega(t, x, y)$, записываются в виде:

$$h(1 - C_{ice}) \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -g' h \nabla h \left(1 - \sqrt{C_{ice}}\right) - \frac{C_{ice}}{d} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{ice}) |\mathbf{u} - \mathbf{u}_{ice}| h - \frac{\beta}{\rho_{oil}} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_c) |\mathbf{u} - \mathbf{u}_c| (1 - C_{ice}), \quad (2.65a)$$

Ω :

$$h_t + \nabla \cdot (h\mathbf{u}) + [hC_{ice} \cdot \nabla \cdot (\mathbf{u}_{ice})] / (1 - C_{ice}) = \left[(Q_e + Q_{n-d}) / \rho_{oil} \right] F(C_{ice}) - Q_0 / \rho_{oil} (1 - C_{ice}), \quad (2.66a)$$

где $F(C_{ice})$ – параметр, корректирующий потоки в воду и атмосферу с учетом сплоченности льда. Третий член в левой части уравнения (2.66a) учитывает изменение толщины нефти за счет дивергенции скорости льда, приводящей к изменению его сплоченности.

При вышеуказанной параметризации действующих сил со стороны льдин задача требует формулировки граничных условий на «свободной» границе, аналогично (2.65) – (2.66).

Для исследования свойств решения упростим задачу и рассмотрим растекание нефти на неподвижной поверхности воды с битым льдом. Выветриванием нефти пренебрежем для простоты. Уравнения движения для нефти, движущейся в *неподвижном* битом льду:

$$h(1 - C_{ice}) \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -g' h \nabla h \left(1 - \sqrt{C_{ice}}\right) - \frac{C_{ice}}{d} \mathbf{u} |\mathbf{u}| h - \frac{\beta}{\rho_{oil}} \mathbf{u} |\mathbf{u}| (1 - C_{ice}), \quad (2.65b)$$

$$h_t + \nabla \cdot (h\mathbf{u}) = 0. \quad (2.66b)$$

В случае радиально-симметричного растекания (идеализированный случай) уравнение (2.65b) можно редуцировать для получения простых асимптотических соотношений. Пренебрегая инерционными членами, получим:

$$g' \frac{\partial h}{\partial r} \frac{1}{1 + \sqrt{C}} = u^2 \underbrace{\frac{C}{d(1-C)}}_I + u^2 \underbrace{\frac{\beta}{\rho_{oil} h}}_{II}. \quad (2.65c)$$

В правой части (2.65c) две силы сопротивления – сопротивление движению нефти ансамбля льдин (I) и второй член (II) – «традиционное» трение нефти о воду.

Если объем пролитой нефти V_{oil} , то оценка средней толщины нефти в каждый момент времени $H = \frac{V_{oil}}{\pi R^2 (1-C)}$, где R – радиус пятна нефти.

При большой толщине нефти, когда сопротивление (I) больше (II), асимптотический режим определится из соотношения:

$$g' \frac{\partial h}{\partial x} \frac{1}{1 + \sqrt{C}} = u^2 \frac{C}{d(1-C)}, \quad (2.78)$$

$$R^5 = \frac{\Omega g' d}{\pi C (1 + \sqrt{C})} t^2. \quad (2.79)$$

Когда толщина нефти будет уменьшаться, наступит другой асимптотический режим:

$$g' \frac{\partial h}{\partial x} \frac{1}{1 + \sqrt{C}} = u^2 \frac{\beta}{\rho_{oil} h}, \quad (2.80)$$

$$R^7 = \rho_{oil} g' \frac{\Omega^2}{\pi^2 \beta (1-C)^2 (1 + \sqrt{C})} t^2. \quad (2.81)$$

Итак,

$$\text{для большой толщины нефти} \quad R^5 = \frac{\Omega g' d}{\pi C (1 + \sqrt{C})} t^2, \quad (2.82)$$

$$\text{для малых толщин} \quad R^7 = \rho_{oil} g' \frac{\Omega^2}{\pi^2 \beta (1-C)^2 (1 + \sqrt{C})} t^2. \quad (2.83)$$

Анализ уже произошедших аварийных ситуаций, связанных с проливом нефти в морскую среду в зимних условиях, показывает, что нефть часто попадает в ледовый канал, по которому происходит движение танкеров, заполненный мелкобитым льдом. Важным представляется и тот факт, что размеры льдин в канале значительно меньше, чем в окружающих канал ледовых полях. Причиной этого является постоян-

ное дробление льда движением судов – ледокольных, вспомогательных и собственно танкеров. В целом возможность достоверного прогноза распространения нефти в присутствии льда в значительной степени будет зависеть от информации о локальной ледовой обстановке в месте разлива, которую, как правило, невозможно получить из крупномасштабных ледовых карт и прогнозов ледовых моделей.

2.2.3. Особенности численной реализации в модели SPILLMOD

Важной особенностью модели SPILLMOD от других моделей растекания является прямое решение уравнений гидродинамики для течения легкой жидкости по поверхности более тяжелого субстрата в областях с произвольной геометрией контактных границ. Это обстоятельство дает возможность рассчитать распределение толщины нефти в пятне, что важно для оценки геометрических характеристик, а следовательно, и необходимого количества сил и средств реагирования при разливе.

Объект моделирования (нефтяной разлив) представляется как ансамбль лагранжевых частиц, каждая из которых обладает набором параметров, в данном случае 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 -й 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 $h_{i,j}$ подсчитывается как сумма масс отдельных частиц, отнесенная к площади ячейки, занятой частицами:

$$h_{i,j} = \frac{\rho_o}{\gamma \Delta x \Delta y} \sum_k^{N_{ij}} m_k, \quad (2.84)$$

где γ – часть площади ячейки, занятая частицами, m_k – масса k -й частицы, $N_{i,j}$ – количество частиц в (i,j) -й 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», использовавшегося 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 $\mathbf{u}_z$ и h_z в соответствии с уравнениями (2.65) и (2.66) без адвективных членов и пренебрегается всеми эффектами, связанными с движением среды. На этом шаге все необходимые характеристики среды известны в эйлеровом представлении. На втором шаге проводится интерполяция значений скорости с узлов сетки на частицы и расчет новых значений массы частиц, меня-

ющихся 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 $h_{i,j}$ и $\mathbf{u}_{i,j}$ на «эйлеровой» сетке, построенной с учетом новой конфигурации частиц.

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 (в ходе решения задачи) 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.

3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ В МОРЕ – ТЕХНОЛОГИЯ

3.1. Концепция

Прогнозирование распространения нефти в море осуществляется с помощью методов и инструментов, в совокупности образующих технологию⁶. Смысловым центром технологии является модуль, в котором рассчитываются все возможные для расчета параметры нефтяного разлива. Технически за расчеты отвечает программное обеспечение, реализующее ту или иную модель нефтяного разлива. Аналогичным образом, прогнозирование гидрометеорологических условий в регионе осуществляется с помощью программ, реализующих модели гидротермодинамики атмосферы и океана различной сложности и детализации. Таким образом, технология прогнозирования распространения аварийных разливов нефти реализуется как аппаратно-программный комплекс, включающий вычислительные средства и соответствующее программное обеспечение, реализующее расчеты по соответствующим моделям (атмосферы, океана, нефтяного разлива) и отвечающее за взаимодействие с локальной или распределенной базой данных, куда в соответствии с разработанной спецификацией взаимодействия компонент технологии размещается исходная информация и результаты расчетов. На рисунке 3.1 показаны все необходимые компоненты для реализации прогноза распространения нефти. При отсутствии или ненадлежащем функционировании одной из компонент прогноз будет невозможен либо ограниченно эффективен.

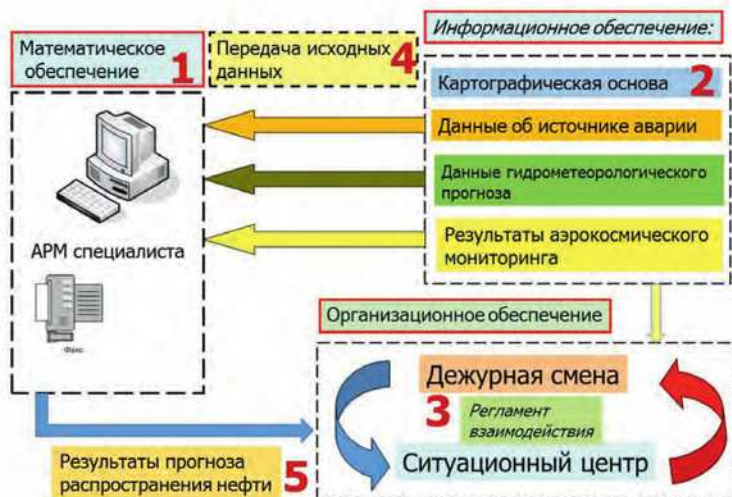


Рис. 3.1. Компоненты технологии прогнозирования распространения разливов нефти в море

⁶ Технология – совокупность методов, используемых в какой-либо отрасли деятельности и обусловленных текущим уровнем развития науки и техники, включая меры организационного характера.

Цифрами на рисунке 3.1 обозначены необходимые компоненты технологии прогнозирования:

1 – математическая модель, реализованная в виде программного обеспечения (ПО) для расчета характеристик разлива нефти после сброса в морскую среду;

2 – информация, необходимая для решения математической задачи о распространении нефтяного загрязнения, – сведения об источнике аварии, сведения о г/м условиях, картографическая основа, результаты аэрокосмического мониторинга;

3 – информационный обмен между заказчиком прогноза и специалистом по прогнозированию осуществляется в рамках регламента взаимодействия;

4 – взаимодействие компонентов технологии прогнозирования осуществляется в распределенной информационной системе, в том числе используется передача данных по сети Интернет;

5 – результаты прогноза распространения нефтяного загрязнения, использующиеся для принятия управленческих решений, согласованные по составу, форме и формату.

Для решения математической задачи о распространении разлива нефти в морской среде нужно знать как минимум: что разлилось, где разлилось, когда разлилось, какая в районе гидрометеорологическая ситуация и есть ли ее прогноз.

Анализ результатов расчетов/прогнозов, как правило, предполагает оценку возможности воздействия разлива нефти на уязвимые объекты в море и на побережье. С этой целью результаты представляются в ГИС-формате, а зачастую программное обеспечение сразу строится как ГИС-приложение, либо с использованием ГИС-технологий. Важным представляется и организационное обеспечение информационного взаимодействия при ЧС. Кто, когда и в какой форме получает информацию о разливе? Кому передавать результаты прогноза и в каком виде? Сколько времени отпущено на подготовку предварительного прогноза (например, по ограниченной информации) и как действовать во время кампании ЛАРН? По видимому, решение вопроса состоит в разработке регламента взаимодействия между заказчиком прогноза и службой или организацией, обеспечивающей предоставление прогнозов распространения нефти в море в результате аварийного сброса.

Каждый из элементов технологии должен быть подготовлен задолго до возникновения реальной аварии и адаптирован в соответствии с моделью входных данных, специфических для каждого региона, и соответствовать техническим возможностям служб или организаций, предоставляющих услуги по прогнозированию.

Адаптация – один из самых важных этапов реализации технологии, так как именно на этапе адаптации модель нефтяного разлива в море сопрягается «в пространстве и во времени» с результатами гидрометеорологического прогноза, исходные данные об источнике аварии превращаются в начальные данные математической задачи о распространении разлива нефти или нефтепродуктов, а координаты элементов береговой линии превращаются в граничные условия. Адаптация модели нефтяного разлива к модели входных данных представляется задачей для разработчиков технологии прогнозирования распространения нефти, но не проблемой для пользователей или специалистов, в задачу которых входит оперативное дежурство и предоставление прогнозов распространения нефти после аварийного разлива в море для принятия управленческих решений по локализации и ликвидации разлива. Одним из шагов

в реализации технологии прогноза должно стать создание технологической линии прогнозирования. Пример такой технологической линии приведен ниже в разделе 3.3.

Однако неверно было бы думать, что прогнозирование распространения аварийных разливов нефти может быть сведено к вводу исходных данных об источнике аварии и использованию специализированного программного обеспечения для расчета параметров нефтяного разлива. В задачу прогнозиста входит подготовка результатов расчета, которые можно использовать для принятия управленческих решений. Для анализа результатов моделирования важно представлять возможную погрешность гидрометеорологического прогноза, от которой зависит оценка области вероятного обнаружения нефтяного разлива. Опираясь на качество информации об источнике разлива нефти и возможность оценить, насколько физико-химические свойства пролитой в море нефти или нефтепродукта соответствуют использованному для моделирования прототипу, принимается решение об ожидаемой погрешности расчета процессов выветривания, количества нефти на поверхности моря, испарившейся в атмосферу или проникшей в водную толщу при обрушении ветровых волн.

3.2. Модели нефтяного разлива в море

На сегодняшний день во всех развитых странах мира применяются математические модели нефтяных разливов, реализованные в виде соответствующего программного продукта. Наиболее известные из них – OILMAP и GNOME (США), COZOIL и OSCAR (Норвегия), OSIS (Великобритания), SPILLMOD и OilMARS (Россия), PADM (Швеция). Для использования всех перечисленных моделей необходима интеграция с выходной продукцией гидрометеорологического прогноза в районе интереса. Отметим, что все модели являются коммерческим продуктом.

3.2.1. PADM

В оперативную океанографическую систему (ООС) Балтийского моря включена специально разработанная в шведском институте метеорологии и гидрологии (SMHI) модель расчета нефтяных загрязнений PADM [Ambjorn, 2008; Liungman and Mattsson, 2011], образующая вместе с ГИС-интерфейсом систему SEATRACK WEB. Модель рассчитывает в оперативном режиме перенос и трансформацию нефтяных загрязнений, дает прогностические параметры загрязнения и рассчитывает обратный перенос загрязнения на срок до 10 суток. В совокупности с использованием информационной системы перемещения судов такие расчеты позволяют идентифицировать судно-загрязнитель для наложения штрафных санкций. Влияние ледяного покрова учитывается путем ограничения области распространения загрязнения. Модельный комплекс используется только для расчетов на акватории Балтийского моря и сопряжен с европейскими моделями HIRLAM (модель атмосферы) и HIROMB (модель циркуляции для Балтийского моря).

3.2.2. OSCAR

Для оперативных расчетов переноса и трансформации нефтяных загрязнений в Северном, Норвежском и западной части Баренцева моря используется модель

OSCAR, разработанная в норвежском институте SINTEF [Aamo et al., 1997]. Модель используется совместно со специально разработанной моделью трансформации нефти OWM (Oil Weathering Model), которая основана на результатах многочисленных экспериментальных исследований различных видов нефти и нефтепродуктов. В модели рассчитывается распространение дисперсионного шлейфа в верхнем слое воды. Влияние ледяного покрова учитывается путем ограничения области распространения загрязнения при растекании и испарении. Кроме того, учитывается влияние сплоченного льда на перенос нефти. Подробное описание системы моделирования OSCAR представлено в [Моделирование разливов нефти..., 2016].

3.2.3. OILMAP

Следует отметить комплекс программных продуктов, разработанный в США, в Applied Science Associates (ASA) [Spaulding et al., 1992]. Модели получили широкое распространение и используются для расчетов на акваториях восточного побережья США, Австралии, Бразилии и др. Модельный комплекс включает в себя модель переноса и трансформации нефтяных загрязнений OILMAP, трехмерную модель распространения нефтяных загрязнений SIMAP и еще десяток моделей экологического направления (www.asascience.com). Все модели ASA используют разработанный на базе ESRI ГИС-технологии интерфейс. Модели могут использоваться в оперативном режиме. Влияние ледяного покрова не рассматривается. Модель позиционируется как WOSM (world wide oil spill model), однако эффективно работает только в районах, для которых гидрометеорологическая информация выпускается в оперативном режиме.

3.2.4. ADIOS2

Определенную помощь при прогнозировании судьбы нефти в море может оказать свободно распространяемая модель NOAA – ADIOS2 (Automated Data Inquiry for Oil Spills) – https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_Data_Inquiry_for_Oil_Spills. Модель ADIOS2 распространяется как программное обеспечение (ПО) для расчета выветривания нескольких сотен типов нефти, собранных в специальную базу данных [Lehr et al., 2002]. Программное обеспечение доступно по ссылке: <http://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/adios.html>.

Важно, что ПО ADIOS2 предназначено лишь для расчета выветривания, но не использует данные гидрометеорологических прогнозов и не позволяет рассчитать траектории движения нефтяных пятен.

В ряде случаев расчеты с помощью ADIOS2 могут служить дополнением к прогнозу траектории распространения нефтяного разлива. В программу следует ввести информацию об источнике сброса нефти. Пример интерфейса для задания исходных данных приведен на рисунке 3.2.

Программа ориентирована на использование информации об условиях окружающей среды, которую можно получить с места событий. Это может быть скорость ветра, высота волн, температура и соленость воды; тип и количество нефти или разлитого продукта; скорость и продолжительность истечения. В ADIOS2 содержатся сведения о физических свойствах различных типов нефти и нефтепродуктов. К оце-

ниваемым свойствам нефти относятся плотность, вязкость, содержание воды в нефти или нефтепродуктов, скорость испарения и проникновения в воду в виде капель. База данных составлена из различных источников. Она также включает в себя расширенный онлайн-раздел помощи и электронное учебное пособие. Программное обеспечение ADIOS2 ориентировано на составление краткосрочных прогнозов выветривания нефти на срок до 5 дней, пока процессы биодegradации и фотоокисления можно не принимать во внимание.

На рисунке 3.3 показан пример выходной продукции программы ADIOS2. Варианты представления результатов расчетов могут быть разные. В данном документе выбран вариант – «Все графики в одном окне». Информация также предоставляется в текстовом виде.

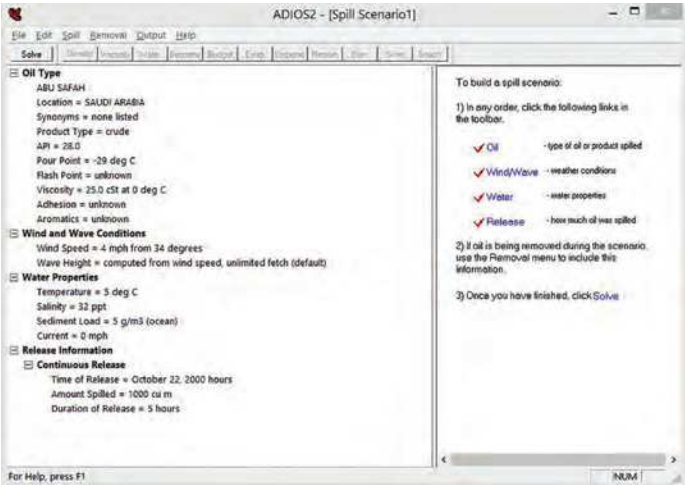


Рис. 3.2. Интерфейс для задания информации о разливе нефти в ADIOS2

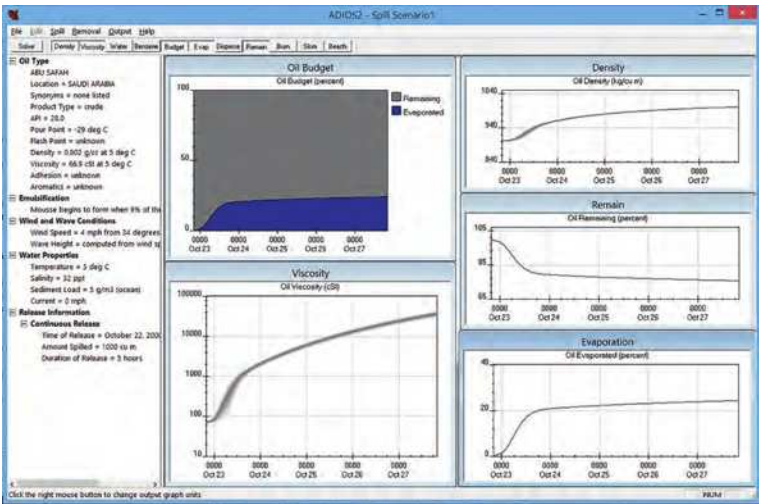


Рис. 3.3. Пример представления результатов расчетов в программе ADIOS2

ADIOS2 является развитием предыдущей версии модели выветривания нефти ADIOS (1994), включает базу данных о физико-химических свойствах более чем тысячи сырых нефтей и нефтепродуктов и обеспечивает быстрые оценки ожидаемых характеристик поведения нефти, пролитой в морскую среду. База данных была скомпилирована в основном из американских и канадских источников. Результаты расчетов представляются в графическом и текстовом виде.

На основании сведений из базы данных и вводимой пользователем информации о скорости ветра, высоте волн, температуре и солености морской воды, сведений об источнике разлива нефти, ADIOS2 позволяет рассчитывать изменения таких характеристик нефти и нефтепродуктов, как плотность, вязкость, содержание воды, количество испарившейся и диспергированной в водную толщу нефти.

К недостаткам модели ADIOS2 следует отнести невозможность расчета траекторий переноса нефтяных загрязнений, достаточно примитивный алгоритм расчета растекания нефти и, следовательно, неизбежные погрешности в расчете площади и конфигурации нефтяного пятна в реальных условиях. К сильным сторонам – безусловно, самую подробную на сегодняшний день базу данных о свойствах различных типов нефти и нефтепродуктов, ориентированную на расчеты физико-химической трансформации в морской среде.

3.2.5. MOHID

В прибрежных водах Португалии и Испании для расчета переноса и трансформации нефтяных загрязнений используется модельный комплекс MOHID, разработанный группой MARETEC в Португальском техническом университете и включающий в себя трехмерную гидродинамическую модель и модуль переноса и трансформации нефтяных загрязнений [Miranda et al., 2000]. Нефтяной модуль учитывает все основные процессы трансформации нефти, включая процессы увеличения плотности и вязкости. После объединения с испанской моделью погоды была образована оперативная система METEOMOHID [Carracedo et al., 2006]. В модели рассчитывается распространение дисперсионного шлейфа в верхнем слое воды.

3.2.6. MEDSLIK-II

MEDSLIK-II – модель для расчетов нефтяных разливов в Средиземном и Черном морях, разработана в итальянском институте INGV (Национальный институт геофизики и вулканологии) [Dominicis et al., 2013a; Dominicis et al., 2013b].

Моделирование производится с использованием метода Монте-Карло. Разлив представлен большим количеством лагранжевых частиц, перенос которых происходит за счет ветра, течений и волнового дрейфа. Учитываются испарение, дисперсия, образование эмульсии и изменение плотности и вязкости нефти. Модель включает в себя модуль расчета подводного выброса.

3.2.7. OilMARS

Разработанная в ААНИИ модель распространения нефтяных загрязнений в арктических ледовитых морях OilMARS (Oil Spill Model for the Arctic Seas) учитывает перенос и трансформацию нефтяных загрязнений на поверхности моря в резуль-

тате аварийных длительных/моментальных разливов нефти от неподвижных или движущихся источников, а также распространение обнаруженных на поверхности моря пятен нефтяных загрязнений [Становой и др., 2007]. Модель работает в трехмерном варианте, рассчитывая внутриводное распространение диспергированной нефти и нефти, погрузившейся в воду. Модель рассчитывает появление и распространение вторичного нефтяного загрязнения на поверхности воды и загрязнение морского дна. Кроме того, модель учитывает влияние сплоченности и дрейфа ледяного покрова на распространение загрязнения, попадание нефти на верхнюю поверхность ледяного покрова и под лед в результате сжатия дрейфующего льда, а также возможность вмержания нефтяного загрязнения в лед [Становой и др., 2012].

Длительный аварийный нефтяной разлив представляется в виде большого числа маленьких дискретных разливов – порций или спиллетов (от англ. spillet), которые с определенной периодичностью поступают от источника загрязнения на поверхность воды.

Начальные массы (объемы) спиллетов (m_0) зависят от задаваемой интенсивности источника (V_{sp}):

$$m_0 = \int_{t_1}^{t_2} V_{sp} dt, \quad (3.1)$$

где $t_2 - t_1 = \Delta t$ (шаг по времени).

При этом интенсивность источника может быть переменной во времени. Предполагается, что дискретные спиллеты независимы друг от друга. Количество спиллетов может быть задано от одного (мгновенный разлив) до любого количества, в зависимости от мощности компьютера. Каждый спиллет имеет набор параметров: координаты, площадь, плотность и вязкость нефти, количество нефти на поверхности воды, количество испарившейся нефти и т.д. Все параметры зависят от времени нахождения данного спиллета на поверхности воды.

Используемый в модели подход дает возможность учесть пространственную неоднородность нефтяного пятна, т.е. в каждый момент времени на поверхности воды находятся спиллеты с разной плотностью, вязкостью, массой и площадью. Кроме того, используемый подход дает возможность учитывать различное положение спиллетов: например, когда часть пятна попала на верхнюю поверхность льда, часть – под лед, часть – осталась на поверхности воды.

К недостаткам используемого подхода можно отнести следующее:

- 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.

Отметим, что площадь и толщина пятна являются важными параметрами при разработке планов ликвидации аварийных разливов нефти (ПЛАРН).

Для расчета переноса спиллетов используется лагранжев подход (уравнения (2.1) и (2.2), гл. 2.1.1) и расчетная сетка, используемая для расчета циркуляции воды. Для

расчета процессов трансформации нефти используется подход Эйлера и сетки с высоким пространственным разрешением.

В модели принимается, что процесс эволюции каждого спиллета проходит две стадии: растекания (соотношения (2.4)–(2.7), гл. 2.1.2) и трансформации. Вследствие малого объема процесс растекания занимает всего несколько часов, в течение которых происходит процесс испарения легких фракций нефти, соответствующее уменьшение массы и увеличение плотности и вязкости нефти. При этом растекающийся спиллет переносится по поверхности моря, и учитывается возможность его выноса к берегу.

После завершения растекания производится адаптация пятна на прямоугольную расчетную сетку с учетом ветрового воздействия. Для каждого спиллета формируется своя расчетная сетка, пространственное разрешение которой (до 10–50 м) зависит от массы данного спиллета.

После завершения процесса растекания продолжает действовать процесс испарения (уравнение (2.9), соотношения (2.10) – (2.12) в альтернативной форме [Ткалин, 1986], гл. 2.1.3), и начинают действовать процессы горизонтальной диффузии, вертикальной дисперсии (уравнения (2.70) – (2.73), гл. 2.2.1) и образования эмульсии «вода-в-нефти» (уравнения (2.18) – (2.32), гл. 2.1.5) с соответствующим увеличением плотности и вязкости нефти (уравнения (2.33) – (2.34), гл. 2.1.6). При этом спиллет переносится по поверхности моря и может быть вынесен к берегу.

На каждом временном шаге производится проверка баланса массы каждого спиллета. Процессы растворения нефти в воде, фотоокисления и биodeградации нефти в модели в настоящий момент не рассматриваются.

Расчет трансформации *каждого* спиллета производится путем решения уравнения диффузии для неконсервативной примеси относительно массы нефти.

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = A_{xi}(t) \frac{\partial^2 m_i}{\partial x_{lit}^2} + A_{yi}(t) \frac{\partial^2 m_i}{\partial y_{lit}^2} + \sum Q_{mi}, \quad (3.2)$$

где m_i – масса (здесь и далее в этом разделе нижний индекс i означает i -й спиллет); $A_{x,yi}$ – коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии, $\sum Q_{mi}$ – потеря массы за счет испарения, вертикальной дисперсии и погружения в воду, δx_{lit} и δy_{lit} – пространственные шаги сетки высокого разрешения для данного спиллета.

Для расчета горизонтальной диффузии используется коэффициент диффузии, зависящий от пространственных размеров пятна примеси [Озмидов, 1986]. В расчетную формулу введен дополнительный коэффициент, зависящий от изменения вязкости нефти:

$$A_{x(y)}(t) = \frac{\mu_o}{2\mu_i} u^* L_{x(y)}^{1.33}, \quad (3.3)$$

где $L_{x(y)}$ – пространственный размер i -го спиллета в x (y) направлении, u^* – скорость диффузии (0,8 см/с), μ_o – начальная вязкость нефти, μ_i – вязкость i -го спиллета.

Как отмечалось в главе 1, внутриводное загрязнение нефтью происходит в результате вертикальной дисперсии частиц нефти при обрушении ветровых волн с возможной последующей адсорбцией капель нефти на взвешенных минеральных частицах и при значительном увеличении плотности нефти при образовании эмуль-

сий типа вода-в-нефти, испарении легких фракций и под влиянием низких температур. В результате пространственной неоднородности плотностной структуры воды нефть может оседать на дно, образуя зоны донного загрязнения, располагаться на верхней границе пикноклина или всплывать на поверхность воды, образуя зоны вторичного загрязнения поверхности моря.

Таким образом, в результате диспергирования и затопления тяжелой нефти может возникнуть множество очагов внутриводного загрязнения с различной плотностью и вязкостью нефти, которые в зависимости от термохалинной структуры воды будут располагаться на разных глубинах.

Для расчета распространения внутриводного загрязнения используется численное решение трехмерного уравнения адвекции и диффузии неконсервативной примеси для всей расчетной области [Становой и др., 2011]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + (w + w_c) \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\mu_w}{\mu_{oil}} \left[\frac{\partial}{\partial x} A_L \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_L \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} A_L \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + \Sigma Q_{subm} + \Sigma q_{disp} + \Sigma q_{agr}, \quad (3.4)$$

где A_L и A_V – горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии, Q_{subm} и q_{disp} – источники загрязнения за счет затопления и вертикальной дисперсии нефти в воду в данный момент времени, q_{agr} – источник загрязнения за счет образования агрегатов нефти со взвешенными минеральными частицами.

Так как плотность и вязкость в разных очагах загрязнения могут быть различны, и предполагается, что они остаются неизменными, уравнение адвекции и диффузии решается одновременно для концентрации углеводородов и произведений концентрации на плотность и вязкость: $\phi = \{C; C \cdot \rho_{oil}; C \cdot \mu_{oil}\}$.

Соответственно, выражения для источников также входят в уравнения в виде источника концентрации и соответствующих произведений. Для уравнения относительно концентрации для каждого (i -го) источника:

$$Q_{isubm} = \frac{m_i}{S_i dh \Delta t} \delta(t - t_{i0}) \text{ и } q_{idisp} = \frac{m_{idisp}}{S_i dh_{wave} \Delta t} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_i \text{ и } \mu_i \text{ данного спиллета,}$$

$$q_{iagr} = \frac{m_{iagr}}{S_i dh_{agr} \Delta t} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_{agr} \text{ и } \mu_i \text{ данного спиллета,} \quad (3.5)$$

где m_i – масса затонувшего объема, m_{idisp} – масса нефти, вбитая волнами в воду, m_{iagr} – масса нефти, образовавшая агрегаты, S_i – площадь, которую занимает данный объем нефти, dh – толщина слоя воды, в котором располагается данный объем затонувшей нефти, dh_{wave} – толщина поверхностного слоя волнового воздействия ($\sim 1,5 H_{wave}$), dh_{agr} – толщина слоя воды, в котором располагается данный объем нефтяных агрегатов, δ – дельта-функция Дирака, t_{i0} – момент действия источника.

На верхней границе ($z = 0$) задается условие непротекания в общем случае или поток углеводородов в данный момент времени в случае образования вторичного загрязнения поверхности воды, когда плотность нефтяного загрязнения в приповерхностном слое становится меньше плотности воды на поверхности:

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = 0 \text{ при } \rho_{oil} \geq \rho_{water}, z = 0^*$$

$$A_v \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = \frac{C_i dh}{\Delta t} \Big|_{z=0} \delta(t - t_{i0}) = - \frac{m_i dh}{\Delta x \Delta y \Delta z \Delta t} \Big|_{z=0} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_{oil} < \rho_{water}, z = 0, \quad (3.6)$$

где dh – толщина верхнего слоя, из которого масса загрязнения уходит на поверхность воды (принимается $dh = 1$ м).

Аналогично на нижней границе ($z = H$) задается условие непротекания в общем случае или поток нефтеуглеводородов в данный момент времени в случае осаждения загрязнения на дно, когда в придонном слое плотность нефтяного загрязнения становится больше плотности воды:

$$A_v \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = 0 \text{ при } \rho_{oil} \leq \rho_{water}, z = H,$$

$$A_v \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = \frac{C_i dh}{\Delta t} \Big|_{z=H} \delta(t - t_{i0}) = \frac{m_i dh}{\Delta x \Delta y \Delta z \Delta t} \Big|_{z=H} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_{oil} > \rho_{water}, z = H, \quad (3.7)$$

где dh – толщина нижнего слоя, из которого масса загрязнения оседает на дно (принимается $dh = 1$ м). После этого отмечаются координаты места осаждения и масса нефти на дне.

На твердых границах принимается условие непротекания.

В модели предполагается, что после формирования эмульсии нефть-в-воде в результате дисперсии часть капель нефти соединяется со взвешенными минеральными частицами, образуя нефтяные агрегаты. В результате происходит увеличение плотности и погружение нефтяных агрегатов на дно или на глубину соответствующей плотности воды⁷.

Количество образовавшихся агрегатов n_{agr} определяется из выражения [Smedsrud, 2002; Sterling et al., 2004]:

$$\frac{dn_{agr}}{dt} = \beta \frac{(d_{oil} + d_{sed})^3}{t_T} n_{oil} n_{sed}, \quad (3.8)$$

где β – параметр, определяющий вероятность образования агрегата, n_{oil} , n_{sed} – количество капель нефти и минеральных частиц в единице объема воды, t_T – временной масштаб Тейлора, d_{oil} – диаметр капель нефти, d_{sed} – диаметр минеральных частиц.

Предполагается, что капли нефти и минеральные частицы соединяются только один раз, при этом $n_{agr} \leq \min(n_{oil}, n_{sed})$.

Количество капель нефти в единице объема воды равно:

$$n_{oil} = C_{dis} / \rho_{oil} \frac{1}{6} \pi d_{oil}^3. \quad (3.9)$$

Соответственно, количество взвешенных частиц:

$$n_{sed} = C_{sed} / \rho_{sed} \frac{1}{6} \pi d_{sed}^3, \quad (3.10)$$

где C_{dis} – концентрация диспергированной нефти в единице объема воды, C_{sed} – концентрация взвешенных частиц в единице объема воды.

⁷ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617155 «Модуль нефть – ил» 09.08.2012 г. Автор: Становой В.В.

Временной масштаб Тейлора определяется как:

$$t_T = \left(\frac{15\mu_T}{\rho_w \varepsilon} \right)^{0.5}, \quad (3.11)$$

где ε – скорость диссипации турбулентной энергии на единицу объема воды, μ_T – динамическая вязкость воды. Параметр β , определяющий вероятность образования агрегата, принимается равным [Sterling et al., 2004]:

$$\beta = \beta_{HET} f_{oil} f_{sed} = \beta_{HET} \frac{V_{oil}}{V_{agr}} \frac{V_{sed}}{V_{agr}} = \beta_{HET} \frac{d_{oil}^3 d_{sed}^3}{(d_{oil}^3 + d_{sed}^3)^2}, \quad (3.12)$$

где f_{oil} и f_{sed} – объемные фракции нефти и седиментов в агрегате, объем агрегата

$V_{agr} = \frac{1}{6} \pi (d_{oil}^3 + d_{sed}^3)$, V_{oil} , V_{sed} – объемы нефти и седиментов в агрегате, β_{HET} – параметр, определяемый в результате лабораторных экспериментов для системы нефть – ил ($\beta_{HET} = 0,58-0,64$).

Плотность полученных агрегатов рассчитывается по формуле [Smedsrud, 2002; Sterling et al., 2004]:

$$\rho_{agr} = \rho_{oil} f_{oil} + \rho_{sed} f_{sed}. \quad (3.13)$$

Вся масса нефтяных агрегатов погружается в воду до глубины, где она имеет нейтральную плавучесть, вероятнее всего – на дно.

На каждом временном шаге (t) производится проверка условия сохранения массы:

$$\left| \iiint_{\Omega} C(x, y, z) dx dy dz \right|_t = \int_0^t (M_{subm} + M_{disp} - M_{sec} - M_{bot}) dt, \quad (3.14)$$

где Ω – расчетная область, $C(x, y, z)$ – концентрация нефтеуглеводородов в воде, M_{subm} – масса затонувшей нефти, M_{disp} – масса нефти, вбитая волнами в воду, M_{sec} – масса нефти, ушедшей на поверхность в виде вторичного загрязнения, M_{bot} – масса нефти, осевшей на дно.

При моделировании переноса и трансформации нефти в ледовых условиях используются результаты расчетов, полученные с помощью динамико-термодинамической модели совместной циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана AARI–IOCM (Arctic and Antarctic Research Institute – Ice and Ocean Circulation Model), которая является результатом объединения трех моделей: модели циркуляции вод, модели дрейфа льда и термодинамической модели морского ледяного покрова [Кулаков и др., 2013]. Используются следующие расчетные параметры в узлах расчетной сетки:

- поле сплоченности ледяного покрова;
- поле толщин льда;
- поле дрейфа льда (направление и скорость).

Толщина и плотность снежного покрова задаются по климатическим данным.

При наличии ледяного покрова учитывается влияние сплоченности ледяного покрова на площадь и толщину спиллета (уравнения (2.42) – (2.43), гл. 2.1.11). По наблюдениям и результатам ретроспективного моделирования [Reed and Aamo,

1994], скорость переноса нефти существенно уменьшается в зависимости от сплоченности льда, и направление переноса нефтяного пятна отклоняется на угол до 60° от предвычисленного направления переноса без учета ледяного покрова. Поэтому при расчетах скорости и направления переноса спиллетов принимается $\vec{U}_{ice} = \alpha \vec{U}_i$, где U_i – вектор скорости движения i -го спиллета на открытой воде; $\alpha = (1 - C_{it})$ – коэффициент, зависящий от сплоченности льда в ближайших узлах сетки:

$$C_{itx} = C_{xy} + u_i \frac{\partial C_{ice}}{\partial x} \Delta t, \quad (3.15)$$

$$C_{ity} = C_{xy} + v_i \frac{\partial C_{ice}}{\partial y} \Delta t$$

где C_{xy} – сплоченность льда в точке нахождения данного спиллета; $\frac{\partial C_{ice}}{\partial x, y}$ – градиенты сплоченности льда по осям координат. При заходе спиллета в зону большей сплоченности льда производится соответствующее уменьшение площади спиллета с сохранением массы.

При сжатии и торошении льда нефть будет заплескиваться на поверхность льда или уходить под ледяной покров. Принимается, что при сплоченности льда более 9 баллов и скорости сжатия менее 0,12 м/с вся масса спиллета оказывается подо льдом. При скорости сжатия более 0,12 м/с вся масса спиллета попадает на верхнюю поверхность льда («lead pumping») [Fingas and Hollebone, 2003].

Для расчетов процесса растекания нефти на верхней поверхности снежно-ледяного покрова используются полуэмпирические параметризации ((2.44) – (2.48), гл. 2.1.11). После расчета процессов растекания и впитывания на данном временном шаге, производится расчет процесса испарения с поверхности (расчет испарения впитавшейся нефти не производится) и расчет переноса пятна нефти дрейфующим льдом.

Для расчетов процесса растекания и перемещения нефти под ледяным покровом используются полуэмпирические параметризации ((2.49) – (2.53), гл. 2.1.11). Для определения параметра усиления (K) в уравнении (2.54) используются результаты расчета толщины льда в узлах расчетной сетки. Производится расчет градиентов толщины льда (h_{ice}) в ближайших точках (по оси u аналогично):

$$h_{ice1} = h_{ice0} + u_{oil} \Delta t \frac{\partial h_{ice}}{\partial x}, \delta h_{ice} = h_{ice1} - h_{ice0}. \quad (3.16)$$

Принимается, что $K = 1$ при $-0,25 \leq \delta h_{ice} \leq 0,25$, т.е. лед считается ровным, если его толщина на расстоянии $u_{oil} \Delta t$ меняется не более, чем на 0,25 м [Wadhams et al., 1985]. При $\delta h_{ice} < -0,25$, $K = 0$ (нефть поднимается) и при $\delta h_{ice} > 0,25$, $K = 2$ (нефть опускается).

При скорости течения больше критической учитывается вероятность, что нефтяное пятно будет вынесено из-под ледяного поля и всплывет на поверхность воды, образуя вторичное загрязнение.

На рисунке 3.4 показан расчет по модели OilMARS распространения гипотетического разлива нефти в ледовых условиях.

При моделировании переноса пятен нефтепродуктов предполагается, что координаты и размеры пятна известны (например, по спутниковой информации). Однако

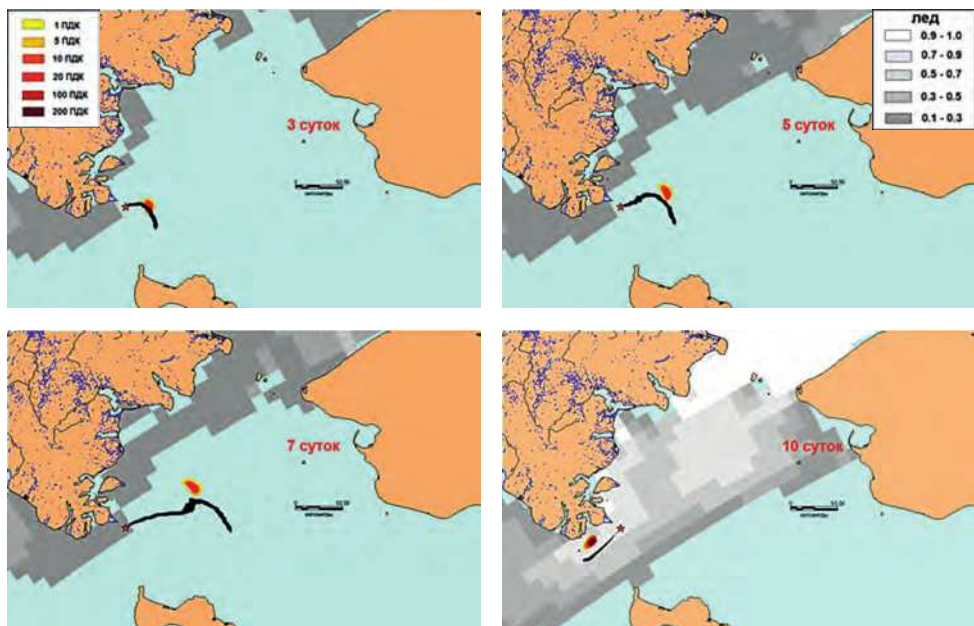


Рис. 3.4. Положение пятна нефти на поверхности воды и концентрация загрязнения на глубине 2,5 м

время, когда нефтяное загрязнение оказалось на морской поверхности, неизвестно. Физические и химические свойства нефти (или топлива) могут быть неизвестны (наиболее вероятный случай) или известны. В модели рассматриваются оба случая. В модели также рассмотрены варианты прямого прогностического расчета (куда пойдет пятно) и обратного расчета (откуда пятно пришло).

Нефтяные пятна на спутниковых снимках обычно имеют вытянутую форму, но могут принимать и достаточно причудливую форму в зависимости от особенностей морской циркуляции в рассматриваемой акватории. Для задания начальной формы пятна вводятся координаты оконтуривающих пятно реперных точек (не менее 3). Образующийся неправильный многоугольник равномерно и плотно заполняется частицами (трассерами) с известными или неизвестными свойствами. Для расчета переноса трассеров используется лагранжев подход и расчетная сетка, используемая для расчета циркуляции воды.

Оперативный вариант модели OilMARS использует оперативно-прогностические динамические и термохалинные поля и предполагает отсутствие какого-либо заранее определенного сценария [Становой и др., 2011]. Расчет производится по двум веткам – оперативной (диагноз) и прогностической (прогноз). Прогностические результаты расчета могут совпадать с диагностическими только при полной оправданности прогноза метеорологических полей, а также при неизменности параметров разлива.

При расчете длительного аварийного разлива предлагается следующая коррекция:

- *состояние расчета*: расчет прекращается или продолжается. Прекращение расчета происходит, когда в результате процессов трансформации либо в результате оперативных мероприятий по ликвидации разлива дальнейший расчет становится нецелесообразным.

- При продолжении разлива предлагается следующая коррекция параметров разлива:
- *изменение положения источника*. В этом случае вводятся новые координаты аварийного объекта;
 - *прекращение выброса* и поступления нефти на водную поверхность (например, в результате устранения пробойны в борту судна);
 - *изменение скорости выброса*. Сохранение скорости выброса в течение нескольких дней маловероятно;
 - *изменение скорости и направления движения источника*. Вводятся новая скорость и направление перемещения источника, которые считаются постоянными до следующей коррекции;
 - *новые пятна*. Предусмотрена возможность появления новых пятен, расчет перемещения которых производится параллельно с производимым расчетом.

3.2.8. SPILLMOD

SPILLMOD⁸ – программный комплекс, представляющий собой реализацию математической модели распространения и трансформации разлива нефти на поверхности моря и других водных объектов, основанной на решении квазидвумерных уравнений движения в области со свободными и подвижными контактными границами. Программа позволяет рассчитывать конфигурацию, распределение толщин и последовательные положения нефтяного пятна после аварийного разлива в море. Программа реализует вычислительную технологию, являющуюся развитием метода частиц в ячейках, использует адаптивные эйлеровы и лагранжевы сетки и обеспечивает получение результатов при учете основных процессов физико-химической трансформации нефти, в том числе с учетом возможных мер противодействия – постановки боновых заграждений, сбора нефти судами-нефтесборщиками, применения диспергаторов, сжигания нефти на месте.

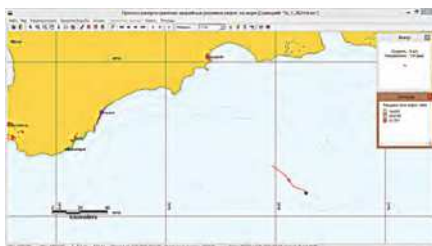
Программный комплекс SPILLMOD позволяет проводить расчеты распространения нефти в море после аварийного разлива, сохранять результаты в виде изображений и таблиц в формате EXCEL для передачи потребителю, воспроизводить посчитанный ранее сценарий аварийной ситуации в виде анимации последовательных конфигураций нефтяного пятна от момента начала работы источника сброса и до окончания расчетов.

На рисунке 3.5 показан расчет по модели SPILLMOD последовательных конфигураций разлива при распространении гипотетического разлива нефти в результате аварийного сброса, продолжавшегося в течение 72 часов.

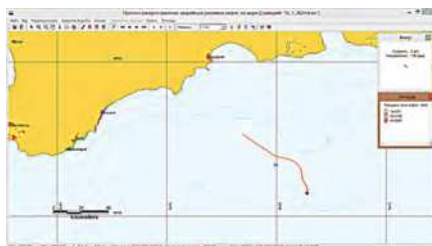
Рисунок 3.6 демонстрирует возможность программного комплекса SPILLMOD рассчитывать конфигурацию поля нефтяного загрязнения, включая распределение толщины, в условиях ограниченной акватории с учетом контактных границ, роль которых в данном случае выполняют портовые сооружения.

Все приведенные выше модели нефтяных разливов в море реализованы как программные продукты. В то же время для оценки применимости той или иной модели необходимо проанализировать, какая задача решается с помощью конкретной

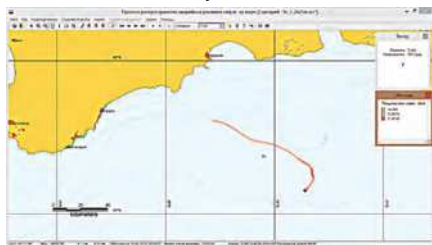
⁸ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612856 «Модель прогноза/расчета распространения и трансформации аварийного разлива нефти в море (SPILLMOD)». Авторы: Овсиенко С.Н., Ивченко А.А., Зацепя С.Н.



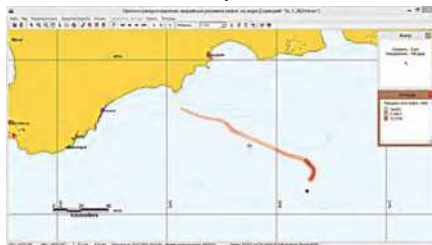
1 сутки



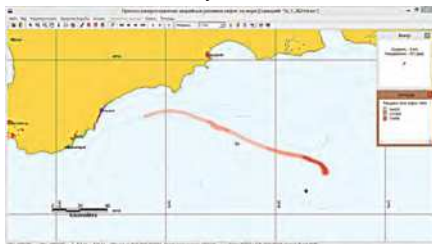
2 сутки



3 сутки



4 сутки



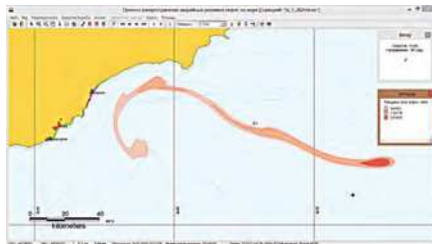
5 сутки



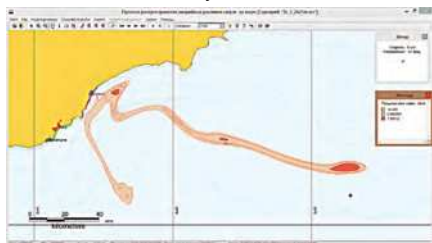
6 сутки



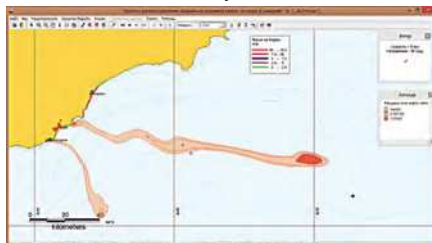
7 сутки



8 сутки



9 сутки



10 сутки

Рис. 3.5. Пример моделирования распространения разлива нефти в Черном море с помощью модели SPILLMOD

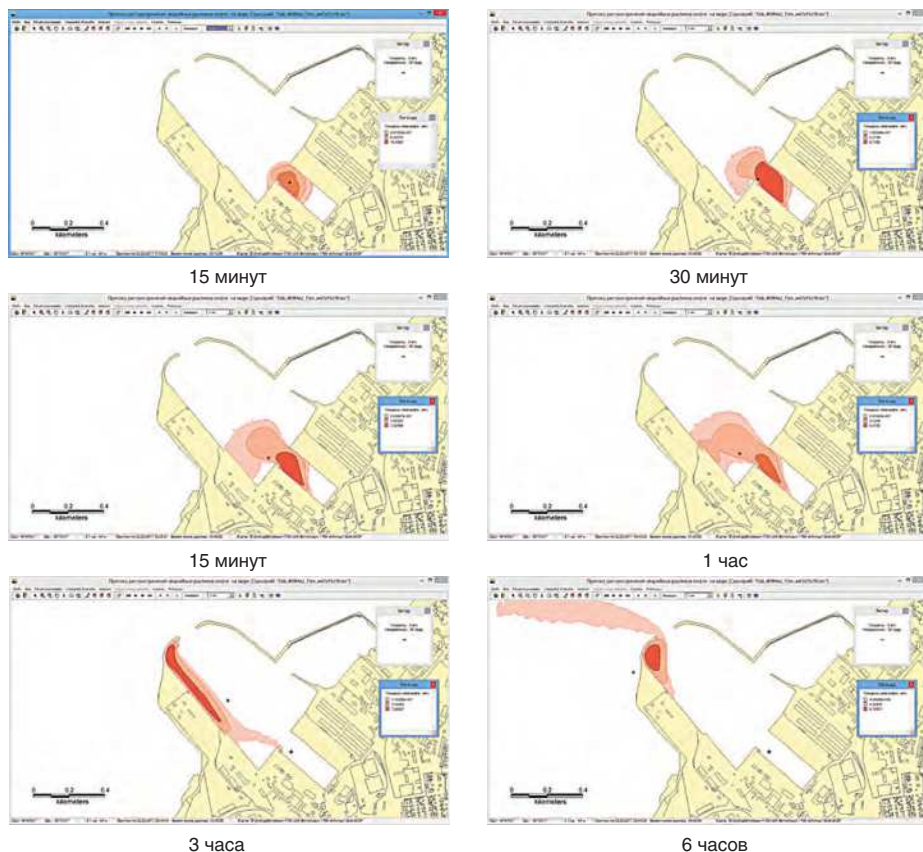


Рис. 3.6. Пример расчета разлива мазута в порту г. Ейск по модели SPILLMOD

модели, в какой мере в модели упрощается описание основных процессов и их взаимосвязи.

Так, например, как следует из описания процессов, определяющих судьбу нефти в море (гл. 1), ряд характеристик нефтяного разлива поддаются оценке с помощью относительно простых расчетных соотношений (гл. 2). К таким характеристикам относятся:

- координаты центра разлива или отдельных его частей в различные моменты времени;
- площадь нефтяного пятна для некоторых режимов сброса нефтепродуктов⁹;
- количество нефти, испарившейся в атмосферу;
- количество нефти, проникшей в верхний слой моря в виде капель;
- изменения плотности и вязкости нефти, возможность образования эмульсии типа вода-в-нефти.

⁹ Аналитические соотношения, позволяющие сделать оценку площади нефтяного пятна, получены лишь для залпового (одномоментного) сброса нефти и сброса нефти с постоянным расходом, в том числе при постоянной скорости течения.

При использовании более сложных в вычислительном отношении моделей появляется возможность получения параметров нефтяного загрязнения с большей точностью и в расширенной номенклатуре, например, изменения площади нефтяного пятна в результате обтекания препятствий или под действием пространственно-неоднородного поля скорости течения, или распределение толщины слоя нефти, что может быть важным при оценке достаточности количества боновых заграждений для локализации разлива.

Важно понимать, что успешное применение той или иной модели для расчета конкретного инцидента, связанного со сбросом в морскую среду нефти или нефтепродуктов, не всегда дает достаточные основания для того, чтобы рассчитывать на столь же результативное использование модели на других морских акваториях или в иных гидрометеорологических условиях.

3.3. Технологическая линия прогнозирования

3.3.1. SPILLMOD (Россия)

При наличии какой-либо из моделей нефтяного разлива, развернутой на вычислительных средствах, которые пригодны для составления прогноза распространения нефти в море, возможно организовать технологическую линию (ТЛ) прогнозирования. Приведем пример создания подобной ТЛ для прогнозирования распространения аварийных разливов нефти в Баренцевом и Белом морях с использованием модели SPILLMOD (рисунок 3.7).

В состав ТЛ входят аппаратно-программные средства (АПС) для реализации регионального метеорологического прогноза (в составе АСООИ), АПС для прогноза течений и уровня Баренцева и Белого морей (в составе АСООИ), ПК SPILLMOD в составе АРМ дежурного океанолога Северного УГМС.

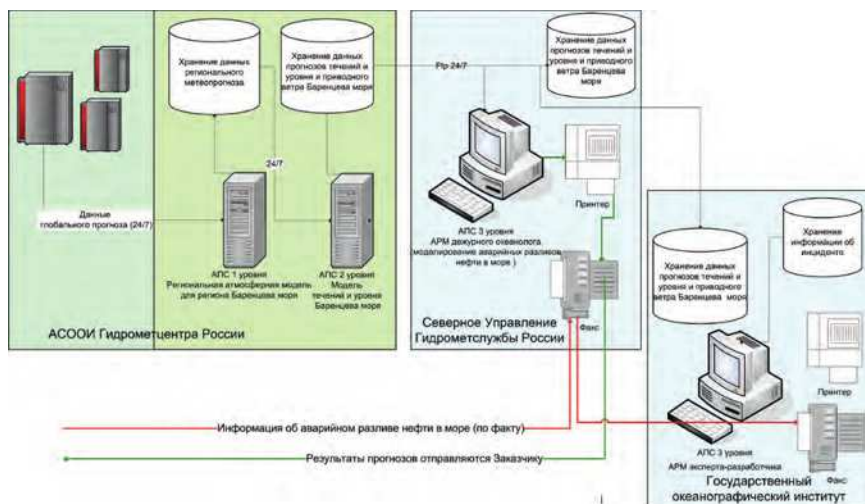


Рис. 3.7. Схема технологической линии прогнозирования аварийных разливов нефти для Баренцева моря в период открытой воды

Модуль регионального метеорологического прогноза предназначен для обеспечения исходной прогностической информацией модуля прогноза течений и уровня Баренцева и Белого морей. Модуль прогноза течений и уровня обеспечивает информацией о течениях и приводном ветре ПК SPILLMOD. ПК SPILLMOD предназначен для проведения расчетов распространения и трансформации аварийных разливов нефти в море, подготовки результатов расчетов для передачи их потребителю.

Как показано на схеме, на рабочее место специалиста, в чью задачу входит составление прогноза распространения нефти в результате аварийного сброса в море, дважды в сутки по расписанию передаются прогнозы приводного ветра, течений и уровня моря. В результате прогнозисту необходимо ввести данные об аварии: координаты, время начала аварии (время обнаружения), тип нефти или нефтепродукта, интенсивность или объем сброса, и запустить программу для решения математической задачи.

После окончания расчетов необходимо подготовить справку о результатах прогноза распространения нефти, согласованную с заказчиком прогноза, например, по примерной форме, указанной в приложении к настоящему пособию.

Технологические линии для прогнозирования распространения аварийных разливов нефти в море могут быть созданы и запущены в эксплуатацию после введения в оперативную практику региональных метеорологических моделей и гидрологических моделей для интересующих водных объектов. Пространственное разрешение моделей должно обеспечивать репрезентативность описания особенностей циркуляции в этих объектах, достаточное для достижения приемлемой точности прогноза распространения нефти.

Технологическая линия прогнозирования состоит из распределенных модулей, выделяемых по функциональному назначению. В состав основных технологических элементов входит (для рассмотренного примера):

- модуль краткосрочного регионального прогноза метеорологических полей;
- модуль прогноза течений и уровня Баренцева и Белого морей;
- модуль расчета/прогноза эволюции нефтяных загрязнений на поверхности моря (программный комплекс SPILLMOD).

Взаимодействие технологических элементов осуществляется путем файлового обмена информацией по протоколам и технологиям Интернет/Инtranет.

Вычислительное ядро (АПС первого уровня для ТЛ) прогностической схемы основано на региональной модели краткосрочного прогноза метеорологических полей, разработанной и работающей в режиме 24/7 в ФГБУ «Гидрометцентр России». Расчет проводится на АПК АСООИ, сопровождаемой специалистами ФГБУ «Гидрометцентр России». Прогноз выпускается два раза в сутки по начальным данным от 00 и 12 часов ВСВ.

Оперативный прогноз течений и уровня Баренцева и Белого морей выпускается на АПС (АПС второго уровня для ТЛ) АСООИ. Прогноз составляется 2 раза в сутки (на 00 и 12 час ВСВ) на основе модели течений и уровня Баренцева и Белого морей, разработанной в лаборатории морских прикладных исследований Гидрометцентра России (авторы Попов С.К., Лобов А.Л.). Модель работает в режиме 24/7. Заблаговременность прогностических полей достигает 48 час, с дискретностью представления прогностических полей – 1 час.

Выходная прогностическая продукция поступает в специализированную базу данных с периодом хранения информации 5 суток. Далее посредством специальных процедур с минимальной задержкой по времени соответствующая выборка информации из этой базы данных поступает на оперативные ресурсы ЕСИМО Гидрометцентра России и становится доступна всем заинтересованным лицам и организациям (по подписке).

Каждые сутки на соответствующие ресурсы поступают два набора данных с результатами расчетов по гидродинамической модели прогноза от 00 и 12 час ВСВ. Хранение данных организовано в форме циклического набора файлов с периодом цикла 31 сутки. Свежие файлы за текущие сутки замещают файлы месячной давности за тот же день месяца. Таким образом, в каждый момент времени пользователь имеет доступ к данным за последние 31 сутки.

Модуль расчета распространения и трансформации аварийных разливов нефти в море реализует в данном примере ПК SPILLMOD, обеспечивающий на основе данных гидрометеорологических прогнозов расчет/прогноз последовательных положений и конфигурации нефтяного загрязнения на поверхности моря.

ПК SPILLMOD запускается по факту поступления информации о разливе нефти или нефтепродуктов, которая в соответствии с заранее разработанным регламентом поступает либо из служб мониторинга, либо от виновника аварии.

В приложение к пособию содержится инструкция по использованию модели «SPILLMOD». Результаты расчетов по модели SPILLMOD использованы в «Примерной форме справки о прогнозе распространения аварийного разлива нефти и нефтепродуктов» (в приложении). Инструкция приведена в ознакомительных целях, для демонстрации многочисленных вопросов, которые могут возникнуть у пользователя моделей нефтяных разливов.

Когда прогнозирование распространения аварийного разлива нефти осуществляется на основе неполной или недостоверной информации об источнике разлива, а гидрометеорологические условия в регионе прогнозируются с погрешностью, есть все основания полагать, что прогнозируемая конфигурация зоны нефтяного загрязнения будет отличаться от реально наблюдаемой. В этой ситуации желательно проводить интерпретацию результатов прогнозирования с учетом погрешностей в задании начальных данных и ошибок гидрометеорологического прогноза.

3.3.2. SeaTrackWeb (Швеция)

Обратим внимание на то, что для реализации прогноза распространения нефти в море нужно иметь информацию о разливе (1), результаты расчетов характеристик атмосферы над морем (2), результаты расчетов по модели прогноза морских течений и других гидрологических параметров (3), модель нефтяного разлива (4). При существующем уровне развития коммуникаций все эти компоненты могут находиться в разных местах, представляя вместе распределенную технологию моделирования.

В предыдущем разделе был представлен образец технологии прогнозирования, когда гидрометеорологические прогнозы осуществляются в Москве, в Гидрометцентре России, информация об аварии приходит в Северное УГМС, где оборудовано рабочее

место для реализации модели прогноза распространения нефти и передачи прогнозов Заказчикам. Шведская технология прогнозирования реализована в виде web-сервиса.

Модель SeaTrackWeb разработана Шведским гидрометеорологическим институтом (SHMI) совместно с FCOO (Центр оперативной океанографии при МО Дании), BSH (Федеральное морское и гидрографическое агентство) ФРГ и FMI (Метеорологический институт Финляндии). Модель размещена в Интернете по адресу <https://stw.smhi.se>. Для пользования сервисом нужна авторизация (доступен только для партнеров SHMI, либо на коммерческой основе). Для прогнозов в SeaTrackWeb используются поля течений из скандинавской части европейской модели циркуляции NEMO (Nucleus of European Modelling of the Ocean), охватывающей всю Балтику и часть Северного моря. Метеорологические поля, используемые в SeaTrackWeb, поступают из ECMWF (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) на 8 дней вперед и 3 дня назад относительно текущей даты. Модели NEMO/ ECMWF обеспечивают SeaTrackWeb актуальными прогнозами гидрометеорологических полей с шагом по времени один час и горизонтальным разрешением 2 морских мили. Сервис предназначен только для акватории Балтийского моря, включая проливы Каттегат и Скагеррак, и части Северного моря до 30° в.д.

Кроме собственно разливов нефти, модель способна рассчитывать распространение водорослей, а также других плавающих на поверхности моря объектов с заданным коэффициентом переноса. Модель SeaTrackWeb используется HELCOM для оперативного прогноза дрейфа нефтяных загрязнений на акватории Балтики и установления виновников загрязнений, благодаря встроенной оперативной системе автоматической идентификации судов (Automatic Identification System, AIS).

Пользователю предлагается ввести данные о положении нефтяного разлива, типе нефти, вероятном объеме и продолжительности разлива и других параметрах прогноза. Допускается задание мгновенного, продолжительного разлива, а также разлива произвольной конфигурации непосредственно на карте, либо в виде таблицы координат, что позволяет использовать данные наблюдений.

В основе модели распространения нефти используются лагранжевы алгоритмы, которые вместе с алгоритмами трансформации и выветривания позволяют рассчитывать эволюцию нефтяного загрязнения на период до 10 суток. При этом пользователю предлагается выбрать один из трех режимов точности вычислений, в которых используется от 10 до 2000 лагранжевых элементов. Тип нефти выбирается из 3-х категорий (легкая, средняя и тяжелая), либо из нескольких более конкретных типов, классифицированных по удельному весу и вязкости.

Выходная информация отображается на карте либо в виде траектории, либо в виде положения частиц, с возможной классификацией по глубине, а также выводятся графики основных параметров разлива.

Для расчета переноса плавающих объектов возможен режим ретроспективного прогноза.

С инструкцией по работе с программой SeaTrackWeb можно ознакомиться по ссылке http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.15599!Seatrack%20Web%20manual.pdf или <https://stw.smhi.se/player/help/classic>. Сервис доступен только для расчета инцидентов, произошедших на акватории Балтийского моря.

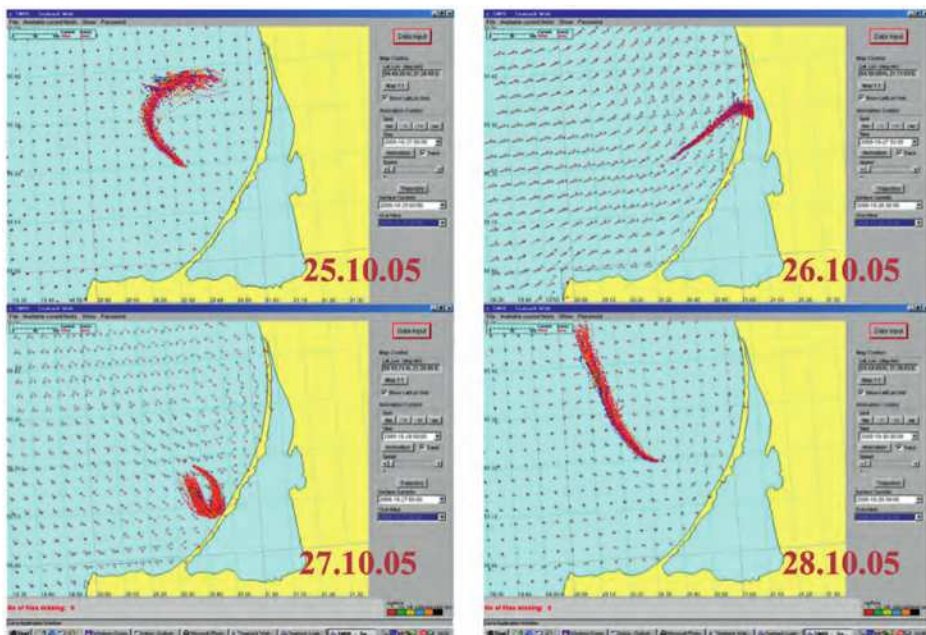


Рис. 3.8. Пример расчета распространения гипотетического нефтяного загрязнения от платформы Д6 в Балтийском море

3.3.3. ГеоЕСИМО (Россия)

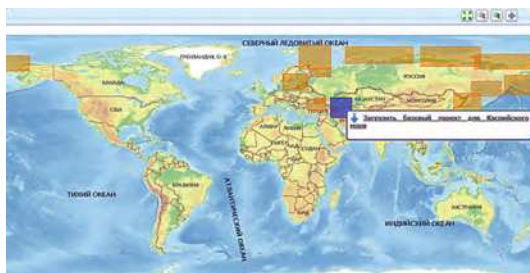
В рамках проекта создания Единой системы информации об обстановке в Мировом океане в России был реализован похожий проект, но с некоторыми особенностями.

В ЕСИМО разработаны расчетно-модельные комплексы (РМК), применяемые для решения ряда прикладных задач, связанных с исследованием и мониторингом Мирового океана [Гитис и др., 2012]. РМК реализованы как в виде серверных приложений, так и настольных решений. В качестве интерфейса пользователя разработана многофункциональная динамическая ГИС ГеоЕСИМО.

На портале ЕСИМО пользователям доступен сервис ГеоЕсимо по ссылке <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/services/geoesimo>. Далее пользователь может выбрать один из районов российского континентального шельфа или внутренних морей, для которых реализован проект ГеоЕСИМО. На рисунке 3.9 показан пример выбора акваторий Каспийского (а) и Баренцева моря (б).

Полупрозрачные прямоугольники показывают районы, для которых приложение ГеоЕСИМО создано в базовой версии. Для Каспийского, Баренцева и Черного морей в региональный проект ГеоЕСИМО включены и модельно расчетные комплексы для экспресс-анализа распространения аварийных разливов нефти.

Прогнозы течений и ветра по этим морям дважды в день поступают на сервер в ГОИН, где расположены расчетно-модельные комплексы (РМК) для реализации прогнозов распространения нефти. Заказчику прогноза необходимо отправить задание на расчет и дождаться окончания расчетов.



a



6

Рис. 3.9. Стартовое окно сервиса ГеоЕСИМО



Рис. 3.10. Стартовое окно для выбора РМК

Принципиальным отличием от шведского варианта распределенной системы прогнозирования является наличие ГИС-интерфейса пользователя Гео-ЕСИМО, разработанного в Институте проблем передачи информации имени А.А. Харкевича (ИППИ РАН). Стартовое окно проекта для Баренцева и Белого морей показано на рисунке 3.10.

ГИС ГеоЕСИМО предоставляет пользователю разнообразные возможности работы с картой – изменять масштабы, измерять расстояния, добавлять слои, совмещать разнообразную информацию и пр.

Пользователь формирует свой запрос к прикладной задаче в ГИС-приложении Гео-ЕСИМО с применением формы ввода начальных данных.

В Гео-ЕСИМО создается слой «Разлив нефти», который появляется в древовидном списке слоев ГИС-приложения. При переходе на пошаговую схему расчетов на РМК этот слой должен пополняться полигонами, характеризующими положение, форму, толщину пятна на каждом шаге моделирования разлива для текущих моментов прогноза. В список слоев добавляется также слой с источником разлива.

ГИС-приложение Гео-ЕСИМО передает параметры задания в объект RMC-service, в котором формируется запрос к веб-сервису. Для исключения «зависания» заданий, Гео-ЕСИМО контролирует заданное пользователем время работы РМК и по его истечении (если РМК к этому моменту еще не закончил задание) прерывает расчет.

Веб-сервис производит проверку запроса и в случае его правильности передает запрос и инициализирует запуск РМК в соответствии с региональным идентификатором. Если запрос не прошел валидацию, в Гео-ЕСИМО возвращается сообщение об ошибке. На каждый запрос, пришедший от ГИС на веб-сервис, запускается отдельное приложение, которое работает в одном потоке. Разделение прав осуществляется через ограниченный доступ к веб-сервису, который находится в закрытой сети, доступ к которой осуществляется через VPN. Веб-сервис должен обеспечить доставку в Гео-ЕСИМО результатов расчетов РМК для последовательных моментов прогноза.

Рис. 3.11. Задание параметров для расчета на РМК «Разлив нефти»

На каждом шаге расчетов полученные данные о параметрах разлива – условных координатах центра нефтяного пятна, количестве нефти на поверхности моря, испарившейся, диспергированной нефти – записываются в текстовый файл. Кроме того, формируются файлы в формате ArcGIS для отображения контуров толщины нефти внутри области загрязнения с расширениями *.shp, *.dbf, *.prj и *.shx. Имена файлов состоят из названия файла-запроса, созданного при формировании задания, и номера шага прогнозирования. Выходные файлы размещаются на сервере ГОИНа.

На рисунках 3.12 и 3.13 показаны примеры визуализации в Гео-ЕСИМО результатов расчетов с помощью расчетно-модельных комплексов, расположенных на серверах ГОИНа. Предусмотрена возможность формирования параллельно нескольких заданий, для каждого из которых определяются свои названия.

На увеличенном фрагменте карты показаны точка разлива, прогноз положения пятна и расстояние до ближайшего судна. Выходная продукция прогнозирования может быть экспортирована в формате KML из ГИС Гео-ЕСИМО в популярный картографический сервис Google Планета Земля (Google Earth), как показано на следующем рисунке. Точка разлива показана символом «+».

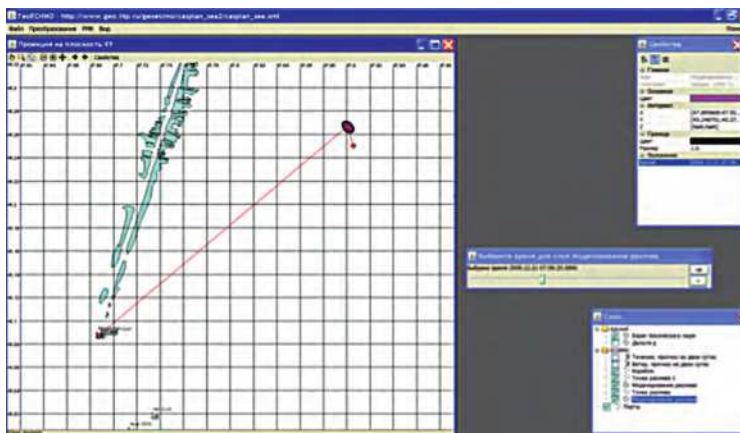


Рис. 3.12. Анализ данных моделирования разлива нефти в Каспийском море

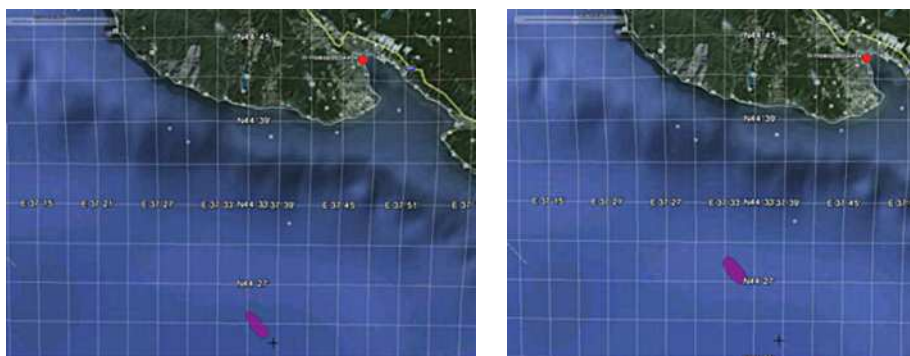


Рис. 3.13. Визуализация временных срезов моделирования нефтяного пятна в Google Earth

Гео-ЕСИМО предоставляет разнообразные средства анализа результатов моделирования. Масштаб отображения регулируется соответствующими кнопками на панели в окне карты или колесиком мыши. На рисунке 3.14 показан пример вывода атрибутов нефтяного пятна: идентификатор задания, время разлива нефти, расчетное время и толщина нефтяного слоя в точке измерения (центр пятна).

Разлив нефти может отображаться для моментов времени, кратных шагу времени прогноза, и в виде анимации последовательных моментов прогноза. Режим визуализации управляется из окна вкладки «Время» раздела «Положения» в окне «Свойства». Атрибутивная информация, привязанная к полигонам, отображающим прогноз разлива нефти для определенных моментов времени, выводится либо в виде таблицы (режим «Информация») для всех рассчитанных моментов времени, либо в виде строки для выбранного курсором на карте полигона. Выбор режима «Информация/Показать_атрибуты» осуществляется из окна, открывающегося по ПКМ на имени активного слоя. В опции «Показать атрибуты» можно зафиксировать ЛКМ выбранный курсором полигон и соответствующую ему строку атрибутов. Для продолжения просмотра в окне строки атрибутов используется кнопка «Просмотр».

Карта, таблица, строка атрибутов, окно легенды карты могут быть экспортированы в Word-документ по команде «DOC» в соответствующем окне. Пользователь может написать в документ необходимый комментарий.

Пример вывода атрибутивной информации в табличной форме показан на рисунке 3.15.

К преимуществам распределенных систем прогнозирования аварийных разливов нефти стоит отнести тот факт, что серьезные вычислительные ресурсы, необходимые для реализации прогнозов атмосферных и гидрологических характеристик, размещаются в соответствующих крупных научных центрах, а задание на расчет может быть отправлено даже с мобильного телефона. К недостаткам можно отнести

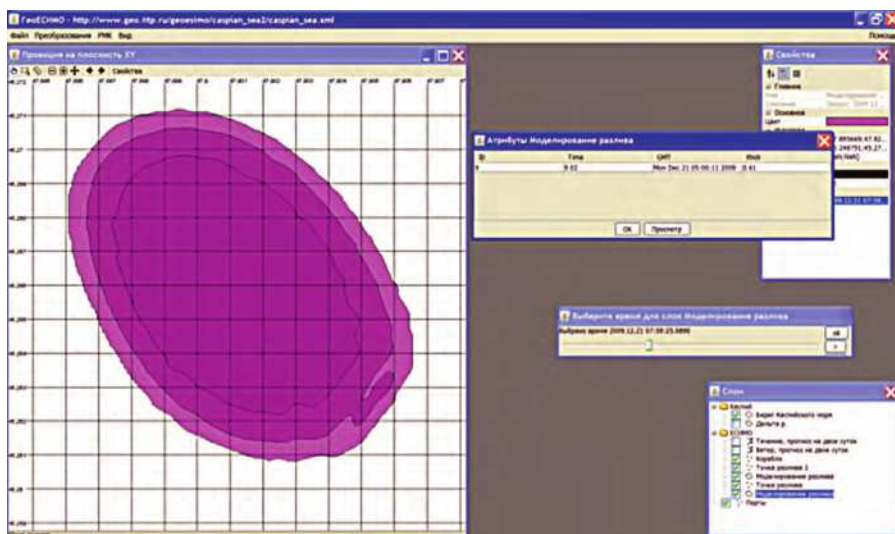


Рис. 3.14. Пример вывод информации о разливе в Гео-ЕСИМО

лишь необходимость в дальнейшем перенести полученный архив с данными расчета на компьютер с подходящей ГИС, чтобы аккумулировать данные, необходимые для принятия управленческих решений. Другим недостатком данного распределенного варианта прогнозирования (и шведского, и российского) является невозможность проведения расчетов с учетом средств противодействия разливу нефти с использованием моделей боновых систем и судов нефтесборщиков, как, например, в программе SPILLMOD.

В настоящее время в оперативном режиме данные гидрометеорологических прогнозов доступны не для всех морских акваторий России. Описанный выше вариант экспресс-анализа распространения нефти реализован для Каспийского, Баренцева морей и части акватории Черного моря, примыкающей к Кавказскому побережью.

Атрибуты Суда						
Описание						
Платформ...	Судно: курс	Судно: ско...	Дата и вре...	X	Y	T
Павел Щепе...	330.0	0.0	Thu May 22 ...	133.0815	42.747667	2008-05-22 ...
Триал	15.0	0.0	Fri May 23 1...	30.280833	59.9345	2008-05-23 ...
Улан-Удэ	99.0	0.0	Sat May 24 0...	91.763333	22.208833	2008-05-24 ...
Профессор ...	0.0	0.0	Fri May 30 0...	131.852167	43.103833	2008-05-30 ...
Вилир	0.0	0.0	Sat Jun 07 0...	26.895167	38.805833	2008-06-07 ...
Нефтегаз-52	30.9	0.0	Wed Jul 02 0...	120.952091	39.891014	2008-07-02 ...
Фортуна	354.0	0.0	Thu Jul 03 0...	39.577833	47.171333	2008-07-03 ...
Аметистовый	140.0	0.0	Tue Aug 05 ...	129.004167	35.079833	2008-08-05 ...
Мунринский	159.0	0.0	Wed Aug 06 ...	33.0515	68.966667	2008-08-06 ...
OT-2016	56.0	0.0	Sun Aug 10 ...	40.728667	64.479333	2008-08-10 ...
Белонорски...	299.0	6.0	Tue Aug 12 ...	28.689333	60.220833	2008-08-12 ...
Белонорски...	132.0	6.0	Thu Aug 14 ...	30.612167	59.803167	2008-08-14 ...
Арктика	254.0	5.6	Wed Aug 20 ...	33.257333	69.076667	2008-08-20 ...
Яснонорский	49.0	0.0	Tue Aug 26 ...	131.8885	43.088667	2008-08-26 ...
Александрит...	289.0	0.0	Wed Aug 27 ...	33.029	68.946333	2008-08-27 ...
ОТА-992	128.0	5.0	Tue Sep 23 ...	67.105333	62.194667	2008-09-23 ...
Лучезарный	122.0	0.0	Tue Sep 23 ...	131.887667	43.088667	2008-09-23 ...
Николай Ром...	34.0	0.0	Thu Sep 25 ...	49.516667	53.45	2008-09-25 ...

Рис. 3.15. Пример вывода текстовой информации в Гео-ЕСИМО

4. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОГНОЗА

4.1. Информация об источнике аварии

4.1.1. Информация по данным МЧС, МСКЦ или РСЧС

Составление прогноза распространения аварийного разлива нефти возможно при наличии информации об источнике разлива нефти, гидрометеорологических условиях в точке разлива и на прилегающей акватории. В первую очередь специалист по прогнозированию разливов нефти должен получить ответ на 4 вопроса.

1. Что разлилось? – Тип нефти или нефтепродукта.
2. Где разлилось? – Координаты аварии.
3. Когда разлилось? – Время аварии.
4. Сколько нефти или нефтепродукта попало в море? – Объем сброса.

Источниками разливов нефти в море являются объекты нефтедобычи (разведочные и добычные платформы) и транспортировки нефти (трубопроводы и танкеры), а также аварии на судах обеспечения, перевозящие судовое топливо и мазут. Сброс нефти при аварийной ситуации может продолжаться длительное время.

Следует признать, что во время аварии, как правило, неизвестно, сколько нефти вытечет до момента ее локализации. Как должен действовать прогнозист в условиях отсутствия информации о масштабе сброса и режиме истечения?

1. При отсутствии информации о режиме истечения следует использовать консервативные оценки. Как правило, приблизительный режим сброса определяется в зависимости от типа источника (танкер, скважина, трубопровод) и характера аварии. Продолжительность сброса нефти можно приблизительно определить, разделив примерный объем сброса на предполагаемый расход в единицу времени. Уточнение информации о разливе необходимо производить постоянно в течение всей кампании по борьбе с разливом, и прогноз должен обновляться каждый раз после поступления новых данных о типе нефти и характеристиках сброса, а также новых прогнозов течений и ветра.

При невозможности получения информации об объеме и интенсивности утечки нефти или нефтепродукта при аварии прогнозирование следует проводить, исходя из максимально возможных значений, указанных в Постановлении Правительства Российской Федерации от 14 ноября 2014 г. № 1189¹⁰, а именно:

- а) нефтеналивные самоходные и несамоходные суда, суда для сбора и перевозки нефтесодержащих вод, плавучие нефтехранилища, нефтенакопители и нефтеналивные баржи (имеющие разделительные переборки) – 2 смежных танка максимального объема. Для указанных судов с двойным дном и двойными бортами – 50% 2 смежных танков максимального объема;
- б) нефтеналивные баржи (не имеющие разделительных переборок) – 50% их общей грузоподъемности;

¹⁰ 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.

в) морские поисковые, разведочные и эксплуатационные скважины – объем нефти, рассчитанный за 3 суток по одной фонтанирующей скважине с максимальным дебитом;

г) морские нефтяные терминалы, причалы в морском порту, выносные причальные устройства, внутриобъектовые трубопроводы – 100% объема нефти и (или) нефтепродуктов при максимальной прокачке за время, необходимое на остановку прокачки по нормативно-технической документации и закрытие задвижек на поврежденном участке;

д) подводные трубопроводы при разрыве – 25% максимального объема прокачки за время между последовательным осмотром (мониторингом), установленное распорядительной или нормативно-технической документацией организации. Для трубопроводов, оборудованных дистанционными системами обнаружения утечек нефти и (или) нефтепродуктов, системами контроля режимов работы трубопроводов, – 100% объема нефти и (или) нефтепродуктов при максимальной прокачке за время срабатывания системы по нормативно-технической документации и закрытия задвижек на поврежденном участке;

е) склады нефти и (или) нефтепродуктов, склады горюче-смазочных материалов и другие емкости для нефти и (или) нефтепродуктов, входящие в состав технологических установок или используемые в качестве технологических аппаратов, – 100% объема одной наибольшей емкости.

Указанные объемы разливов следует считать наихудшим сценарием технической аварии, который следует использовать только в случае, если другим путем определить параметры разлива не представляется возможным.

2. При отсутствии информации об интенсивности утечки определить таковую, разделив вышеуказанный соответствующий объем сброса (по Постановлениям) на продолжительность утечки (см. п. 1).

Положение источника (за исключением аварий на платформах, координаты которых известны) и время начала аварийного разлива определяются либо на основании сообщения с аварийного судна, либо на основании спутниковой информации.

3. При использовании в прогнозе данных ДЗЗ за момент начала сброса принимается момент обнаружения разлива или пятна, а положение разлива определяется по координатам точек контура пятна.

Часто прогнозирование распространения нефти или нефтепродуктов проводится по факту обнаружения на поверхности моря нефтяных пятен, происхождение которых неизвестно. Обычно это следствие несанкционированных сбросов топлива с судов, промывки танков или таяние загрязненного ледового покрова.

4. В ситуации, когда неизвестен тип нефтепродукта, попавшего в морскую среду в результате аварии, моделирование следует проводить по наихудшему сценарию, выбирая из набора типов нефти и нефтепродуктов наименее летучие.

5. Когда нет возможности получить прогноз гидрометеорологических условий для района аварии, необходимо использовать данные о скорости ветра и, если возможно, скорости течений, непосредственно измеренных в точке разлива с помощью бортовых измерительных систем.

В этом случае необходимо использовать так называемый инерционный прогноз, предполагая, что и скорость ветра, и скорость течений в районе в ближай-

шее после аварии время будут не слишком отличаться от измеренных величин в точке и в момент аварии.

4.1.2. Подготовка информации по результатам спутникового мониторинга

Существующие программы и системы спутникового радиолокационного мониторинга принято делить на несколько категорий [Кучейко и др., 2009]:

- национальные системы оперативного контроля нефтяных загрязнений прибрежных акваторий и территориальных вод (Канада, Норвегия, США, Дания, Италия и др.);
- региональные системы оперативного контроля нефтяных загрязнений в рамках международных соглашений между странами морских бассейнов (например, сервис CleanSeaNet стран ЕС, Хельсинская конвенция по Балтийскому морю, Бухарестская конвенция по Черному морю и др.);
- региональные научные, пилотные и демонстрационные проекты и программы космического мониторинга загрязнений морей России (программы ИТЦ СканЭкс, НИЦ «Планета», научные международные проекты и др.);
- проекты мониторинга шельфовых зон, которые выполняются по заказам компаний, связанных с добычей и транспортировкой нефтепродуктов на морском шельфе (проекты по заказу компаний «Роснефть», «Лукойл», «Газпром» и др.).

В России сегодня реализуются только проекты спутникового мониторинга загрязнений третьей и четвертой категорий [Кучейко и др., 2009].

Для обеспечения спутникового мониторинга загрязнения морских акваторий в специализированных центрах по приему аэрокосмической информации (НИЦ «Планета» (Росгидромет), ИТЦ СКАНЭКС, ИТЦ общего мониторинга земли (Роскосмос), Институт космических исследований РАН и др.) разработаны технологии подготовки цифровой спутниковой информационной продукции на основе радиолокационных данных. Технологии включают следующие процедуры:

- распаковку спутниковых радиолокационных данных;
- формирование фрагмента изображения заданной акватории;
- радиометрическую коррекцию изображения;
- географическую привязку (геокодирование);
- интерактивное дешифрирование (выделение контуров нефтяных пленок на радиолокационных изображениях);
- экспертный анализ, при котором для повышения достоверности идентификации нефтяных пятен принимается в рассмотрение дополнительная гидрометеорологическая информация (состояние водной поверхности, скорость и направление ветра). Таким образом, по возможности определяются и отбрасываются похожие на нефтяные слики (look-alike slicks) пятна – тень от облачности, штилевые области, плавающая растительность, пленки органических веществ биогенного происхождения, мелководные участки дна, выход внутренних волн на поверхность и т.д.;
- представление выделенных контуров в векторном формате (в виде шейп-файлов).

Таким образом, период от момента съемки до момента, когда информация дойдет до прогнозиста, может занимать от нескольких часов до нескольких суток.

Возможность обнаружения из космоса нефтяных пленок на морской поверхности определяется эффектом сглаживания пленками высокочастотной составляющей морского волнения. Присутствие пленок на взволнованной морской поверхности приводит к уменьшению рассеяния света и СВЧ-волн по сравнению с чистой водой и резкому уменьшению яркости на радиолокационных изображениях.

Оптимальной для обнаружения нефтяных пленок является скорость ветра над морской поверхностью в пределах 3–8 м/с (волнение 2–5 баллов по шкале Бофорта). В этом случае пленки выглядят темными пятнами на светлой (взволнованной) поверхности моря. При меньшей скорости ветра нефтяные пленки становятся невидимыми на гладкой поверхности моря. При сильном ветре они быстро исчезают вследствие интенсивного перемешивания с водой.

Всепогодными возможностями обладает съемка морской поверхности в сантиметровом диапазоне длин электромагнитных волн. В качестве примера радиолокационной съемки на рисунке 4.1, *а* показан типичный вид акватории Каспийского моря в районе Нефтяных Камней. Также приведем хорошо известный снимок, например [Carracedo et al., 2006], разлива мазута при аварии танкера «Престиж» (рис. 4.1, *б*). Принципиальная разница между двумя снимками заключается в том, что на Каспии аномалии радиояркостной температуры создают крайне тонкие пленки нефти, разрушающиеся на некотором удалении от источника их выхода на поверхность, а при аварии танкера «Престиж» на поверхности моря оказался довольно толстый слой вязкого мазута. И этот факт демонстрирует главную проблему радиолокационной съемки – невозможность оценки количества нефти на поверхности моря, так как радиолокатор фиксирует лишь выглаживание взволнованной поверхности, которое может быть обусловлено разнообразными процессами в верхнем слое моря и придном слое атмосферы. Зоны ветрового затишья, штилевые области, дождевые ячейки, плавающая растительность, пленки органических веществ биогенного происхождения (связанные с разложением фитопланктона, зоопланктона и водорослей) и другие

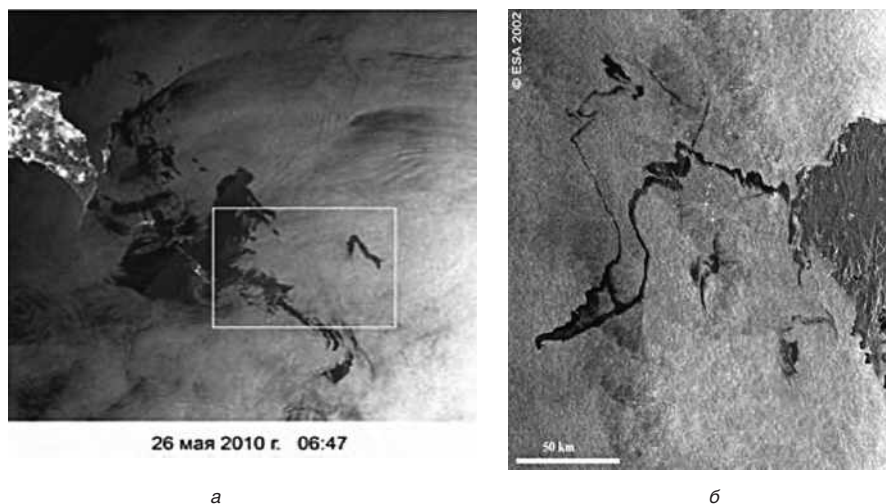


Рис. 4.1. Пример снимков со спутника ENVISAT от 26 мая 2010 г. (а) и ASAR/ENVISAT от 17 ноября 2002 г. (б)

могут создавать похожие поверхностные проявления на радиолокационных изображениях, которые легко спутать с сигнатурами нефтяных разливов. Подобные проявления должны быть исключены из рассмотрения на основе учета геометрических характеристик нефтяных пятен (размер, форма) [Иванов и др., 2005; Спутниковый мониторинг..., 2006], их положения относительно окружающих объектов (судов, платформ, терминалов), ориентации относительно преобладающего ветра и течений и связи с явлениями в море. Для решения этих задач необходимо привлечение разнообразной дополнительной информации, в том числе данных спутниковых многоспектральных съемок.

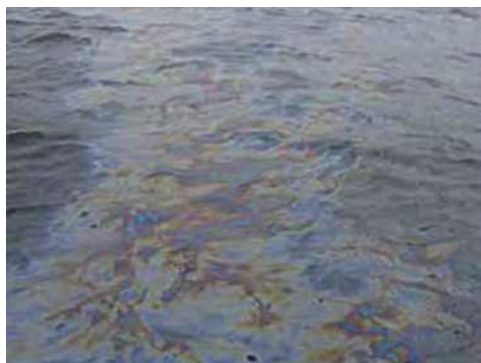
В процессе дешифрирования на РЛИ автоматически или интерактивно выделяются участки, отличные по яркости изображения (темные пятна) от фоновой морской поверхности (серый тон). Далее учитываются дополнительные признаки: форма, размер, контуры, текстура, границы, контраст, а также косвенные признаки – положение пятен относительно возможных источников загрязнения. Так как помимо пленок нефти, нефтепродуктов и ПАВ на РЛИ могли отобразиться упомянутые выше проявления процессов в верхнем слое моря и придном слое атмосферы, то для повышения достоверности идентификации нефтяных пятен в рассмотрении необходимо принимать дополняющую океанологическую и гидрометеорологическую информацию.

При благоприятных погодных условиях, в дневное время и при отсутствии облачности для идентификации нефтяных загрязнений моря помимо радиолокационных изображений (РЛИ) могут быть использованы съемки многозональных сканирующих устройств видимого диапазона среднего и высокого разрешения. В видимом диапазоне нефтяное пятно может быть как темнее, так и светлее фона, в зависимости от положения источника освещения (рис. 4.2).

Для тонких нефтяных пятен Боннским соглашением по кодированию внешних признаков нефти (BAOAC – Bonn agreement oil appearance code) установлена взаимосвязь между толщиной слоя нефти и ее внешним видом <http://bonnagreement.org>. Каждому диапазону толщин нефтяной пленки поставлен в соответствие определенный номер или код, как отмечено в таблице 4.1. Толщина пленки нефти в 1 мкм соответствует 1 м³ нефти на 1 км² площади загрязнения.



а



б

Рис. 4.2. Большие пятна от разлива промежуточной фракции топливной нефти, наблюдавшиеся с самолета (а) и позднее в тот же день в непосредственной близости с борта судна (б)

Переходы между пленками нефти с различным кодом не всегда очевидны. Большое количество примеров фотосъемки нефтяных пятен различной толщины и экспозиции на поверхности моря приведено в фотоатласе, относящемся к одному из руководств Боннского соглашения по аэровизуальным наблюдениям (Bonn Agreement Aerial Operations Handbook, 2009).

Таблица 4.1

Кодирование нефтяного загрязнения по цвету пятна

№ кода	Описание	Интервал толщины пленки, мкм
1	Сияние / Sheen	0,05–0,3
2	Радужное сияние / Rainbow	0,3–5,0
3	Металлический блеск / Metallic	5–50
4	Прерывистый истинный цвет/ Discontinuous True Oil Colour	50–200
5	Непрерывный истинный цвет / Continuous True Oil Colour	>200

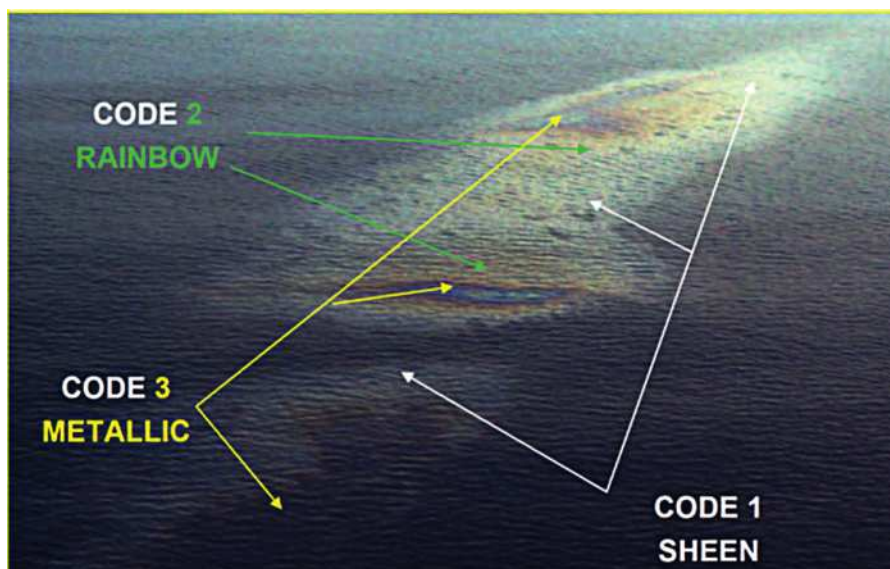


Рис. 4.3. Пример кодирования поля нефтяного загрязнения при визуальном осмотре
(no http://www.bonnagreement.org/site/assets/files/1081/photo_atlas_version_20112306-1.pdf)

4.1.3. Форма информации об обнаруженных нефтяных пятнах на поверхности моря

В настоящее время аэрокосмические методы мониторинга нефтяных загрязнений морских акваторий позволяют решать следующие задачи:

- обнаружение пленочных загрязнений на морской поверхности;
- определение границ (окопирование) пятен нефти и нефтепродуктов на морской поверхности и наблюдение за их перемещением и трансформацией;

- оценка толщины нефтяной пленки и, в сочетании с решением указанных задач, оценка объема загрязнения (при наличии дополнительных данных).

Для прогнозиста информация о загрязнении поверхности моря нефтью и нефтепродуктами должна включать следующие параметры:

- контуры нефтяного загрязнения на поверхности моря в виде полигонов. Все точки контуров нефтяной пленки должны быть геокодированы, чтобы при необходимости, быть нанесенными на карту любой проекции и масштаба;
- количество нефти в каждом из контуров (если возможно);
- тип нефтепродукта на поверхности моря (если возможно).

В свою очередь, результаты моделирования могут помочь специалистам по дешифрированию спутниковой информации для нахождения пропущенных нефтяных пятен, при определении положения старого слайда на новом снимке, при определении ложных слайдов.

4.1.4. Идентификация источников

Целесообразно до возникновения аварийной ситуации все потенциальные источники разливов в регионе ответственности УГМС представить в виде отдельного картографического слоя, включающего расположение стационарных объектов, трубопроводные системы, типовые маршруты движения танкеров и судов обеспечения.

Анализ результатов расчетов, как правило, предполагает оценку возможности воздействия разлива нефти на уязвимые объекты в море и на побережье. Следует отметить, что траектория распространения разлива нефти в тех случаях, когда о ней можно говорить¹¹, определяется расположением источника сброса нефти и изменением гидрометеорологических условий в районе аварии. Таким образом, наличие возможной угрозы воздействия нефтяного разлива на уязвимые объекты (УО) и особо охраняемые природные территории (ООПТ) можно спрогнозировать без полного набора информации об источнике разлива, исключительно по гидрометеорологической информации на основании траектории распространения разлива или отдельных его частей, однако, для оценки масштабов воздействия необходимо уточнить все параметры разлива, включая дату и время, координаты, объем, интенсивность и продолжительность сброса, тип нефти или нефтепродукта. Во многих случаях возможно решение и обратной задачи – определение возможного источника по известному положению разлива и ретроспективному прогнозу (hindcasting) гидрометеорологических условий.

4.1.5. Рекомендации по информационному обмену при ЧС

Прогноз распространения нефти в море не может быть реализован без информации об инциденте, включающем сведения об источнике аварии, координатах и времени сброса. С этой целью необходимо разработать и ввести в действие Регламент информационного обмена при чрезвычайных ситуациях, связанных со сбросом нефти или нефтепродуктов в морскую среду, между заказчиком прогноза

¹¹ При продолжительном истечении нефти более корректно говорить не о траектории, но рассматривать последовательные конфигурации нефтяного разлива.

и учреждениями Росгидромета (УГМС, НИУ), в чьей зоне ответственности произошел инцидент.

Регламент должен определить состав, форму и способы передачи сведений о разливе нефти или нефтепродукта на рабочее место прогнозиста и, после проведения расчетов, доведения результатов прогнозирования до заказчика прогноза. Обмен информацией о разливе осуществляется между специалистами подразделений Росгидромета и дежурной сменой УМЧС или МКСЦ с использованием согласованного вида связи.

В Регламенте следует предусмотреть сведения о контактных данных всех специалистов, действия или бездействие которых может повлиять на своевременное представление прогноза распространения нефти в аварийной ситуации.

Для обеспечения взаимодействия при осуществлении информационного обмена между МЧС или МКСЦ и подразделениями Росгидромета назначаются их ответственные представители, на которых возлагается:

- взаимное информирование обо всех событиях, которые могут привести к затруднениям в обеспечении обмена информацией, изменении почтовых и электронных адресов, номеров телефонов, списка работников, заступающих в состав оперативной дежурной смены;
- уточнение содержания, сроков, способов и периодичности представления информации;
- информирование руководства обо всех случаях задержки или непредставления информации.

При возникновении нештатной ситуации, не предусмотренной методическими материалами и инструкцией по проведению расчетов, дежурная смена подразделения, осуществляющая прогноз распространения аварийного разлива нефти, должна довести до организации, осуществляющей техническую поддержку используемого программного обеспечения, информацию о возникших проблемах.

Номенклатура расчетной информации и типовая форма предоставления расчетных материалов приведены в Приложении 1. Кроме того, информация о проведенных расчетах распространения нефти может быть передана заказчику прогноза в электронном виде. В составе передаваемой информации должны быть сведения о гидрометеорологической обстановке в районе аварии (ветер, волнение, температура воды и воздуха, ледовый покров), справка о возможном распространении нефтяного загрязнения в формате MS Word/Excel, расчетные данные в текстовом виде и информация о распространении нефти в ГИС-формате, как слой для представления на ЭКО ЕСИМО.

Вышеперечисленные рекомендации по информационному обмену могут иметь особенности в каждом отдельном подразделении, однако опыт уже произошедших аварийных ситуаций последних лет, связанных с проливом нефти или нефтепродуктов в море, показывает, что информация об аварии доходит до прогнозиста с большим опозданием, и необходимость в применении Регламента представляется очевидной, так же как и то, что результаты прогноза распространения нефти, их состав и форма представления должны быть согласованы с лицами, принимающими решения в кризисных ситуациях.

4.2. О прогнозе гидрометеорологических условий

Определение характеристик гидрометеорологических условий в месте аварийного сброса нефти на морской акватории производится на основании соответствующих прогнозов. Для каждого водного объекта, на акватории которого возможны аварийные ситуации, сопровождающиеся проливом нефти или нефтепродуктов, необходимо разработать и ввести в оперативную практику модели для расчета метеорологических параметров приводного слоя атмосферы, гидрологических параметров, включающих поля течений на различных горизонтах, поля температуры и солености, поля параметров ветрового волнения. Для арктических и замерзающих морей необходима информация о ледовых условиях и соответствующий прогноз.

Гидрометеорологические прогнозы должны выпускаться с регулярной периодичностью. Результаты прогнозов должны быть доступными для использования при расчетах распространения нефти или нефтепродуктов. Результаты прогнозов должны размещаться в виде карт и соответствующих им массивов данных (сеточное представление) на ресурсах в локальной сети организации или на серверах, доступных через Интернет.

Приведем пример размещения данных для использования при прогнозировании аварийных разливов нефти на Каспийском море. Обновляемый в оперативном режиме массив данных предназначен в том числе для информационного обеспечения модели распространения аварийного нефтяного загрязнения. Доступ к массиву осуществляется посредством сети Интернет. Доступ возможен по протоколу *http* (например, посредством интернет-браузера): <http://193.7.160.230/web/esimo/casp/SpillMod>.

Ежесуточно выпускается два прогноза – со стартовыми строками 00 и 12 час ВСВ (по Гринвичу). Заблаговременность прогностических полей достигает 48 час, с дискретностью представления прогностических полей – 1 час.

Соответственно этому за каждые сутки в массиве представлены два файла – с полями прогноза от 00 и 12 час ВСВ. В указанном каталоге (*SpillMod*) хранение данных организовано в форме циклического набора файлов с периодом цикла 31 сутки. Свежие файлы за текущие сутки замещают файлы месячной давности за тот же день месяца. Таким образом, в каждый момент времени пользователь имеет доступ к данным за последние 31 сутки.

Index of /web/esimo/casp/SpillMod

Name	Last modified	Size	Description
 Parent Directory		-	
 docs/	2015-02-05 23:12	-	
 fest20180920_00.bin	2018-09-20 13:07	13M	
 fest20180920_12.bin	2018-09-21 01:08	13M	
 fest20180921_00.bin	2018-09-21 13:08	13M	
 fest20180921_12.bin	2018-09-22 01:08	13M	
 fest20180922_00.bin	2018-09-22 13:08	13M	
 fest20180922_12.bin	2018-09-23 01:08	13M	
 fest20180923_00.bin	2018-09-23 13:08	13M	
 fest20180923_12.bin	2018-09-24 01:07	13M	

Рис. 4.4. Пример хранения информации на оперативных ресурсах ЕСИМО Гидрометцентра России

Дополнительно к цифровым массивам данных полезно размещение на ресурсах и графической информации о соответствующих полях гидрометеорологических характеристик, как, например, на оперативных ресурсах ЕСИМО Гидрометцентра России <http://hmc.meteorf.ru/sea/>.

На сайтах зарубежных метеорологических центров (NCEP, ECMWF) прогнозы гидрометеорологических полей, как правило, размещаются в машинно-независимом двоичном формате файлов NetCDF (Network Common Data Form), являющимся стандартом для обмена научными данными, прежде всего в метеорологии.

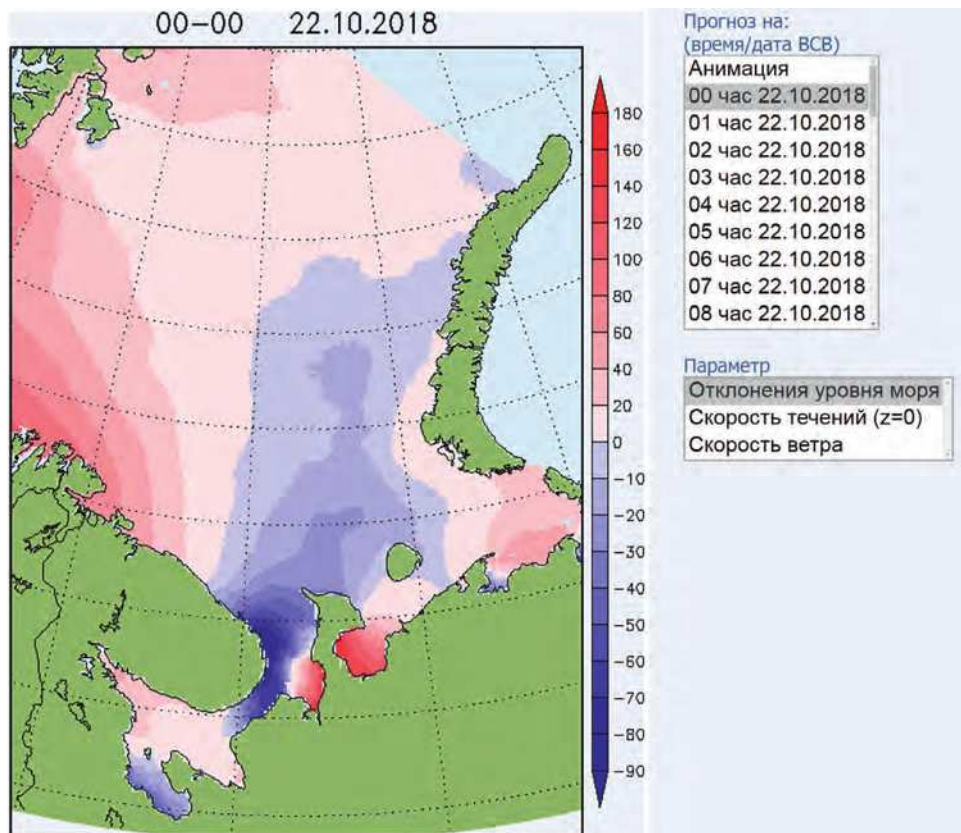


Рис. 4.5. Пример визуализации результатов прогноза изменения уровня Баренцева моря по гидродинамической модели Гидрометцентра России

5. ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

5.1. Современное состояние исследований

Сведения о физических процессах, приведенные в первых двух главах пособия, дают понятное описание феноменологии эволюции нефти в море, т.е. о формулировке закономерностей, определяющих взаимосвязь между различными явлениями, составляющими исследуемый процесс. В то же самое время большинство «элементарных процессов», в совокупности представляющих физико-химическую трансформацию аварийного нефтяного разлива в море, изучены недостаточно. Причина этого, во-первых, в разнообразии физико-химических свойств различных типов нефти и нефтепродуктов, попадающих в морскую среду в результате аварий при разведке, добыче и транспортировке нефти, и, во-вторых, в разнообразии гидрометеорологических условий, в которых может распространяться разлив нефти. Ниже мы перечислим основные, на наш взгляд, недостаточно изученные процессы и факторы, определяющие физико-химическую трансформацию нефтяного разлива на поверхности моря.

Прежде всего, несмотря на то, что большую часть времени на поверхности моря присутствуют волны, практически во всех современных моделях растекания нефти предполагается, что движение растекающейся субстанции происходит по горизонтальной (невозмущенной) поверхности. Часто используемые сегодня формулы Фэя [Fay, 1969] или Маккея [Mackey et al., 1980] были получены для случая мгновенного разлива или разлива с постоянным непрерывным расходом представляют собой лишь оценку радиуса или площади пятна нефти, полученную на основе автомоделных решений упрощенных уравнений гидродинамики для осесимметричного разлива. Кроме того, при выводе этих соотношений не учитывается испарение и диспергирование нефти, а также изменение плотности, вязкости и межфазного натяжения на поверхностях раздела фаз.

Соотношения Фэя, предложенные около полувека назад, оказались очень удобным способом для оценки размеров нефтяного пятна. Однако далеко не все предположения, использованные при выводе соотношений Фэя, можно считать обоснованными. Так, по Фэю, гравитационно-инерционный режим является следствием баланса сил гравитации (плавучести) и сил инерции. Но, на самом деле, сила инерции в нефтяном пятне препятствует увеличению скорости растекания на этапе разгона из состояния покоя, а впоследствии должна бы способствовать поддержанию постоянной скорости растекания, если других сил сопротивления движению нет. Характерным классическим решением для этого случая служит задача о разрушении плотины в теории мелкой воды [Уизем, 1977] или в газовой динамике – задача о расширении сжимаемого газа. В этом решении скорость движения кромки растекающейся жидкости и в одномерном, и осесимметричном вариантах стремится к постоянной величине. Однако эксперименты с растеканием легкой жидкости по поверхности более тяжелой показывают, что на начальном этапе течения скорость кромки нефтяного пятна имеет постоянно уменьшающуюся скорость, пропорциональную квадратному корню

из толщины нефтяного пятна на некотором удалении от границы раздела легкой и тяжелой жидкости [Hoult, 1972].

Вообще говоря, математическая постановка задачи о растекании нефти на границе раздела вода – воздух должна быть сформулирована для трехфазной среды при задании взаимодействия между фазами (фаза 1 – нефть, фаза 2 – вода, фаза 3 – воздух).

Гравитационно-вязкий режим течения для растекания нефтяного пятна по спокойной поверхности воды, по Фэю, складывается из баланса сил гравитации и вязкого трения на границе нефть – вода, однако в этом случае в работах [Fay, 1969, 1971; Hoult, 1972] было предложено без соответствующего анализа применить модель трения при обтекании твердой пластины ламинарным потоком жидкости. Здесь, имея в виду растекание по поверхности моря, а не лабораторного бассейна, существует несколько альтернатив. Во-первых, нефть растекается по верхнему *турбулизированному* слою океана. Во-вторых, размеры нефтяного слика при достаточно больших разливах нефти и нефтепродуктов составляют сотни и тысячи метров. В этой ситуации более реалистичной представляется не модель обтекания твердой пластины, а модель стационарного пограничного слоя на границе нефть – вода с логарифмическим профилем разности скоростей нефть – вода и силой трения, пропорциональной локальной разности скоростей. Так или иначе, выбор модели трения при растекании нефти по поверхности моря остается вопросом, не имеющим на сегодняшний день строгого решения.

Если говорить о так называемом режиме поверхностного натяжения, когда, по Фэю, сила поверхностного натяжения, приложенная к линии тройного контакта фаз (ЛТК), балансируется суммарным трением под всем нефтяным пятном, то эта идея Фэя практически не была обоснована [DiPietro et al, 1978]. Дело в том, что свойства тонких пленок жидкости в субмикронном диапазоне толщин существенно отличаются от свойств так называемой объемной фазы того же самого вещества. Для описания их поведения было введено понятие «расклинивающего давления» [Дерягин, Кусаков, 1936] и предложен термин «прекурсионная пленка», т.е. распространяющаяся впереди кромки объемной линзы растекающегося вещества. Расклинивающее давление имеет различный вид в зависимости от физико-химических свойств растекающейся субстанции, но в общем случае является функцией от толщины слоя и значимо при толщине слоя растекающейся субстанции менее 10^{-5} см. По разным оценкам, в тонком слое прекурсионной пленки, окружающей относительно толстые нефтяные линзы, может быть сосредоточено не более 10% от общего объема пролитой в море нефти [Mackay et al, 1980]. Вообще говоря, в растекающемся нефтяном разливе на поверхности моря существуют области с различными доминирующими факторами, обуславливающими растекание [Старов, 1983], как показано на рисунке 5.1 [Ahn, 1978].

В области нефтяного разлива, содержащей основную часть нефти на поверхности моря, т.н. объемной фазе, главными действующими силами являются силы гравитации, вязкости и капиллярного давления. При достаточно протяженных разливах кривизной межфазных поверхностей обычно пренебрегают и основные закономерности процесса растекания объемной фазы определяют, исходя из предположения, что силы градиента давления в нефтяной пленке балансируются вязкими напряжениями на границе раздела нефть – вода.

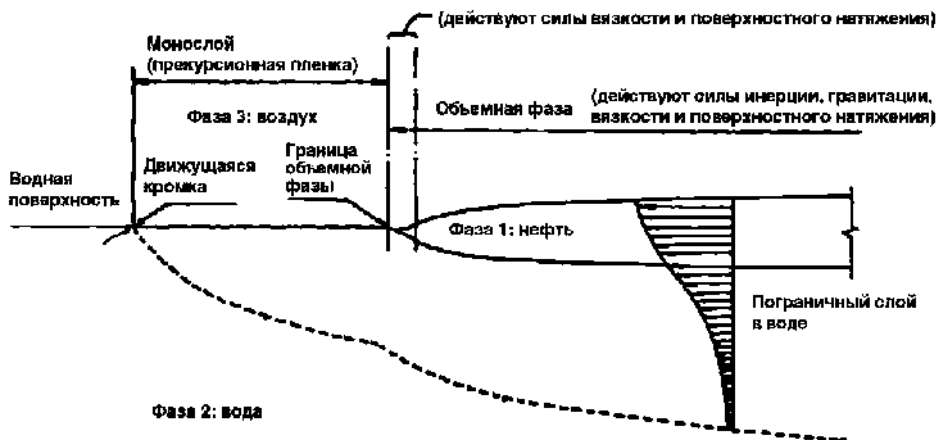


Рис. 5.1. Схематизированный «разрез» нефтяного пятна с выделением основных действующих сил

Еще одной проблемой, не исследованной специалистами, является изменение конфигурации разлива за счет взаимодействия с препятствиями (3), каковыми могут выступать естественные или искусственные барьеры произвольной формы на пути распространения разлива, например портовые сооружения, боны для локализации разлива или крупные льдины. Во всех моделях нефтяного разлива нефть или нефтепродукт представляются ньютоновской жидкостью. Справедливость этого предположения, по-видимому, требует подтверждения как минимум для водонефтяных эмульсий, для поведения нефти в условиях низких температур и для очень тонких пленок нефти и нефтепродуктов на поверхности моря. Способность разных типов нефти образовывать эмульсии зависит от их химического состава и энергии перемешивания. Оба этих фактора часто бывают неизвестными в течение конкретных инцидентов, а переход от лабораторных экспериментов к параметризации эмульгирования в натуральных условиях, когда перемешивание обусловлено ветровым волнением, представляется недостаточно исследованным.

Математическая постановка задачи о растекании нефти в результате аварийного сброса в морскую среду имеет нетривиальную особенность, заключающуюся в том, что область, где ищется решение задачи, сама является искомой величиной. К другой особенности задачи о динамике нефтяного разлива в море следует отнести возможность изменения масштаба рассматриваемого явления от единиц и десятков метров в источнике до километров и десятков километров спустя несколько дней после начала аварии. Проблемой для формулировки математической задачи является и наличие «тройной точки», т.е. линии раздела, где одновременно взаимодействуют воздух, нефть и вода. Единственным упрощением задачи традиционно считается возможность использовать приближение «мелкой воды», т.к. действительно вертикальный масштаб – толщина нефтяного пятна на поверхности – много меньше горизонтальных размеров нефтяного слика. Однако и здесь есть проблемы, поскольку в рассматриваемой задаче нет возможности определить характерные масштабы (сил, скоростей) единственным образом, то и стандартное решение приведения уравнений движения к безразмерному виду применимо лишь в некоторых идеализированных

случаях. Как следствие, применить равномерно пригодное разложение по малому параметру во всем диапазоне изменения масштабов задачи не удастся. К весьма неожиданному следствию стандартного интегрирования исходных уравнений движения по вертикальной координате следует отнести «выпадение» из набора физических характеристик, определяющих поведение нефтяного разлива, вязкости растекающейся субстанции. После интегрирования в уравнениях движения для осредненных характеристик присутствуют только напряжения трения на границах раздела нефть – воздух и нефть – вода, обычно параметризуемые через характеристики процессов в воде и воздухе.

Ледовые условия могут иметь значительную пространственно-временную изменчивость в течение зимнего сезона, зависящую прежде всего от температуры воздуха и интенсивности ветрового воздействия. Нефтяные разливы, как правило, имеют пространственные *масштабы порядка сотен метров*, иногда нескольких километров. Возможность описания ледовых условий на этих масштабах пока представляется трудно реализуемой задачей, поскольку большинство ледовых карт и моделей динамики льда имеют, как правило, меньшее разрешение.

Даже у гладкого однолетнего морского льда поверхность может быть неровной, а дискретные деформации льда, такие как наслоение, образование ледяных валунов и торосов, могут привести к локальному увеличению неровностей, возвышающихся на высоту до нескольких метров над уровнем моря. Может оказаться, что нефть, разлитая на неровную ледяную поверхность, полностью удерживается в пространстве, ограниченном торосами и ледяными заторами. Это приводит к тому, что пятна нефти на льду, как правило, толще, а площадь их распространения значительно меньше, чем у аналогичных пятен, разлитых на открытую воду. Под сплошным или непрерывным ледовым покровом даже большие разливы сырой нефти обычно локализируются на относительно небольшом расстоянии от источника разлива (по сравнению с разливом эквивалентного объема нефти на открытой воде), в зависимости от подледных течений и характеристик неровности самого льда. Естественные изменения толщины однолетнего льда в сочетании с такими деформирующими факторами, как образование ледяных нагромождений и торосов, создают естественные резервуары, в которых на относительно малой площади эффективно локализуется разлитая подо льдом нефть.

При разливе нефти на лед зимой происходит ее загустение из-за осаждения растворенных парафинов по мере ее остывания и испарения легколетучих фракций. Нефть, которая при более высокой температуре является жидкой, может загустеть, если температура окружающей среды опускается ниже ее точки потери текучести. Температура точки потери текучести возрастает по мере того, как нефть теряет легкие фракции вследствие их испарения. Загустевшая нефть испаряется очень медленно, при этом на ее поверхности может образоваться нелипкое парафинистое покрытие.

Распространение нефти от подводного нефтегазового выброса (ПНГВ) существенным образом зависит от дебита скважины, геометрических характеристик устья, газового фактора, глубины моря и температуры воды. В зависимости от интенсивности истечения нефтяной выброс в морскую среду будет представлять полидисперсное загрязнение с распределением по размерам, зависящим от свойств конкретного типа нефти, скорости выхода из скважины и газового фактора.

Список перечисленных выше нерешенных проблем в исследованиях процессов, определяющих судьбу нефти в море, может быть продолжен. Ответы на эти вопросы будут являться основанием для большей достоверности прогнозирования распространения нефти в море в будущем, и, с другой стороны, помогут адекватно интерпретировать результаты расчетов с учетом современного уровня знаний.

5.2. Проблемы верификации метода прогноза распространения нефтяного разлива в море

Крупные разливы нефти в море следует выделить в отдельную группу событий редкой повторяемости, носящих чрезвычайный характер. При испытаниях моделей и технологий прогнозов распространения нефти для построения сценария технической аварии необходимо использовать региональную информацию о произошедших событиях, а при отсутствии таковой – аналогичную информацию для других акваторий или на основе оценок для похожих объектов.

Технология прогнозирования предполагает последовательное использование верифицированных моделей атмосферной и морской динамики. Поскольку морская и атмосферные модели имеют ярко выраженный региональный характер, то успешное испытание модели нефтяного разлива, проведенное в составе модельного комплекса из трех численных моделей (атмосферной, морской и нефтяной), например, на Каспийском море, не дает оснований для уверенности, что нефтяная модель в составе других региональных моделей атмосферы и морской циркуляции обеспечит аналогичный результат на Балтийском или Баренцевом морях, и наоборот. Отметим, что наличие верифицированных и адаптированных к региону моделей ветра и течений – условие необходимое, но не во всех случаях достаточное для достоверного прогноза эволюции нефтяного разлива в море. Ветровое волнение и лед существенным образом влияют на судьбу нефти. Характеристики волнения не локальны и определяются как полем ветра, так и батиметрией рассматриваемого региона. Таким образом, для хорошего прогноза распространения нефтяного разлива потребуются сведения о полях ветрового волнения, а при наличии льда – характеристики ледового покрова (толщина, сплоченность и скорости дрейфа), и, соответственно, модели, поставляющие эти данные.

Данных наблюдений за реально произошедшими разливами явно мало, и наблюдения в условиях ЧС весьма условны. Выход из положения видится в развитии теоретических представлений об эволюции нефти в море. Любая теория основывается на целом ряде предположений, справедливость которых будет проверяться по мере поступления новых данных об объекте исследования. Теория должна объединить результаты натурных наблюдений и лабораторных экспериментов.

Прогноз характеристик нефтяного разлива включает в себя:

1. Последовательные положения и конфигурацию области нефтяного загрязнения.

Эти характеристики можно получить только путем анализа спутниковых снимков или аэровизуальных инструментальных наблюдений – аэрофотосъемки и данных ДЗЗ. Такие данные редки, и ко времени следующего пролета спутника нефтяное пятно на поверхности, как правило, не обнаруживается. Здесь есть ряд проблем, связанных с распознаванием нефтяных пятен на радиолокационных снимках. У радиолокаторов

существуют ограничения при работе в штилевых или штормовых условиях, у радаров видимого диапазона ограничительными являются темнота, туманы, облачность. В итоге надежно идентифицировать несколько последовательных положений нефтяных пятен удастся редко.

2. Площадь пятна зависит от объема разлитой нефти, режима истечения, скорости течения в месте разлива, наличия контактных границ. По этой причине отдельные лабораторные и натурные эксперименты и наблюдения над пролившейся в море нефтью дают лишь фрагмент в мозаике. При наличии физически обоснованной модели такие фрагментарные данные действительно полезны.

3. Количество нефти в нефтяном слике прогнозируется как разность между поступившем количеством нефти от источника сброса и удаленным с поверхности за счет процессов испарения, диспергирования и растворения. На сегодняшний день измерить количество нефти на поверхности можно только лишь с помощью лидарных измерений, но на практике подобные измерения проводились лишь на этапе испытаний оборудования.

4. Количество нефти, испарившейся в атмосферу, несмотря на важность для оценки загазованности приподнятого слоя атмосферы, вряд ли может быть измерено простыми способами. Остаются только лабораторные эксперименты. Но как раз здесь недостатка в экспериментах нет, и потоки легколетучих фракций из нефтяного слика описываются неплохо, если известен фракционный состав конкретной нефти.

5. Волны и течения могут вынести нефть на берег. При этом вместе с нефтью ветровые волны, как правило, выносят на берег и мелкодисперсную взвесь (песок, ил), которая вместе с нефтяной пленкой слой за слоем ложится на берег. В этом случае определить действительное количество нефти на берегу можно будет только с помощью взятия проб. Единственно, в районах, где разливы случаются довольно часто, нужно внимательно определять принадлежность обнаруженной нефти к потенциальному источнику. Этот факт может быть зафиксирован только путем сопоставления химического состава нефти от потенциального источника и обнаруженной на побережье или в акватории.

6. Количество нефти, проникшей в воду в виде капель в результате обрушения волн, может быть измерено с помощью дистанционных методов определения концентрации и распределения по размерам частиц нефти в верхнем слое моря. Такие эксперименты в мировой практике единичны, их проведение дорогостоящее. При реальных ЧС, связанных с проливом в море нефти или нефтепродуктов, подобных измерений никогда не проводилось.

7. Исследования изменения свойств нефти за счет выветривания – образование эмульсий типа «вода-в-нефти» и связанное изменение плотности и вязкости остатка на поверхности моря – проводится главным образом в лабораторных условиях. Вопрос о том, как отнести результаты экспериментов к условиям на поверхности моря, остается открытым.

8. В некоторых случаях фрагменты разливов нефти или нефтепродуктов могут опускаться на дно. Это может происходить как из-за изменения плотности нефти в силу процессов выветривания, так и вследствие изменения плотности воды в верхнем слое моря. Последнее может реализоваться в результате адвекции нефтяного пятна под действием ветра в районы с более низкой плотностью воды, как прави-

ло, распресненные за счет стока рек. Другой причиной осаждения нефтяных капель на дно является наличие в морской среде взвеси (мути), связывание с которой приводит к осаждению нефти. Стоит отметить, что на сегодня модели морской динамики далеко не всегда способны обеспечить необходимый информационный массив для расчетов всех элементов физико-химической трансформации нефтяного разлива.

Учитывая, что проблема эволюции нефтяного разлива в море многопланова и включает в себя необходимость описания большого количества процессов, зачастую имеющих недостаточную экспериментальную и теоретическую изученность, принятие решения о введении в эксплуатацию технологий прогнозирования должно опираться прежде всего на физическую обоснованность метода. Однако информация по каждому новому факту разлива нефти должна стать предметом для анализа и, возможно, основой для корректировки расчетных алгоритмов и калибровки параметризаций, некоторые из которых могут иметь и региональные особенности.

5.3. Расчет наиболее вероятной траектории распространения разлива нефти

На сегодняшний день актуальной проблемой, возникающей при реализации плана ликвидации аварийных разливов нефти, является вопрос, что делать в случае, когда в области акватории, где должен находиться разлив согласно прогнозу его распространения, он не обнаружен? Какова должна быть область его поиска? Расчет перемещения пленок нефти и нефтепродуктов на поверхности моря производится путем интегрирования уравнений движения в форме Лагранжа с использованием предварительно рассчитанных полей течений и приземного ветра. И прогноз, и ретроспективный расчет гидрологических характеристик на основании данных реанализа метеорологических полей осуществляются с неизбежной погрешностью [Зацева и др., 2014б]. Сравнение траекторий переноса буев в натурных экспериментах [Dominicis et al., 2016] показало, что результаты расчетов по различным моделям океанской циркуляции, моделям ветрового волнения и атмосферным моделям отличаются как друг от друга, так и от данных наблюдений. Это является причиной расхождения рассчитанных траекторий распространения находящихся на поверхности моря объектов и траекторий их перемещения, реализующихся в природе. Таким образом, распространение нефтяного разлива в море необходимо рассматривать как случайный процесс, в котором положение объекта интереса в каждый момент времени рассчитывается как случайная величина, эволюция которой описывается адвективно-диффузионными уравнениями типа уравнений Эйнштейна – Колмогорова.

Движение нефтяного пятна по поверхности моря обусловлено действием ветра, течений и волн. Каждый из этих гидрометеорологических элементов рассчитывается в соответствующих математических моделях. Поскольку реальные потоки в атмосфере и океане имеют турбулентный характер, прямое численное решение уравнений движения представляет собой практически не решаемую математическую задачу, при расчете скорости ветра и течений используется осреднение Рейнольдса, а волновые модели, как правило, сформулированы относительно спектров волнового процесса. В итоге, оперируя средними величинами гидрометеорологических величин, можно рассчитать среднюю траекторию движения слика. Действительная траектория

движения нефтяного разлива, формирующаяся под действием непрерывно меняющихся полей ветра, течений и волнения, может отличаться от рассчитанной средней. По этой причине, гораздо легче ввести в рассмотрение наиболее вероятную (в большинстве случаев совпадающую со средней) траекторию движения для объектов на поверхности моря и в водной толще и наиболее вероятное положение объекта в любой заданный момент времени, одновременно сопровождая расчет оценкой погрешности, которая, как правило, описывается функцией распределения для отклонений действительного положения объекта интереса от среднего значения.

Обратим внимание на то, что в данном случае неопределенность положения объекта в процессе переноса по поверхности моря обусловлена не только турбулентным характером движений в водной среде, но в большей степени погрешностью в расчете гидрометеорологических параметров с помощью математических моделей. Аналогично скоростям турбулентных пульсаций разница между рассчитанной скоростью переноса нефтяного пятна по математической модели и определенной в результате наблюдений может быть добавлена в уравнения движения как случайный вектор. Аналогично турбулентной диффузии лагранжевых частиц, неопределенность положения нефтяного пятна за счет погрешности в определении скоростей ветра и течений может рассматриваться как результат искусственной «диффузии» с коэффициентом «диффузии», определенным из анализа статистических свойств ошибок модельных расчетов. В дальнейшем будем называть неопределенность в местоположении нефтяного пятна за счет ошибок расчета скоростей переноса рассеянием относительно наиболее вероятного положения, чтобы разделить указанные процессы.

На практике важно оценить область вероятного обнаружения разлива, поскольку он может находиться в точке пространства, отличной от рассчитанного наиболее вероятного положения. Методика оценки областей вероятного обнаружения разлива обсуждается в работе [Солбаков и др., 2016].

В результате исследования предложена методика определения зоны вероятного обнаружения нефтяного разлива для прогнозных расчетов. Методика позволяет учесть погрешности расчета приводного ветра и получить оценку зон морской акватории, внутри которых предполагается нахождение разлива с заданными уровнями вероятности. Определяемая характеристика наряду с траекториями движения и конфигурациями разлива позволяет локализовать область поиска разлива при проведении операций по его ликвидации. Предложенная методика расчета области возможного обнаружения разлива нефти после аварийного сброса в морскую среду может быть использована как *дополнение к любой модели нефтяного разлива* на поверхности моря.

Пример расчета

Для иллюстрации результатов изложенной методики ниже приведены результаты расчетов распространения нефтепродуктов для двух гипотетических сценариев технической аварии в Белом море. В качестве гидрометеорологических условий (поля ветра и течений) использовались архивные данные – поля течений и приводного ветра, используемые при расчетах распространения нефти в программном комплексе SPILLMOD в Северном УГМС, поступающие дважды в сутки из оперативного

модуля ЕСИМО Гидрометцентра РФ на сервер Государственного океанографического института для обеспечения функционирования расчетно-модельных комплексов экспресс-анализа распространения аварийных разливов нефти.

На рисунке 5.2 приведены поля вероятности обнаружения разлива для заблаговременности прогноза в 12, 24 и 48 часов при длительности разлива в 1 час (рисунок 5.2, а, б, в) и 48 часов (рисунок 5.2, г, д, е). Кружками внутри областей обозначено местоположение разлива без учета неопределенности в задании ветра. Видно, что поля вероятности для мгновенного разлива обладают выраженной симметрией (рисунок 5.2, а, б, в), а длительного – вытянуты в направлении дрейфа (рисунок 5.2, г, д, е). При приближении к берегу происходит некоторая их деформация (рисунок 5.2, в, рисунок 5.2, е), обусловленная как скоростями течений, так и непосредственно взаимодействием с береговой линией, в конце вторых суток от начала разлива размеры области с вероятностью обнаружения нефти 95% достигают 50 км (см. рисунок 5.2, в, рисунок 5.2, е). Результаты расчетов для мгновенного источника (рисунок 5.2, а, рисунок 5.2, б и рисунок 5.2, в) можно сравнить с аналитическим решением. В таблице 5.1 для случая мгновенного точечного разлива приведены полученные аналитически значения размера (диаметра) области, ограничивающей зоны обнаружения нефтяного разлива с соответствующей вероятностью, и результаты численных расчетов этих областей. Согласно полученным данным, совпадение, неплохое для 12 часов и 1 суток от начала сброса, и различие не превышает одного километра. На вторые сутки различие данных возрастает, достигая 5 км (до 10%), данное отличие обусловлено, по-видимому, влиянием берегов при моделировании.

Цифрами на рисунке 5.2 (а – е) отмечены полигоны, оконтуривающие область, где нефтяной разлив может быть обнаружен с указанной вероятностью.

5.4. О ГИС-форматах и картографическом обеспечении

С наличием контактных границ в задаче о распространении нефти по поверхности моря связана еще одна проблема. Она состоит в выборе приемлемой детализации сведений о береговой линии. Расчеты траекторий распространения разлива, когда о них можно говорить (см. раздел 3.4.1), должны учитывать

Таблица 5.1

**Сравнение расчета по методике и аналитического решения
для случая мгновенного точечного разлива**

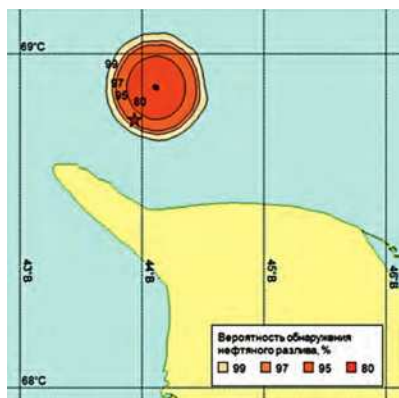
	Размер области, км							
	Получено аналитически				Численные расчеты			
Значения вероятности обнаружения нефтяного разлива	80%	95%	97%	99%	80%	95%	97%	99%
Срок 12 часов от начала разлива	11,4	15,6	16,9	19,3	11,5	15,8	17,2	20,0
Срок 24 часов от начала разлива	19,9	27,2	29,4	33,7	20,7	27,7	30,3	34,6
Срок 48 часов от начала разлива	32,1	43,8	47,4	54,4	34,3	48,3	52,1	60,1



а



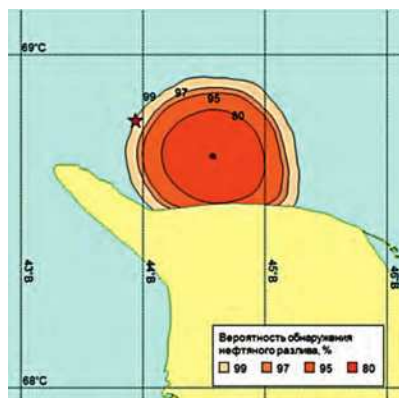
б



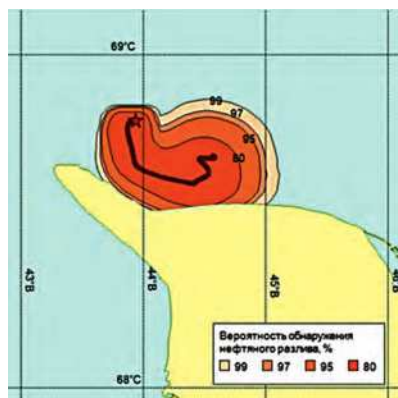
в



г



д



е

Рис. 5.2. Вероятность обнаружения разлива:

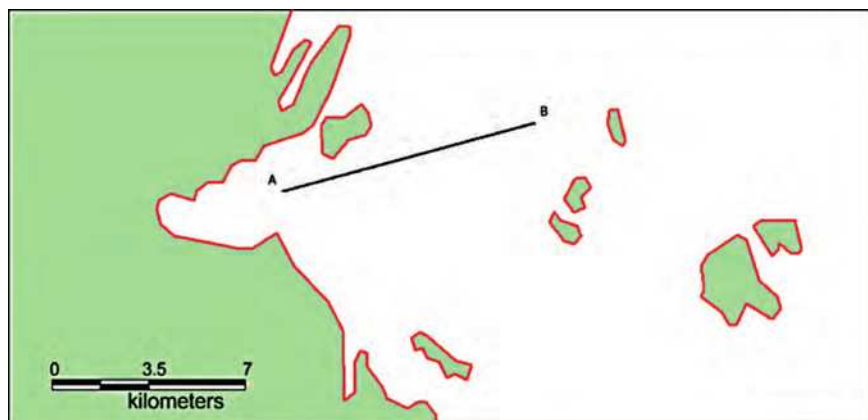
а, б и в – сценарий мгновенного сброса; г, д и е – сценарий длительного сброса (в течение 48 часов);

а, г – 12 часов после начала разлива; б, в – одни сутки, в, е – двое суток

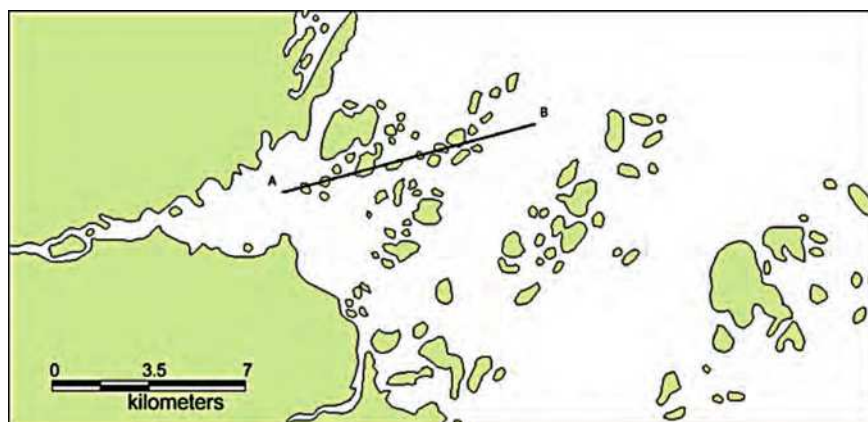
встречающиеся по «пути следования» пятна нефти препятствия, некоторые из которых в силу особенностей геометрической формы могут стать ловушками для нефтяного загрязнения. Как правило, это происходит, когда под действием ветра нефть «загоняется» в какой-нибудь залив береговой зоны. При смене направления ветра нефть сможет отойти от берега и продолжить свободное распространение до следующего препятствия. Рассмотрим, например, ситуацию, когда нефтяной разлив, случившийся в устьевой зоне реки Кемь, под действием ветра будет распространяться из точки А в точку В, как показано на рисунке 5.3, а. Представим себе, что расчеты траекторий распространения нефти были проведены с использованием сведений о береговой линии, показанных красным контуром на этом рисунке. Эта точность представления береговой линии имеет место на картах масштаба 1:1 000 000, используемых в ЕСИМО для описания побережий РФ в целом. Для большинства задач отображения гидрометеорологических данных на картах подобной детализации достаточно. Однако, как видно из дальнейших рисунков, использование сведений о береговой линии побережья Белого моря в рассмотренном случае приведет к существенным ошибкам в расчетах переноса нефти, так как в действительности в этом районе акватории довольно много мелких островов, хорошо видных на карте масштаба 1:500 000, показанной на рисунке 5.3, б. Если для расчета перемещений нефтяного загрязнения использовать сведения о береговой линии из открытого интернет-ресурса <http://map.openseamap.org>, то результат расчета будет отличаться от двух предыдущих. В реальности распространение нефтяного загрязнения будет «задержано» на береговой линии группы островов, расположенных между условными точками А и В. Таким образом, следует признать, что сведения о координатах береговой линии и любые другие геоморфологические сведения о побережье в районе аварии являются важным элементом в модельном комплексе, представляя граничное условие для задачи о распространении нефти.

В некоторых случаях результаты моделирования удобно отображать на картах, предоставляемых сервисом GoogleEarth или интернет-ресурсом <http://map.openseamap.org>.

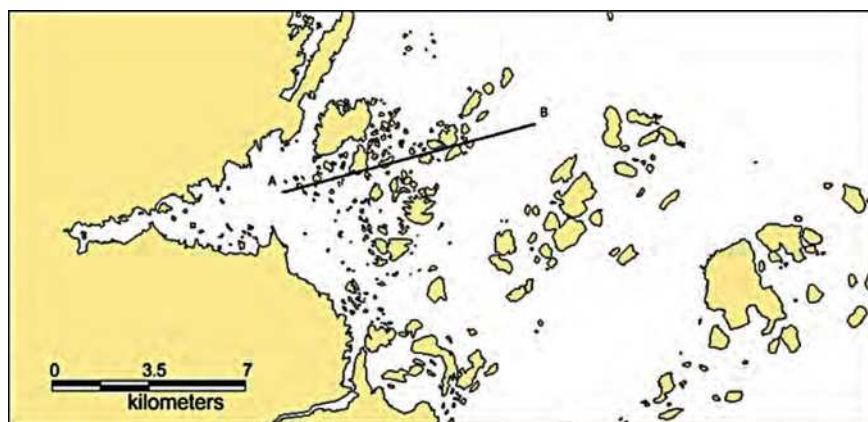
При оценке распространения нефти в прибрежной зоне желательно, чтобы и в расчетах, и при анализе использовались данные с одной и той же карты района аварии. В противном случае не исключены курьезные артефакты. Если в расчетах используется детальная карта (например, 1:500 000), а для представления результатов карта с худшей детализацией (например, 1:1 000 000), то возможен случай разделения пятна загрязнения на части в результате обтекания острова, которого на карте миллионного масштаба просто нет, и наоборот, траектория движения нефти будет проходить «по суше», если рассчитанную по данным с карты масштаба 1:1 000 000 отобразить на карте масштаба 1:500 000 или на картах с ресурсом <http://map.openseamap.org> и GoogleEarth. Упомянутые курьезные случаи возможны в ситуации, когда результаты расчетов распространения нефти передаются заказчику прогноза в виде отдельного слоя в форматах распространенных ГИС, например Mapinfo или ArcGIS. Высокая детализация в описании береговой линии приводит к не всегда оправданному увеличению вычислительных затрат при расчете траектории движения пятна нефти. Одна из причин заключается в ограниченном пространственном разрешении в модели морских течений и необходимости использования существенно более слож-



а) М 1:1 000 000



б) М 1:500 000



в) М 1:100 000

Рис. 5.3. Сравнение детализации представления береговой линии на картах разных масштабов



а



б

Рис. 5.4. Детализация береговой линии участка акватории Кемской губы Белого моря на интернет-ресурсе <http://map.openseamap.org> (а) и в GoogleEarth (б)

ных моделей атмосферы, учитывающих орографию подстилающей поверхности. Таким образом, при расчетах распространения нефти в областях со сложной береговой линией, включая острова, необходимо предоставлять результаты на тех же картах, которые были использованы для задания берегового контура в задаче о расчете траекторий движения пятна нефти.

Вышеприведенный пример демонстрирует критическую зависимость результатов расчетов распространения нефти от детализации представления береговой линии, связанной с использованием карт различных масштабов. Однако эти проблемы прежде всего касаются распространения нефти в прибрежной зоне.

Прибрежная зона должна быть выделена в отдельный предмет анализа распространения разливов нефти еще и потому, что на сегодняшний день большинство моделей морских течений имеют пространственное разрешение от 1 до 10 км. Приведем пример. На рисунке 5.5 показан фрагмент расчетной сетки для модели течений и уровня Баренцева и Белого морей Гидрометцентра РФ с пространственным разрешением 5 миль, результаты ежедневных прогнозов по которой можно видеть на ресурсе http://193.7.160.230/web/esimo/barenc/hfcst/hfcst_barn.php. Гидродинамическая

модель хорошо описывает подъем уровня моря под действием ветра и прилива, однако, как видно из рисунка 5.5, поле глубин с пространственным шагом расчетной сетки в 5 миль явно недостаточно, чтобы описать течения в прибрежной зоне, учитывающие орографические эффекты в Кемской губе, врезкой, показанной на рисунке 5.5.

Течения в море определяются атмосферным воздействием, сгонно-нагонными колебаниями уровня моря, бароклинными эффектами и орографией. Таким образом, одну из составляющих течений в прибрежной зоне, а именно орографическую, ответственную за расчет обтекания препятствий, морские гидродинамические модели описывают с недостаточной подробностью. Одним из способов исправить ситуацию может быть введение дополнительного искусственного рассеяния нефтяных пятен при движении по поверхности моря в условиях сложной геометрии береговой черты, включая острова. Этот способ применен в методологии двухэтапного моделирования распространения нефтяных разливов, когда на первом этапе с помощью траекторного моделирования определяется наиболее вероятное положение центра нефтяного загрязнения в последовательные моменты времени после начала разлива и области его возможного обнаружения с заданным уровнем вероятности.

5.5. Оценка выноса нефти на берег

В простом случае одномоментного/залпового сброса нефти неблагоприятным событием можно считать пересечение траектории движения нефтяного пятна с линией, аппроксимирующей береговую контур, при условии, что количество нефти при подходе разлива к берегу достаточно, чтобы вызвать существенное загрязнение береговой полосы. На практике бывают ситуации, когда траектория движения

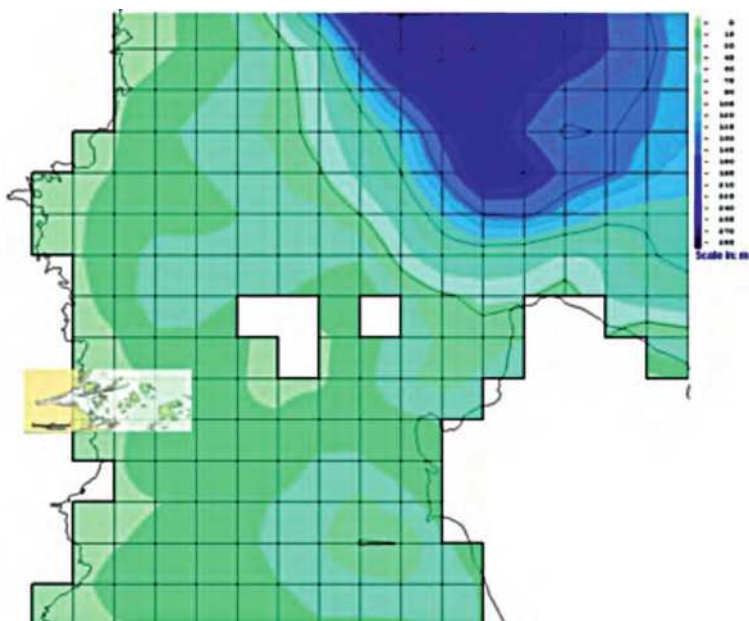


Рис. 5.5. Фрагмент расчетной сетки течений в Белом море

нефтяного пятна, рассчитанная по компьютерным моделям, не пересекает береговой контур, но проходит в опасной близости от него. Как относиться к таким сценариям распространения нефти? В предыдущем разделе было показано, что неизбежные погрешности, возникающие при расчете характеристик гидрометеорологических условий, приводят к необходимости определения наряду с наиболее вероятным положением разлива нефти и области его вероятного обнаружения (ОВО). Продолжением этой темы следует считать оценку вероятности воздействия нефтяного разлива на береговую зону. В этом случае факт воздействия на берега 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.

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, 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, оцениваемой 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 году, 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 [Фацук и др., 2010].

В [Gundlach and Hayes, 1978] была предложена классификация береговых линий по геоморфологическим особенностям, в соответствии с которой каждому участку береговой зоны присваивается свой индекс чувствительности. Подобное картографирование 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 большинстве моделей распространения нефти для анализа риска используется самый простой подход (А), предполагающий, что нефтяное пятно, траектория перемещения которого пересекает береговую линию, полностью оседает на берегу независимо от типа нефти, характеристик выветривания, типа береговой линии, уже имеющегося количества нефти на берегу и т.д. В другом подходе (Б) некоторая часть нефти считается осевшей на берегу в месте контакта, а оставшаяся часть продолжает участвовать в процессах переноса, растекания и выветривания и вызывает загрязнение новых областей акватории и побережий. И наконец, еще одним предельным случаем является вариант, когда разлив нефти не задерживается береговой линией (В), и его удаление с морской поверхности происходит лишь за счет испарения и диспергирования.

Вариант (В) из трех рассматриваемых соответствует наихудшему сценарию с позиций загрязнения водной среды диспергированной и растворенной нефтью, первый вариант (А) может оказаться наиболее неблагоприятным для уязвимых объектов на берегу. При использовании других критериев неблагоприятного воздействия, например, максимальное загрязнение выбранных участков побережья, наихудшим может оказаться вариант частичного осаждения на берегу (Б). Кроме того, моделирование с частичным осаждением нефти на берегу связано с необходимостью использования гидрометеорологических и геоморфологических параметров в условиях имеющейся неопределенности. Эволюция небольших разливов оказывается в большей степени зависима от локальных особенностей береговой линии и прибрежной зоны, не учитываемых в гидродинамических моделях циркуляции и волнения.

5.6. Системный подход к обеспечению прогнозирования разливов нефти в море

Для обеспечения оперативного прогнозирования распространения аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на морских акваториях РФ необходим системный подход. Такой подход предполагает разработку математического, программного, информационного и организационного обеспечения, без которого прогнозирование распространения разливов нефти в море при ЧС вряд ли возможно. В рамках подобного проекта необходимо обеспечить разработку и ввод в опытную и постоянную эксплуатацию модельно-расчетных комплексов для выпуска региональных прогнозов течений и уровня моря в крупных НИУ Росгидромета и размещения их в виде ресурсов ЕСИМО, предусмотреть техническую поддержку разработанных аппаратно-программных комплексов, обеспечить контроль за размещением региональных гидрометеорологических прогнозов в виде ресурсов ЕСИМО в центрах данных и их передачу в организации и подразделения, обеспечивающие оперативное обслуживание.

Подразделения Росгидромета, задействованные в обеспечении оперативного прогнозирования распространения аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, должны быть обеспечены квалифицированными специалистами, подготовленными для работы с аппаратно-программными комплексами, включающими:

- средства для получения, хранения и обработки данных регионального гидрометеорологического прогноза;
- высокопроизводительные компьютеры и программное обеспечение для проведения расчетов распространения нефти в море;
- средства подготовки результатов моделирования в современных ГИС-форматах и передачи их для использования заказчику прогноза.

Для реализации и дальнейшего своевременного использования результатов прогнозов необходим регламент информационного взаимодействия в случае ЧС, связанных с разливами нефти и нефтепродуктов на морских акваториях.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью нефтяного загрязнения морской среды, возникающего в результате аварийных сбросов нефти или нефтепродуктов в море, является тот факт, что негативные последствия такого загрязнения могут быть уменьшены благодаря своевременной проведенной операции ЛАРН. Подготовка к реагированию может быть более эффективной, если до возникновения реальной аварии сделать оценки области возможного распространения разливов на основании анализа технического риска осуществления той или иной морской деятельности и сведений о гидрометеорологических условиях в регионе интереса. При этом следует оценить возможность достижения разливом уязвимых объектов, определить приоритеты защиты среды, достаточность сил и средств реагирования для различных масштабов сброса в морскую среду нефти или нефтепродуктов. При реальной аварии вовремя сделанный прогноз распространения разлива поможет принять правильные управленческие решения. Реконструкция разлива нефти после аварии дает основания для планирования операций мониторинга и оценки ущерба окружающей среде.

Во всех перечисленных задачах роль прогнозирования распространения разливов нефти представляется немаловажной. Как было показано в пособии, на сегодняшний день это решаемая задача, однако для ее реализации необходим системный подход.

Уровень научных знаний, на основании которых разрабатываются модели и методы расчета характеристик разлива нефти и нефтепродуктов, недостаточен и нуждается в развитии на основании новых, прежде всего натурных экспериментов по исследованию поведения нефти и нефтепродуктов в море. Планирование таких экспериментов должно осуществляться на основе теоретических представлений о физико-химической трансформации нефти в морских условиях в силу большого разнообразия свойств различных типов нефти или нефтепродуктов и условий в океане, определяющих процессы эволюции нефтяного загрязнения.

Прогнозирование распространения нефти невозможно без использования сведений о гидрометеорологических условиях в районе аварии и прогноза изменения этих условий. Первым шагом на пути реализации прогноза распространения нефти в море должно стать обеспечение региональных прогнозов метеорологических условий и гидрологических характеристик, выпускаемых в режиме 24/7 и доступных заинтересованным службам и организациям.

Системный подход к прогнозированию рассматривает оперативное прогнозирование распространения аварийных разливов нефти в море как часть системы оперативного реагирования на ЧС, связанные с разливом нефти и нефтепродуктов на морских акваториях, и в этой связи необходим регламент информационного взаимодействия между всеми участниками кампании ЛАРН.

Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов следует рассматривать как технологию, в рамках которой необходимо обеспечить прогнозиста, во-первых, сведениями об инциденте, включая дату и время аварии, координаты, режим сброса и тип нефтепродукта, во-вторых, результатами гидрометеорологического прогноза, в-третьих, средствами для расчета взаимосвязанных процессов трансформации нефти в море (ПО), адаптированными под модель входных данных, включая

гидрометеорологические прогнозы, для региона интереса, и, в-четвертых, создать среду, в которой будут представлены результаты прогноза распространения нефти, или, как вариант, использовать средства современных ГИС для отображения последовательных конфигураций и характеристик разлива нефти.

7. СПИСКИ ЛИТЕРАТУРЫ

7.1. Список основной литературы

Ниже приведен список литературы, ссылки на которую присутствуют в пособии.

1. *Блиновская Я.Ю.* Принципы создания информационной системы «Карты чувствительности прибрежно-морских зон к загрязнению нефтью» // Вестник ДВО РАН. 2004. № 4. С. 63–73.
2. *Бык С.Ш., Фомина В.И.* Газовые гидраты. Успехи химии. 1968. Т. 37, вып. 6. С. 1097–1135.
3. *Гебхарт Б., Джалаурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б.* Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. – 1991.
4. *Гитис В.Г., Вайништок А.П., Дерендяев А.Б., Зацева С.Н., Ивченко А.А., Белов С.В., Белова К.В.* «Сервис ЕСИМО по интерактивному моделированию гидрометеорологических и гидрофизических процессов, экспресс-анализу аварийных разливов нефти». // Материалы конференции «Использование средств и ресурсов Единой государственной системы информации об обстановке в мировом океане для информационного обеспечения морской деятельности в Российской Федерации» (ЕСИМО'2012) 24–28 сентября 2012 г. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012.
5. *Дерягин Б.В., Кусаков М.М.* Свойства тонких слоев жидкостей // Изв. АН СССР, Сер. хим. 1936. № 5. С. 741–753.
6. *Журавель В.* Ликвидация разливов нефти в море: соответствует ли финансовое обеспечение работ реалиям? // Oil and Gas Journal Russia. 2015. № 12(100). С. 92–95.
7. *Зацева С.Н., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В.* О роли ветрового волнения в процессе диспергирования нефтяного разлива в море // Океанология. 2018а. Т. 58. № 4. С. 1–10.
8. *Зацева С.Н., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В.* Феноменологическая модель диспергирования нефтяного разлива в море и параметризации некоторых процессов // Океанология. 2018б. Т. 58. № 6. С. 843–853.
9. *Зацева С.Н., Ивченко А.А., Овсиенко С.Н.* О параметризации растекания нефти по горизонтальной пористой поверхности // Тр. ГОИН, 2009, вып. 212. С. 218–226.
10. *Зацева С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В., Москвичев А.С.* К оценке области возможного обнаружения нефтяного загрязнения при прогнозировании распространения аварийных разливов нефти в море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014б. № 4 (102). С. 61–70.
11. *Иванов А.Ю., Ермошкин И.С., Фанг М., Хе М.-С., Кровотынцев В.А.* «Использование космической радиолокации для картографирования нефтяных загрязнений моря», Исследование Земли из космоса. 2005. № 5. С. 78–95.
12. *Измайлов В.В.* Трансформация нефтяных пленок в системе океан – лед – атмосфера. Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана, т. 9. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 145 с.

13. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная антропология океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 528 с.
14. *Калинка О.П.* Оценка уязвимости акватории Кольского залива и чувствительности его берегов при разливах нефти: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2016. – 26 с.
15. *Котеров В.Н., Архипов Б.В., Солбаков В.В., Юрезанская Ю.С.* Применение математических методов для анализа и оценки экологически значимых событий при крупномасштабной аварии подводного газопровода. // М.: ВЦ РАН, Сообщения по прикладной математике. – 74 с.
16. *Кучеико А.А., Затягалова В.В., Модеев Р.Н., Становой В.В.* Российские сервисы спутникового мониторинга нефтяных загрязнений морских акваторий: реалии и возможности. // Земля из космоса – наиболее эффективные решения, вып. 3, 2009. С. 25–29.
17. *Кулаков М.Ю., Макинас А.П., Шутилин С.В.* «AARI-ЮСМ – совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана» // Труды ААНИИ, 2013.
18. *Мановян А.К.* Технология первичной переработки нефти // Химия. М., 2001. 577 с.
19. Моделирование разливов нефти в западном секторе Российской Арктики: учеб. пособие / Ред.: М.Г. Губайдуллин. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2016. – 221 с. : ил. – ISBN 978-5-261-01150-7, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/554158>, для доступа к информ. ресурсам требуется авторизация (17.10.2018).
20. *Нельсон-Смит А.* Нефть и экология моря // Пер. с англ. под ред. Симонова А.И., М., Изд. «Прогресс», 1977. – 302 с.
21. *Нестерова М.П., Немировская И.А., Гурвич Л.М.* Нефтяное загрязнение Балтийского моря, мониторинг, методы борьбы. // Материалы Всес. научно-го семинара «Методология прогнозирования загрязнения океанов и морей». Севастополь, 25–26 марта 1986. М.: Гидрометеиздат, 1986. С. 35–38.
22. *Озмидов Р. В.* Диффузия примесей в океане. 278 с, с. ил. 21 см. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
23. *Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска их воздействия на окружающую среду // Тр. ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 248–271.
24. *Патин С.А.* Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. – М.: Изд-во ВНИРО, 2008. – 508 с.
25. *Погребов В.Б., Шилин М.Б.* Экологический мониторинг прибрежной зоны Арктических морей. – СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 96 с.
26. *Солбаков В.В., Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Становой В.В.* О методике расчета области вероятного обнаружения нефтяного загрязнения на поверхности моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 5–17.
27. Спутниковый мониторинг российского сектора Черного и Азовского морей. Альбом: Космические изображения высокого разрешения и результаты их дешифрирования, апрель – октябрь 2006 г. – Издательство ГУ «НИЦ «Планета», 2006, 51 с.

28. Становой В.В., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Неелов И.А., Ванкевич Р.Е., Рябченко В.А. Моделирование разливов нефти в ледовых условиях в Финском заливе на основе оперативно-прогностической системы // Океанология. 2012. Т. 52. № 6. С. 818–824.
29. Становой В.В., Еремина Т.Р., Карлин Л.Н., Исаев А.В., Неелов И.А., Ванкевич Р.Е. Оперативно-прогностическое моделирование распространения нефтяных загрязнений в Финском заливе // Ученые записки Рос. гос. гидрометеорологического университета, № 18, 2011. С. 151–169.
30. Становой В.В., Лавренев И.В., Неелов И.А. Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 77. С. 7–16.
31. Старов В.М. «О растекании капель нелетучих жидкостей по плоской твердой поверхности» // Коллоид. журнал, 1983. Т. 45. № 6. С. 1154–1161.
32. Техника и технологии локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов: Справ. / И.А. Мерициди, В.Н. Ивановский, А.Н. Прохоров и др.; Под ред. И.А. Мерициди. – СПб.: НПО «Профессионал», 2008. – 824 с.
33. Ткалин А.В. Испарение нефтяных углеводородов из пленок на гладкой поверхности моря. // Океанология. 1986. Т. 26. Вып. 4. С. 628–630.
34. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны // М.: Мир, 1977. – 624 с.
35. Фащук 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.
36. Aamo O.M., Reed M., Downing K. Oil spill contingency and response (OSCAR) model system: sensitivity studies // Proc. of Oil Spill Conference. 1997, American Petroleum Institute. P. 429–438.
37. Ambjorn C. Seatrack Web forecasts and backtracking of oil spills – an efficient tool to find illegal spills using AIS. // Proc. of US/EU-Baltic International Symposium, Tallinn, May 27–29, 2008. IEEE/OES, P.16.
38. ASCE. State of the art review of modeling transport and fate of oil spills. // J. of Hydraulic Engineering. 1996. Vol. 122, 11. P. 594–609.
39. Belore R., Buist I. Sensitivity of oil fate model predictions to oil property inputs. // Proc. Of the 17th Arctic and Marine Oil spill Program (AMOP) Technical Seminar, 1994, Canada. 7 p.
40. Belore R.C., Buist I.A. Modelling of oil spills in snow. // Proc. of the 11th Arctic and Marine Oil spill Program (AMOP). Technical Seminar, 1988, Canada, P. 9–29.
41. Bobra A.M., Fingas M.F. The behavior and fate of arctic oil spills. // Wat. Sci. Tech., 1986, Vol. 18, P. 13–23.
42. Carracedo P., Torres-Lopez S., Barreiro M., Montero P., Balseiro C.F., Penabad E., Leitaio P.C., Perez-Munuzuri V. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system. // Marine Pollution Bull. 2006. Vol. 53. P. 350–360.
43. Chen F. and Yapa P.D. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts. Part II: Comparison of numerical simulation with “Deepspill” field measurements // J. of Hydraulic Research, 2002, Vol. 41, P. 353–365.

44. *Clark R.C., Finley J.S.* Occurrence and impact of petroleum on Arctic environments. // In: *The Arctic Ocean. The hydrographic environment and the fate of pollutants* (Ed. L. Rey), 1982, Comite Arctique Int., pp. 295–341.
45. *Cox J.C., Schultz L.A., Johnson R.P., Shelsby R.A.* The transport and behavior of oil spilled in and under sea ice. // *Arctec Incorporated for NOAA/OCSEAP, Research Unit 568, Final Report, 1980, 170 p.*
46. *Craik A.D. and Leibovich S.* A rational model for Langmuir circulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 73, pp. 401–426, 1976.
47. *Delvigne G.A.L., Swinney C.E.* Natural dispersion of oil // *Oil and Chemical Pollution*. 1988. 17. P. 281–310.
48. *Delvigne D.A.L., Hulsen L.J.M.* Simplified laboratory measurements of oil dispersion coefficient – application in computations of natural dispersion. In: *Proceeding of the 17th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar*. 1994, Vancouver, British Columbia, vol.1, pp. 173–187.
49. *DiPietro N.D., Huh C. and Cox R.G.* 1978; The hydrodynamics of the spreading of one liquid on the surface of another. *J. Fluid Mech.* 84, pp. 529–549.
50. *Ahn D.B.* The spreading of a very viscous liquid on a water surface: дис. – McGill University, Canada, 1978.
51. *Dominicis M. De., Bruciaferri D., Gerin R., Pinardi N., Poulain P. M., Garreaue P., Zodiatis G., Perivoliotis L., Fazioli L., Sorgente R., Manganiello C.* A multi-model assessment of the impact of currents, waves and wind in modelling surface drifters and oil spill // *Deep Sea Res. Part II Topical Studies in Oceanography*. April 2016. DOI: 0.1016/j.dsr2.2016.04.002. 33 p.
52. *Dominicis M., Pinardi N., Zodiatis G., Archetti R.* MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting. Part 2: Numerical simulations and validations. // *Geosci. Model Dev.*, 2013a, Vol. 6, P. 1871–1888.
53. *Dominicis M., Pinardi N., Zodiatis G., Lardner R.* MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting. Part 1: Theory. // *Geosci. Model Dev.*, 2013b, Vol. 6, P. 1851–1869.
54. *Drozdzowski A., Nudds S., Hannah C.G., Niu H., Peterson I., Perrie W.* Review of Oil Spill Trajectory Modelling in the Presence of Ice // *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 274. 2011, 84 pp.
55. *Etkin D.S., French-McCay D., Michel J.* Review of the State-Of-The-Art on 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 pp.
56. *Fannelop T.K., Sjoen K.* Hydrodynamics of underwater blowouts. – *Ship Research Institute of Norway, Marine Technology Centre*, 1980. – P. 80–219.
57. *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.
58. *Fay J.A., Hoult D.P.* Physical processes in the spread of oil on a water surface // *USCG Report AD-726 281*. Washington. D.C. 1971.

59. *Fingas M., Fieldhouse B., Mullin J.* Water-in-oil emulsion results of formation studies and applicability to oil spill modeling // *Spill Science and Technology Bulletin*. 1999. Vol. 5. No 1. P. 81–91.
60. *Fingas M.F., Hollebone B.P.* Review of behaviour of oil in freezing environments. // *Marine Pollution Bull.* 2003. Vol. 47. P. 333–340.
61. *Gundlach E.R., Hayes M.O.* Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts // *Marine Technology Society Journal*. 1978. Vol. 12. No 4. P. 18–27.
62. *Harlow F.H.* The particle-in-cell computing method for fluid dynamics in fundamental methods in Hydrodynamics // *Experimental Arithmetics*. – 1964. – C. 319–345.
63. *Hoult D.P.*, 1972. Oil spreading on the sea. In: Van, Dyke (Ed.), *Annual review offluid mechanics*, pp. 341–368.
64. *Huang J.C. and F.C. Monastero.* 1982. Review of the State-of-the-Art of Oil Spill Simulation Models: Final Report, submitted to the American Petroleum Institute, Washington, D.C.
65. *Huppert H.E.* The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity current over a rigid horizontal surface. // *J. Fluid Mech.*, 1982, Vol. 121, p. 43.
66. *Izumiyama K., Konno A.* Theory and modeling of the oil/water interfacial tension force on the oil spreading under ice covers. Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice Dunedin, New Zealand. 2002
67. *Izumiyama K., Konno A., Sakai S.* Experimental Study on Spreading of Oil Under Ice Covers // *Proc. of International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2002. 12, P. 821–826.
68. *Izumiyama K., Uto S., Narita S., Tasaki R.* Effect of interfacial tension on the spreading of oil under an ice cover // In “Ice in Surface Waters” (Ed. Shen), Balkema, Rotterdam, 1998.
69. *Johansen O.* Deep Blow – a Lagrangian Plume model for deep water blowouts // *Spill Science and Technology Bulletin*. 2000, Vol. 6, No 2. P. 103–111
70. *Johansen O.* Development and verification of deep-water blowout models // *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47, p. 360–368.
71. *Johansen O., Brandvik P.J., Farooq U.* Droplet breakup in subsea oil releases – Part 2: Predictions of droplet size distributions with and without injection of chemical dispersants // *Marine Pollution Bulletin*, No 73, 2013. P. 327–335.
72. *Lehr W., Jones R., Evans M., Simecek-Beatty D., Overstreet R.* Revisions of the ADIOS oil spill model // *Environmental Modelling and Software*. 2002. Vol. 17. № 2. P. 191–199.
73. *Liu S.K., Leendertse J.J.* A 3-D oil spill model with and without ice cover. // In: *Mechanics of oil slicks*. Association amical des ingenieurs and international association for hydraulic research, Paris, 1981, pp. 249–265.
74. *Liungman O., Mattsson J.* Scientific Documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references // *Swedish Meteorological and Hydrological Institute*. 2011. 32 p.
75. *Luk G.K., Kuan H.F.* Modelling the behaviour of oil spills in natural waters // *Can. J. Civ. Eng.* 1993. Vol. 20. P. 210–219.
76. *Mackay D., Buist I., Mascaraenhas R., Paterson R.* Oil spill process and models. // *Report-EE8*. University of Toronto. Report to Environment Protection Service. Ottawa. Ontario. Canada. 1980. 93 p.

76. *Miranda R., Brauschweig F., Leitao P., Neves R., Martins F., Santos A.* MOHID 2000, a coastal integrated object oriented model // Hydraulic Engineering Software VIII, WIT Press. 2000. 480 p.
77. *Nihoul J.C.* (1984). A non-linear mathematical model for the transport and spreading of oil slicks. *Ecological Modelling*, 22 (1–4), 325–339.
78. *Oil spill science and technology: prevention, response and clean up.* (Ed. by M. Fingas). Elsevier. 2011. – 1156 pp.
79. *Okubo A.* Oceanic diffusion diagrams // Deep sea research and oceanographic abstracts. – Elsevier, 1971. – T. 18. – № 8. – C. 789–802.
80. *Quiroga F.O.B., Perez A.P., Valdes A.R.* Mass loss evaluation in oil spill. // Proc. of 21st Int. Conf. on Offshore Mechanics, June 23–28, 2002, Oslo, Norway, OMAE2002–28168.
81. *Rasmussen D.* Oil spill modeling – a tool for cleanup operations. // Proc. of Oil Spill Conf., American Petroleum Institute, 1985, pp. 243–249.
82. *Reed M.* The physical fates component of the natural resource damage assessment model system // Oil and Chemical Pollution. 1989. 5. P. 99–123.
83. *Reed M., Aamo O.M.* Real time oil spill forecasting during an experimental oil spill in the Arctic ice // Spill science and Technology Bulletin. 1994. 1. No 1. P. 69–77.
84. *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 Bulletin. 1999. No 5. P. 3–16.
85. *Riazi M.R. and Alenzi G.* A mathematical model for the rate of oil spill disappearance from seawater for Kuwaiti crude and its products. // 1999, Chem. Eng. J. 73: 161–172.
86. *Riazi M.R. and Y.A. Roomi.* A Model to Predict Rate of Dissolution of Toxic Compounds into Seawater from an Oil Spill // 2008, International Journal of Toxicology, v. 27, p. 379–386.
87. *Samuels W.B., Huang N.E., Amstutz D.E.* An oil spill trajectory analysis model with a variable wind deflection angle. // Ocean Engineering, Vol. 9, 1982, pp. 347–360.
88. *Smedsrud L.H.* A model for entrainment of sediment into sea ice by aggregation between frazil-ice crystals and sediment grains. // J. of Glaciology, Vol. 48, No. 160, 2002, pp. 51–61.
89. *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.
90. *Sterling M.C., Bonner J.S., Pace C.A., Fuller C.B., Ernest A.N.S., Autenrieth R.L.* Modeling crude oil droplet – sediment aggregation in nearshore waters. // Environ. Sci. Technol., 2004, Vol 38. P. 4627–4634.
91. *Stolzenbach K.D., Madsen O.S., Adams E.E., Pollack A.M. & Cooper C.K.* A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks. – 1977. – № MITSG 77-8.
92. *Terray E., Donelan M., Agrawal Y., Deenan W., Kahma K., Williams III A., Hwang P., Kitaigorodskii S.* Estimates of kinetic energy dissipation under breaking waves. // J. of Phys. Oceanography, 1996, vol. 26, P. 792–807.
93. *Wadhams P.* Sea ice topography in the Beaufort Sea and its effect on oil containment. // AIDJEX Bull., 1976, № 33, pp. 1–52.

94. *Wadhams P., McLaren A.S., Weintraub R.* Ice thickness distribution in Davis Strait in February from submarine sonar profiles. // *J. of Geophys. Res.*, 1985, Vol. 90, № C1, pp. 1069–1077.
95. *Weerasuriya S.A., Yapa P.D.* Unidirectional spreading of oil under solid ice. // *Can. J. Civ. Eng.*, 1993, Vol. 20, № 1, pp. 50–56.
96. *Wolfe L.S., Houlst D.P.* Effects of oil under sea ice. // *J. of Glaciology*, 1974, Vol. 13, № 69, pp. 473–488.
97. *Xie H., Yapa P.D., Nakata K.* Modeling emulsification after an oil spill in the sea // *J. of Marine Systems*, 2007. vol. 68, pp. 489–506.
98. *Yang W.C., Wang H.* (1977) “Modeling of oil evaporation in aqueous environment”, *Water Research*, 11, p. 879–887.
99. *Yapa P.D. and Zheng L.* Modeling oil and gas release from deepwater: a review // *Spill Science and Technology Bulletin*, 1997, 4(4), p. 189–198.
100. *Yapa P.D., Belaskas D.P.* Radial spreading of oil under and over broken ice: an experimental study. // *Can. J. Civ. Eng.*, 1993, Vol. 20, № 6, pp. 910–922.
101. *Yapa P.D., Chowdhury T.* Spreading of oil under ice // *J. Hydraul. Eng.* 1990. Vol. 116. No 12. P. 1468–1483.
102. *Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S.* A local operative model for oil drift and dispersion // *Proc. of Combatting Marine Oil Spills in Ice and Cold Conditions*. 1992. C. 189–192.

7.2. Список дополнительной литературы

Ниже приведен список литературы, которая может оказаться полезной при углубленном изучении различных аспектов прогнозирования распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях.

1. *Зацепя С.Н., Журавель В.И., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В.* Инкрементальный подход к выбору критических сценариев распространения разливов нефти для планирования мероприятий по минимизации экологических рисков // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. № 1(111). С. 5–17.
2. *Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В.* Опыт создания оперативных моделей расчета распространения аварийных разливов нефти в Баренцевом море // *Арктика: экология и экономика*. 2014а. – № 4 (16). С. 68–76.
3. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. – 334 с.
4. *Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А.* Математическое моделирование как элемент информационной поддержки принятия решения при выборе стратегии защиты морской среды от нефтяного загрязнения // *Тр. ГОИН*, 2011, Вып. 213, С. 396–407.
5. 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).
6. *Шулейкин В.В.* Физика моря. – М.: Наука, 1968. С. 1090.

7. *Dasanayaka L.K. and Yapa P.D.* Role of plume dynamics phase in a deepwater oil and gas release model // *Journal of Hydro-Environmental Research*, 2009, 2, p. 243–253.
8. *Dickens G.R., Quinby-Hunt M.S.* Metane Hydrate Stability in Seawater. *GRL V. 21. No. 19.* p. 2115–2118. 1994.
9. *Duncan P. B., Needham D.* Microdroplet dissolution into a second-phase solvent using a micropipet technique: test of the Epstein–Plesset model for an aniline-water system. // 2006, *Langmuir*, 22, 4190–4197.
10. *Elliott A.J.* Shear diffusion and the spread of oil in the surface layers of the North Sea // *Dt. hydrogr. Z.*, vol. 39, 1986, H. 3, P. 113–137.
11. *Hayes M.O., Michel J., Zengel S., Dahlin J., Petersen J.* Environmental sensitivity index guidelines, Version 2.0. // Seattle, Washington, NOAA Tech.Memo. NOSORCA 115. 1997. 79 p.
12. *Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson S.* Oil spill processes and models // Environment Canada Report No EE-8. Ottawa. Ontario. 1980.
13. *Mackay D., Matsugy R.S.* (1973) “Evaporation rate of liquid hydrocarbon spill on land and water”, *Can.J.Chem.Eng.*, v. 51, p. 434–439.
14. *Sherwood C.R.* Numerical model of frazil ice and suspended sediment concentrations and formation of sediment laden ice in the Kara Sea // *J. of Geophys. Res.*, Vol. 105, No C6, 2000, pp. 14061–14080.
15. *Smedsrud L.H.* Formation of turbid ice during autumn freeze-up in the Kara Sea. // *Polar Research*, Vol. 22(2), 2003, pp. 267–286.
16. *Spaulding M. L., Bishnoi P.R., Anderson E., Isaji T.* An integrated model for prediction of oil transport from a deep water blowout // *Proceedings of the twenty-third AMOP Technical Seminar*, Environment Canada, Vancouver, BC, 2000, Vol. 2, p. 611–635.
17. *Venkatesh S., El-Tahan H., Comfort G., Abdelnour R.* Modelling the behaviour of oil spills in ice-infested waters // *Atmosphere-Ocean*, 1990. vol. 28, No 3. P. 303–329.
18. *Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S.* Mathematical modeling of oil behaviour in ice: *Proc. Of Combatting Marine Oil Spills in Ice and Cold Conditions*, National Board of Waters and the Environment. Helsinki, Finland. 1993. P. 175–184.
19. *Zheng L., Yapa P.D. and Chen F.* A model for simulating deepwater oil and gas blow-outs. Part I: theory and model formulation // *J. of Hydraulic Research*, 2002a, Vol. 41, P. 339–351.
20. *Zheng L., Yapa P.D.* Modeling gas dissolution in deepwater oil/gas spills. // *J. of Marine Systems*, 2002b, Vol. 31. P. 299–309.

Приложение 1

ПРИМЕРНАЯ ФОРМА СПРАВКИ О ПРОГНОЗЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В МОРЕ АВАРИЙНОГО РАЗЛИВА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Исходные данные об аварии¹²:

Время и дата поступления информации – 11 марта 201_ года 18 часов 15 минут

Источник информации – справка НЦУКС МЧС РФ № от «__» _____ 201_ года

Информация о ЧС:

Дата и время аварии – 15 февраля 201_ года, 18.15 местного времени

Координаты аварии – __° __' __» в.д., __° __' __» с.ш.

Объем нефти или нефтепродукта, сброшенный в море, – 1000 тонн

Интенсивность и продолжительность утечки – 12 часов

Тип нефтепродукта – мазут

Картографическая расчетная информация

Пример последовательных положений и конфигурации поля нефтяного загрязнения приведен на рисунке П1.1.

Расчетная информация в текстовом виде, содержащая:

1 – время от начала разлива нефти

2 – долгота, град¹³

3 – широта, град

4 – масса пролившейся на поверхность моря нефти, т

5 – масса нефти, оставшаяся на поверхности моря после процессов выветривания, т

6 – масса испарившейся нефти, т

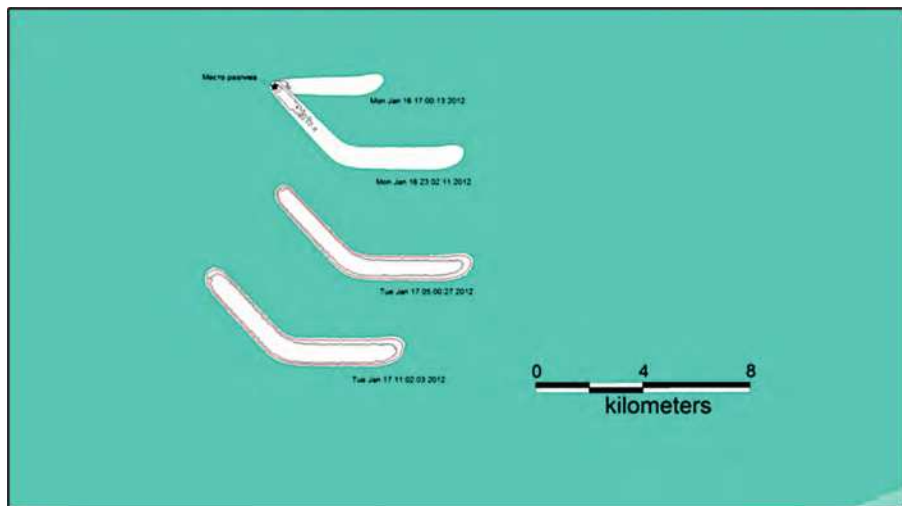


Рис. П1.1. Пример последовательных положений и конфигурации поля нефтяного загрязнения

¹² Заполняется на основании данных, поступивших от НЦУКС МЧС РФ.

¹³ Долгота и широта в таблице относятся к центру нефтяного загрязнения.

7 – масса нефти, диспергированной в водную толщу, т

8 – средняя толщина нефтяного пятна, мм

9 – максимальная толщина нефтяного пятна, мм

10 – площадь нефтяного загрязнения, кв. км

11 – модуль скорости ветра, м/с

12 – направление ветра, град

13 – модуль скорости течения, см/сек

14 – направление течения, град

Пример текстовой информации к расчету

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	48,96347	44,91535	1000	998,80	1,184	0,0139	0	2,7571	6,2933	0,3826	10	90	0	0
2	48,96767	44,91503	2000	1995,69	4,2671	0,0444	0	2,5071	6,5072	0,8404	10	90	0	0
3	48,97203	44,91481	3000	2990,10	9,7986	0,0983	0	2,3201	6,5502	1,3601	10	90	0	0
4	48,97622	44,9147	4000	3982,16	17,6608	0,1785	0	2,2211	6,5691	1,8914	10	90	0	0
5	48,98042	44,91464	5000	4972,12	27,5953	0,2863	0	2,1404	6,6557	2,4497	10	90	0	0
6	48,98463	44,91459	6000	5960,12	39,4587	0,4235	0	2,0729	6,6326	3,031	10	90	0	0
7	48,98834	44,91263	7000	6946,37	53,0361	0,5921	0	2,0171	6,2676	3,6291	10	135	0	0
8	48,9913	44,90981	8000	7930,83	68,3674	0,7979	0	1,91	6,4952	4,3744	10	135	0	0
9	48,9944	44,90755	9000	8913,51	85,4508	1,0425	0	1,8552	6,5381	5,0598	10	135	0	0
10	48,99734	44,90525	10000	9894,79	103,8875	1,3257	0	1,8374	6,2312	5,6698	10	135	0	0
11	49,00038	44,90291	11000	10874,95	123,4099	1,6451	0	1,8271	6,1653	6,2648	10	135	0	0
12	49,00354	44,90035	12000	11853,35	144,6289	2,0171	0	1,8105	5,8439	6,8889	10	135	0	0
13	49,00663	44,89554	12000	11832,43	165,1714	2,4037	0	1,672	2,6033	7,4421	10	135	0	0
14	49,00674	44,88928	12000	11812,37	184,8179	2,8162	0	1,5962	2,0626	7,7779	10	180	0	0
15	49,00672	44,883	12000	11794,27	202,4956	3,2387	0	1,55	1,9639	7,9936	10	180	0	0
16	49,00669	44,87641	12000	11776,81	219,4891	3,703	0	1,5066	1,8527	8,2078	10	180	0	0
17	49,00665	44,86982	12000	11760,87	234,9527	4,1829	0	1,4691	1,7392	8,4024	10	180	0	0
18	49,00662	44,86359	12000	11746,98	248,3799	4,6456	0	1,4346	1,6578	8,5914	10	180	0	0
19	49,00391	44,8578	12000	11733,25	261,5973	5,1507	0	1,4005	1,6084	8,7869	10	225	0	0
20	48,99802	44,85321	12000	11720,88	273,4616	5,6619	0	1,3694	1,5317	8,9744	10	225	0	0
21	48,99203	44,84861	12000	11709,38	284,4339	6,1908	0	1,3421	1,5021	9,145	10	225	0	0
22	48,98598	44,84399	12000	11698,58	294,6878	6,7375	0	1,316	1,478	9,3153	10	225	0	0
23	48,97991	44,83934	12000	11688,44	304,2607	7,3001	0	1,2916	1,436	9,4809	10	225	0	0
24	48,97383	44,83466	12000	11678,88	313,2485	7,8767	0	1,2701	1,3956	9,6314	10	225	0	0

Комментарий к расчету:

В комментарии специалист, проводивший расчеты, указывает все источники информации, использованные при расчетах, сообщает о неопределенностях, связанных с возможной неполнотой данных об источнике загрязнения, его координатах, дате, времени и режиме сброса нефти.

В случаях, когда специалист располагает информацией о наличии в прогнозируемой зоне загрязнения населенных пунктов, рыбопромысловых районов и других экологически уязвимых или природоохранных объектов, он делает предварительные выводы об угрозе поражения объектов на акватории или в береговой зоне.

Приложение 2

ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ПО SPILLMOD

П2.1. Описание структуры и основных функций ПК SPILLMOD

ПК SPILLMOD представляет собой интегрированную программную среду, состоящую из:

- математической модели нефтяного разлива;
- электронной картографической системы;
- управляющей программы (оболочки);
- наборов данных (свойства нефти, параметры настройки);
- средств подготовки данных для визуализации и документирования;
- программных средств подготовки данных специализированных гидрометеорологических прогнозов.

В основе системы лежит *математическая модель нефтяного разлива*, позволяющая рассчитывать:

- перенос нефти под действием ветра и течений;
- растекание нефти от мгновенных, непрерывных, площадных и протяженных источников;
- испарение легких фракций и изменение плотности нефти;
- изменение вязкости и плотности нефти за счет эмульсификации;
- естественное и химическое диспергирование;
- взаимодействия с берегом, боновыми заграждениями и скиммерами.

Для математического решения задачи разработана специальная численная технология, ориентированная на решение двумерных задач, описываемых уравнениями типа «мелкой воды» со свободными границами. Расчеты могут производиться в областях со сложной геометрией береговой линии, в том числе при наличии островов, для нефтепродуктов с различными физическими свойствами.

Электронная картографическая система позволяет отображать информацию в виде дополнительных слоев на существующей (подготовленной заранее) картографической основе и поддерживает все основные операции, необходимые для эффективной работы с картой: изменение масштаба и степени детализации, измерение расстояний, получение информации о выбранных объектах, управление слоями и т.д. Состав отображаемой информации включает:

- векторную или растровую карту района с береговой линией в виде серии полигонов с необходимой детализацией;
- положение источника разлива, тип, координаты и параметры которого выбираются пользователем вручную либо задаются из сценария;
- текущее положение нефтяного разлива в виде серии изолиний толщины нефти с заданным временным шагом и, возможно, траекторию его движения;
- положение средств борьбы с нефтяным разливом – бонов, нефтесборщиков, областей применения диспергентов.

Электронная картографическая система служит также источником информации для модели нефтяного разлива, соответствующий слой карты выполняет в модели

роль твердой (контактной) границы с заданными характеристиками, необходимыми для расчета взаимодействия нефти с берегом. Положение и характеристики средств борьбы также учитываются соответствующими алгоритмами в модели.

Картографическая информация обрабатывается и отображается в стандарте ГИС **Mapinfo**.

Управляющая программа (или оболочка) выполнена в виде 32/64-разрядного приложения для среды Windows и выполняет целый ряд функций по управлению работой модели нефтяного разлива, базы данных, картографической системы и интерфейсом пользователя. Интерфейс пользователя выполнен в виде обычного для среды Windows текстового многоуровневого меню и панелей инструментов, позволяющих автоматизировать основные операции ввода исходных данных, управления картой и ходом расчетов.

Наборы данных включают в себя информацию о:

- свойствах нефти – плотности, вязкости, фракционном составе. В настоящей версии использован набор из 5 (пяти) основных типов нефтепродуктов: бензин, дизельное топливо, мазут, сырая нефть легкая, сырая нефть тяжелая. Этот набор данных при необходимости может быть расширен;
- картографической нагрузке;
- параметрах настройки модели. Они используются для привязки модели нефтяного разлива к условиям данного региона.

Средства визуализации и документирования необходимы для обработки полученной информации с целью дальнейшего анализа и хранения. В данной версии ПО позволяет запоминать и в дальнейшем воспроизводить в ускоренном режиме сценарии расчетов распространения нефти, отображать изменение основных характеристик нефтяного пятна (баланс массы нефти, плотность, вязкость) в виде графиков.

Программные средства подготовки данных специализированных гидрометеорологических прогнозов необходимы для подготовки данных прогнозов течений и приводного ветра для обеспечения прогноза распространения нефтяных разливов в Каспийском море во временном окне «Трое суток назад и двое вперед» от текущей даты. Такое решение в оперативном режиме предусматривает возможность расчета аварийных ситуаций, произошедших ранее (до трех суток назад), и учитывает тот факт, что данные об источнике аварии всегда приходят позднее, чем она (авария) реализуется на деле.

П2.2. Подготовка к запуску

Работа программного комплекса возможна при условии, что на компьютер предустановлены операционная система «Windows 7/10» и геоинформационная система «MAPINFO» версии 6.5 и выше.

Для успешной работы программы необходимо, чтобы в качестве разделителя целой и дробной части была установлена точка(.).

Путь: **Control Panel → Regional Settings → Number → Decimal Symbol**

или

Панель управления → Язык и региональные стандарты → Форматы → Разделитель целой и дробной части → (.).

Для нормального функционирования программного комплекса необходимы программные компоненты и файлы данных, перечисленные и описанные в приложении 1 к данному руководству.

Запуск программного комплекса осуществляется программой SPILLMOD.EXE. Далее установка рабочего задания осуществляется в интерактивном режиме с помощью системы меню.

П2.3. Первый запуск

Первый запуск системы может сопровождаться сообщением

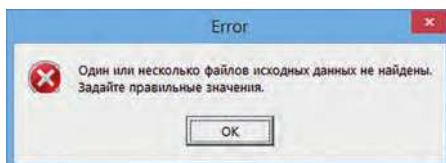


Рис. П2.1. Сообщение в начале работы программы

После нажатия «ОК» на экране появится первое настроечное меню «Параметры». Проверьте наличие файлов¹⁴ в соответствующих каталогах или задайте новые пути доступа.

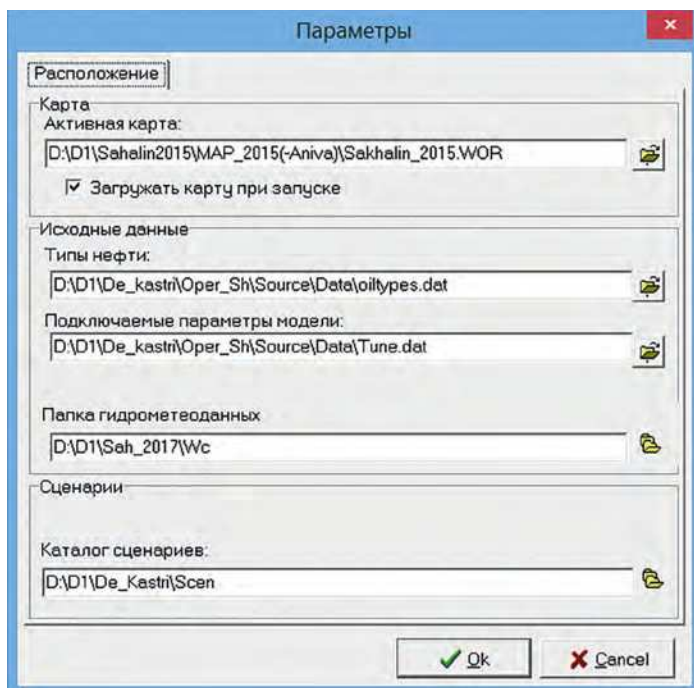


Рис. П2.2. Форма для задания конфигурации ПК

¹⁴ *.wor, oiltypes.dat, tune.dat, где *.wor – имя рабочего набора Mapinfo.

П2.4. Начало работы

Главное меню

Файл

- Открыть карту
- Выход (Alt+X)

Вид

- Выбор
- Выбор в прямоугольной области
- Выбор в радиусе
- Выбор в произвольной области
- Увеличить карту
- Уменьшить карту
- Изменить вид...
- Задать исходные данные
- Повторить расчет модели
- Очистить исходные данные и результаты
- Загрузить сценарий/результаты расчета
- Сохранить сценарий/результаты расчета

Средства борьбы

- Боновые заграждения...
- Суда-нефтесборщики...
- Суда-диспергаторы...
- Сжигание нефти

Анализ

- График
- Информация о плотности нефти
- Отображать траекторию нефтесборщиков
- Отображать траекторию диспергаторов
- Отображать ветер

Справочные данные

- Правовая база
- Фоновые условия
- Свойства нефти
- Методы борьбы

Сервис

- Параметры...
- Стили отображения...
- Стили отображения нефти

Помощь

- О программе
- Помощь

Панель инструментов работы с картой

До старта модели панель инструментов выглядит так:

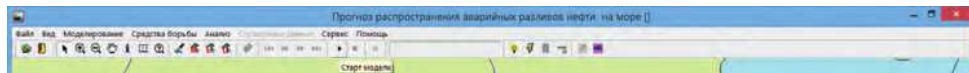


Рис. П2.3. Вид панели инструментов до старта модели

Во время расчета

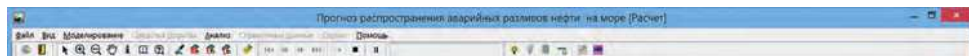


Рис. П2.4. Вид панели инструментов во время расчета

Во время «Паузы»

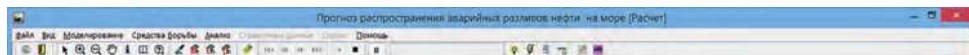


Рис. П2.5. Вид панели инструментов во время паузы

Выбор действий

При запуске модуля **Spillmod.exe** на экране появляется первая подсказка, облегчающая работу с программой. Возможные варианты действий:

- задать исходные данные;
- загрузить сценарий / результаты расчетов;
- открыть карту.

Выбрав «Задать исходные данные» автоматически попадаем в окно ввода данных. Опция «Загрузить сценарий» необходима для воспроизведения на экране рассчитанного ранее сценария или для использования уже сформированного сценария исходных данных, например, для повторного расчета с измененными начальными условиями. Чтобы работать с **новой картой** района аварии, нужно выбрать опцию «Открыть карту» и стандартной процедурой указать путь к нужному файлу (расширение .wor). Рабочий набор (workspace) Mapinfo для использования в программе «SPILLMOD» должен содержать только одно окно карты и слой береговой линии в виде набора замкнутых областей (regions).

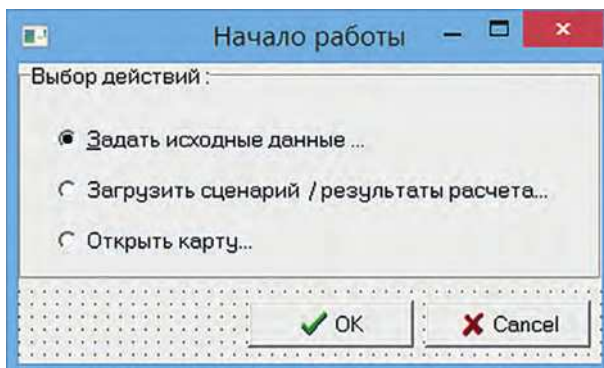


Рис. П2.6. Форма выбора варианта действий для ввода исходных данных

П2.5. Исходные данные для моделирования

Ввод исходных данных для запуска модели может осуществляться двумя путями: вручную и с использованием записанного ранее сценария.

Для загрузки сценария необходимо открыть раздел меню **Моделирование** → **Загрузить сценарий**.

Для задания исходных данных вручную необходимо открыть раздел меню **Моделирование** → **Задать исходные данные**.

Модель

На данном этапе пользователь задает значения продолжительности расчетов в часах и период визуализации. Период визуализации (задается в минутах, 60 минут по умолчанию) не следует задавать слишком маленьким, т.к. отображение будет занимать слишком много процессорного времени, при слишком большом интервале есть вероятность пропустить важную информацию. Чем больше этот параметр, тем реже на экране будет происходить смена «картинки» и, соответственно, больше будет расстояния между последовательными положениями нефтяного пятна.

Картографическая информация, используемая в геоинформационной системе, задается в виде набора слоев. Для правильной работы программы в окне «Слой карты с береговой линией» необходимо выбрать слой, в котором записаны координаты отрезков береговой линии региона интереса. Слой должен содержать таблицу Mapinfo® с набором замкнутых полигонов. В дальнейшем эта информация будет использоваться как граничное условие для расчета трансформации нефтяного разлива у берега.

Подраздел «Способы моделирования» включает три позиции:

- 1 – траекторная модель,
- 2 – модель с применением технических средств,
- 3 – вероятностные модели.

В настоящей версии программы подключен только модуль расчетов «Модель с применением технических средств».

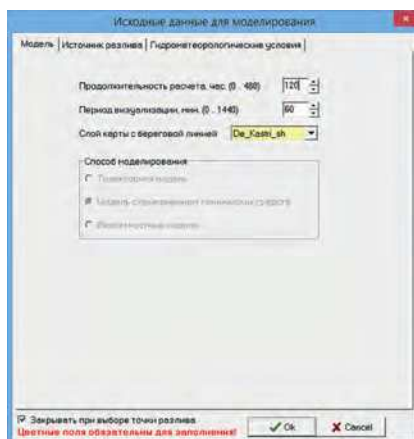


Рис. П2.7. Ввод параметров расчета модели

П2.5.1. Источник разлива

Задание исходных данных об источнике разлива нефти предполагает внимательное заполнение пользователем следующих позиций:

- дата аварии,
- время аварии,
- широта места разлива нефти,
- долгота места разлива нефти,
- тип разлива нефти.

В оперативной версии дата и время аварии задаются по UTC (определяется форматом используемых метеоданных). Широту и долготу места аварии можно задавать либо вручную, последовательно заполняя соответствующие поля, либо, выбрав кнопку «Поставить», с помощью указателя мыши поместить курсор в нужное место и нажать левую клавишу мыши. Удобно вначале указать предполагаемое место разлива с помощью курсора на карте, а затем отредактировать координаты, если пользователю известны их точные значения. В случае залпового сброса необходимо заполнить поле «Масса сброшенной нефти», обратив внимание на размерность. При продолжительном сбросе появляются два поля «Продолжительность» и «Интенсивность» сброса нефти, при заполнении которых необходимо использо-

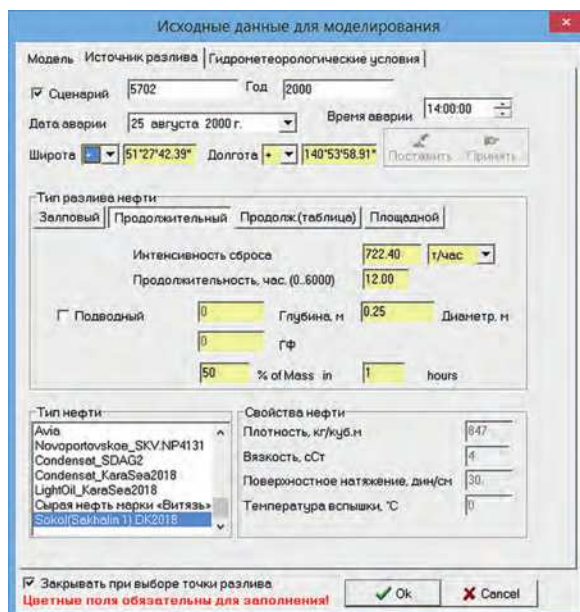


Рис. П2.8. Форма ввода параметров разлива

вать правильную размерность величин. В поле «Тип нефти» следует выбрать аналог нефтепродукта, разлившегося в море, либо выбрать конкретный тип нефтепродукта, если он есть в базе типов нефтей. Окошки со свойствами нефти (плотность, вязкость, межфазное натяжение, температура вспышки) служат для отображения физических параметров конкретных нефтей и не должны редактироваться пользователем.

При необходимости задания источника разлива по аэрокосмической информации пользователь должен заранее подготовить данные о конфигурации нефтяного загрязнения, используя ГИС Marinfo, с использованием снимков со спутника либо непосредственно, либо обработанных специалистами по дешифрированию. В любом случае данные о контуре нефтяного пятна должны быть записаны в виде таблицы Marinfo, содержащей один или несколько замкнутых областей (regions), обозначающих контуры нефтяного пятна. Активизируя раздел меню **Исходные данные для моделирования** → **Тип разлива нефти** → **Площадной**, пользователь должен заполнить цветные поля на вкладке. Если информация о массе нефти отсутствует, ее приходится задавать исходя из предполагаемого типа разлива, его площади и, возможно, другой дополнительной информации.

Контур пятна задается выбором соответствующего файла *.tab, подготовленного, как указано выше.

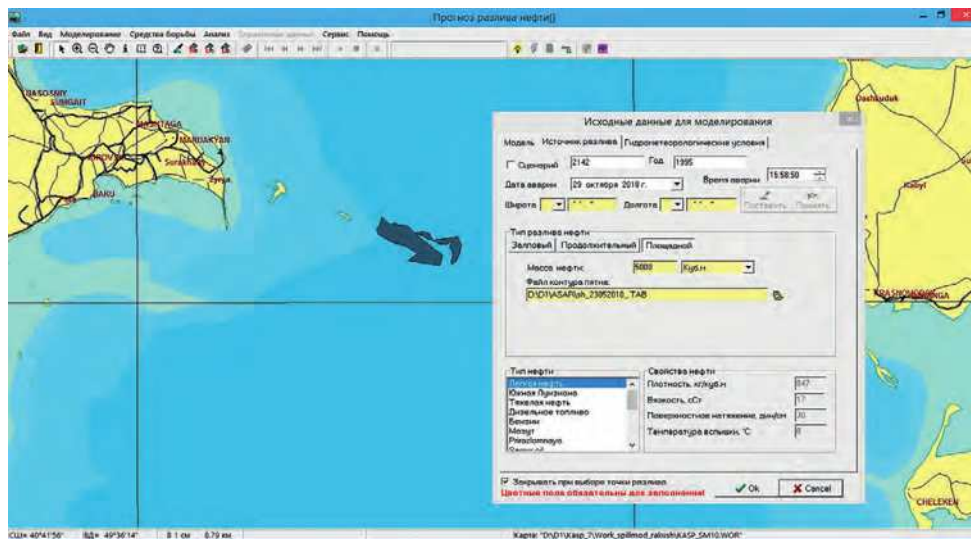


Рис П2.9. Задание параметров площадного разлива

П2.5.2. Данные гидрометеорологического прогноза

В штатном режиме использования оперативной версии программы «SPILLMOD» на этапе подготовки данных специализированного прогноза создаются наборы необходимых для расчета/прогноза данных о приводном ветре и поверхностных течениях, которые записываются автоматически в файлы с именами типа `uv_YYYYMMDD.bin` (течения), `wi_YYYYMMDD.bin` (ветер). Файлы содержат последовательные поля приводного ветра и течений в верхнем слое в интервале $-3 \div +2$ суток, считая от 0 часов UTC текущей даты. Чтобы использовать файлы прогноза при расчете распространения разлива нефти, необходимо на вкладке Исходные данные для моделирования → Гидрометеорологические условия выбрать опцию «По сценарию» и указать путь к файлам прогноза приводного ветра и течений.

Исходные данные для моделирования

Модель | Источники разлива | Гидрометеорологические условия

Ветер: По значению | По сценарию
Файл сценария: D:\PT\De_kasti\WCjuv_01.bin

Течения: По значению | По сценарию
Файл сценария: D:\PT\De_kasti\WCjuv_01.bin

Ice: ☒ Ice
Файл сплоч. льда:
Файл скорости льда:

Волнение: Большинство волнения (0..10 баллов) 0

Температура: Температура поверхности моря (-5..+40 C) 5

☒ Закрывать при выборе точки разлива
Цвета поля обязательны для заполнения!

Ok Cancel

Рис. П2.10. Задание гидрометеороусловий «по сценарию»

П2.5.3. Ручной ввод гидрометеорологических условий

П2.5.3.1. Ветер

Гидрометеорологические данные в модели можно вводить вручную. Для этого на вкладке **Исходные данные для моделирования → Гидрометеорологические условия** нужно выбрать опцию «По значению».

Для осуществления расчета или прогноза распространения нефти необходимо задать значения скорости и направления ветра и продолжительность его действия. Данные вводятся в виде таблицы, необходимые значения можно взять, например, из метеопрогноза. Если последнее (или единственное) в таблице значение длительности равно 0, то соответствующий ему ветер будет использоваться до конца расчета. Кнопка «Добавить» на показанном окне ввода данных открывает новое окно «Параметры ветра», заполнив поля которого пользователь добавляет строчку

в поле «Ветер». Строчки можно редактировать или удалять из последовательности с помощью кнопок «Изменить» и «Удалить».

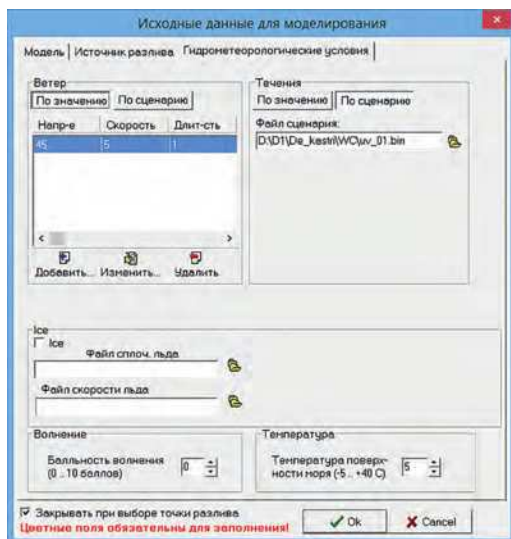


Рис. П2.11. Задание ветра «по значению»

П2.5.3.2. Течения

На вкладке «Течения» задание *течения по значению* предполагает заполнение полей окна «Точка течения». Координаты точки появятся автоматически при установке курсора в указанную точку и могут впоследствии быть отредактированы. Задание течений по значению предполагает ввод постоянных, т.е. **не меняющихся во времени** значений скорости течения. В районах с сильной пространственной и временной изменчивостью полей течений необходимо использовать заранее рассчитанные поля течений, записанные в соответствующем формате.

Введенные значения скоростей постоянных течений можно сохранить в файле сценария, нажав клавишу «Сохранить» в рассматриваемом окне.

Поля «Волнение» и «Температура» могут заполняются также по информации из УГМС.

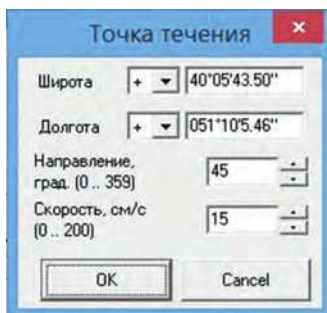


Рис. П2.12. Форма для «ручного» ввода данных о течениях

П2.6. Прогноз распространения аварийных разливов нефти в море

Старт модели

После задания исходных данных (данные о разливе нефти и гидрометеорологические данные) доступна кнопка «Старт», нажатием на которую осуществляется запуск расчетов.

После старта модели в строке состояния в нижней части экрана будет отображаться время после аварии (UTC) и интервал времени T_M , отсчитываемый после начала аварии. Одновременно в соответствии с заданным шагом отображения на экране будут появляться рассчитанные контуры нефтяного разлива. В левом нижнем углу экрана отображаются координаты курсора.

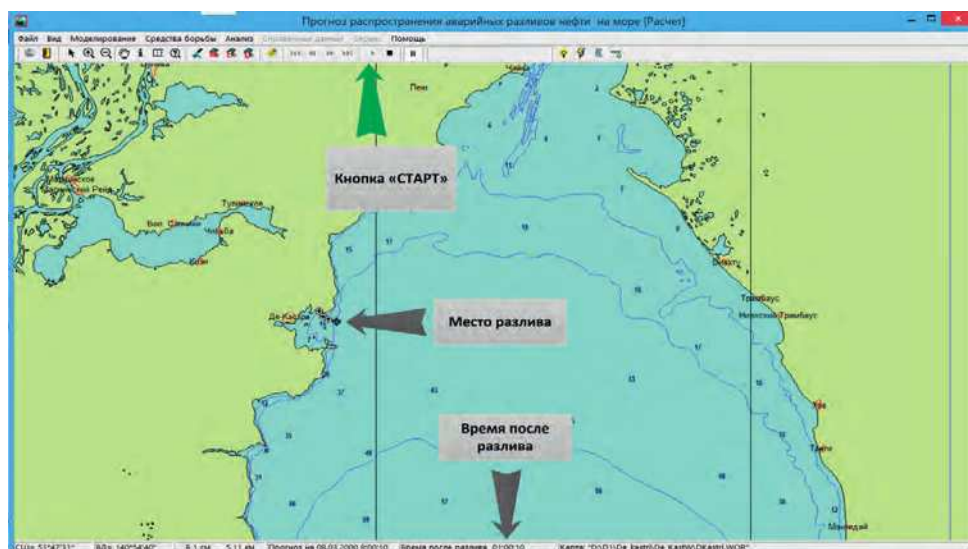


Рис. П2.13. Вид основного экрана после старта модели

Остановка расчетов. Пауза. Действия с картой

Остановить расчет всегда можно, нажав на кнопку «Пауза». При этом может понадобиться некоторое время для завершения текущего шага модели. Если в режиме «пауза» нажать на кнопку «Стоп», расчет будет прекращен.

При остановке расчетов можно:

- посмотреть графики изменения параметров (*Анализ* → *График*);
- отобразить / скрыть легенду отображения толщин нефтяного пятна;
- сохранить результаты расчета в виде сценария (*Моделирование* → *Сохранить сценарий*);
- сохранить текущее окно карты в растровом файле;
- просмотреть в виде анимации уже сформированные наборы изолиний;
- ввести дополнительную информацию в систему – изменить г/м условия, ввести боновые заграждения, нефтесборщики, применить диспергаторы, эмульгаторы, оценить вариант сжигания нефти;
- убрать/добавить слои на карту.

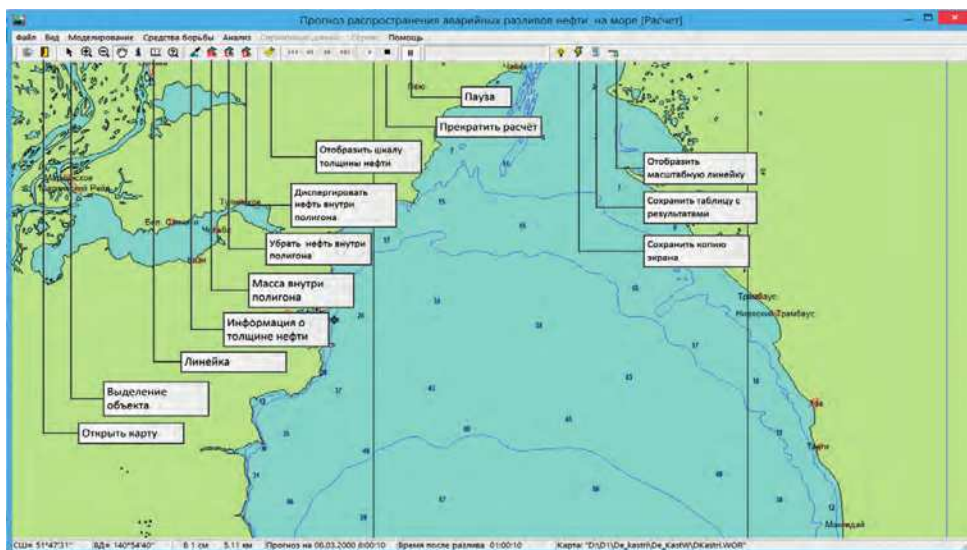


Рис. П2.14. Расположение основных элементов управления на основном экране

П2.7. Проблемы при использовании и способы их решения

Сообщения об ошибках

Вариант 1. Сообщение «*OLEserverMapInfoCannotbestarted*» означает, что была произведена попытка запуска Spillmod.exe на компьютере без предварительно установленной ГИС MAPINFO.

Вариант 2.

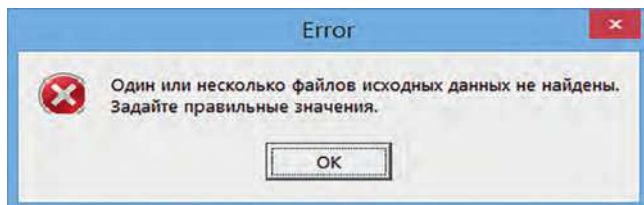


Рис. П2.15. Сообщение об отсутствии одного или нескольких файлов с исходными данными

Решение указано в п.1.2.3.

Вариант 3.

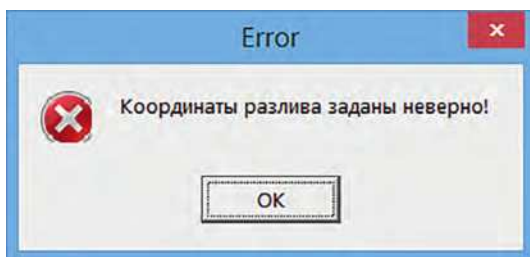


Рис. П2.16. Сообщение о некорректном вводе координат источника сброса нефти

Сообщение означает, что при указании места разлива была допущена ошибка, необходимо вернуться к заданию источника разлива.

Вариант 4.

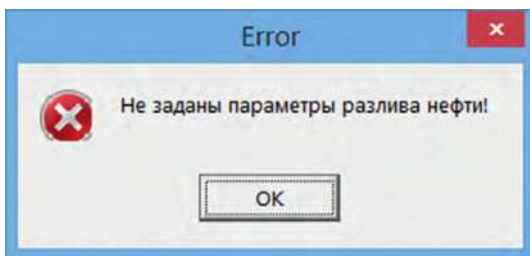


Рис. П2.17. Сообщение о некорректном вводе параметров разлива

Некорректно заданы или пропущены параметры разлива: масса или интенсивность, продолжительность в случае длительного разлива.

П2.8. Моделирование использования средств борьбы с разливом¹⁵

Боновые заграждения. Постановка

Боновые заграждения можно:

- добавлять – кнопка «Поставить»;
- редактировать – кнопка «Изменить»;
- удалять – кнопка «Удалить»;
- искать на карте (при многих боновых системах) – кнопка «Найти помеченный бон».

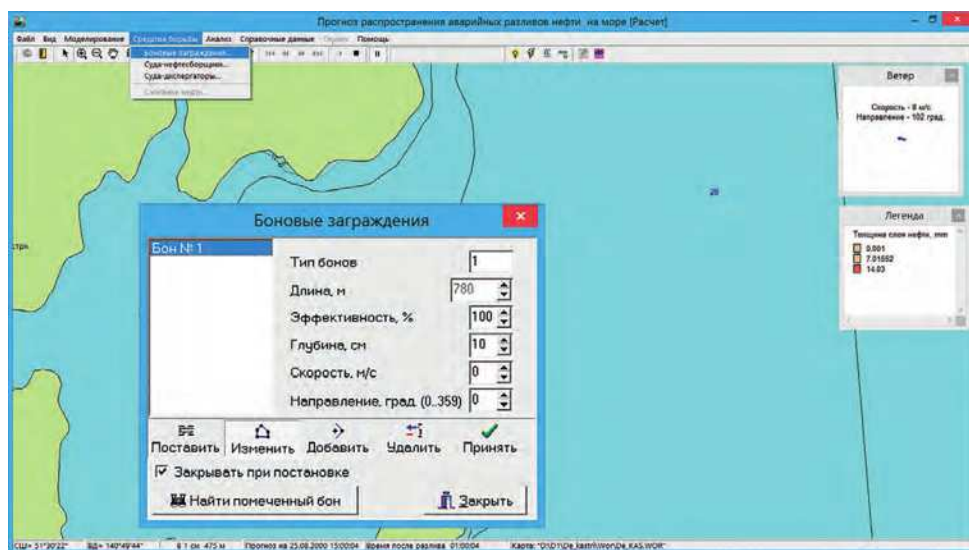


Рис. П2.18. Форма для установки и редактирования бонов

¹⁵ В версиях SPILLMOD для оперативного прогноза в штатном режиме не предполагается моделирование с использованием средств ЛАРН. Информацию в этом разделе следует рассматривать как ознакомительную.

Нефтесборщики

Для судов-нефтесборщиков задается:

- начальное положение;
- тип судна;
- направление движения (курс);
- скорость движения, м/с.

Для нефтесборщиков задаются следующие характеристики:

- радиус захвата, м;
- емкость для собранной нефти;
- производительность, кг/с.

В процессе расчетов в окошке «Суда-нефтесборщики» отображается для каждого нефтесборщика:

- количество собранной нефти;
- местоположение.

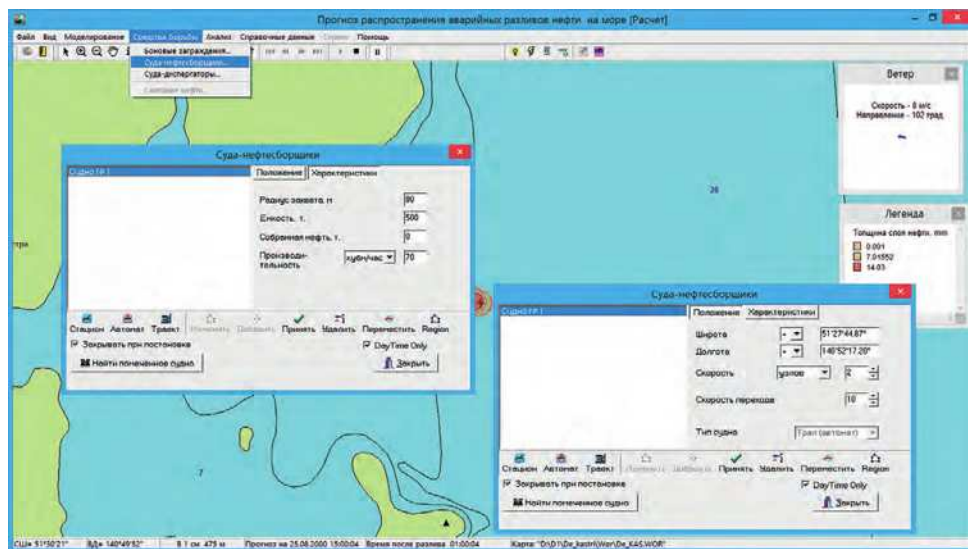


Рис. П2.19. Формы для установки и задания параметров скиммерных систем

Анализ результатов расчетов

На графиках показано (в процентах и в абсолютных единицах, тоннах) изменение:

- количества нефти на поверхности моря;
- количество испарившейся нефти;
- количество диспергированной нефти;
- количество нефти, собранной скиммером;
- количество нефти на берегу;
- количество сгоревшей нефти (опция).

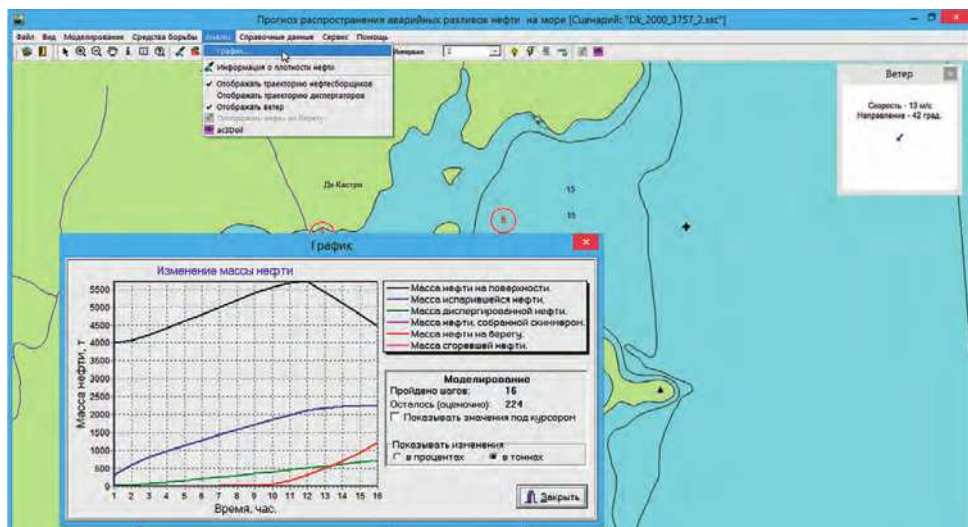


Рис. П2.20. Форма для отображения графика изменения основных параметров разлива

Действия с картой. Измерение расстояний

Во время остановки расчета из панели «Инструменты» можно воспользоваться средством «Измерение расстояний». После этого, установив курсор в заданную точку и удерживая левую клавишу мыши, перемещаем курсор в новую точку. «Кликнув» левой клавишей мыши один раз, начинаем измерение нового отрезка. «Два клика» заканчивают операцию измерения расстояний.

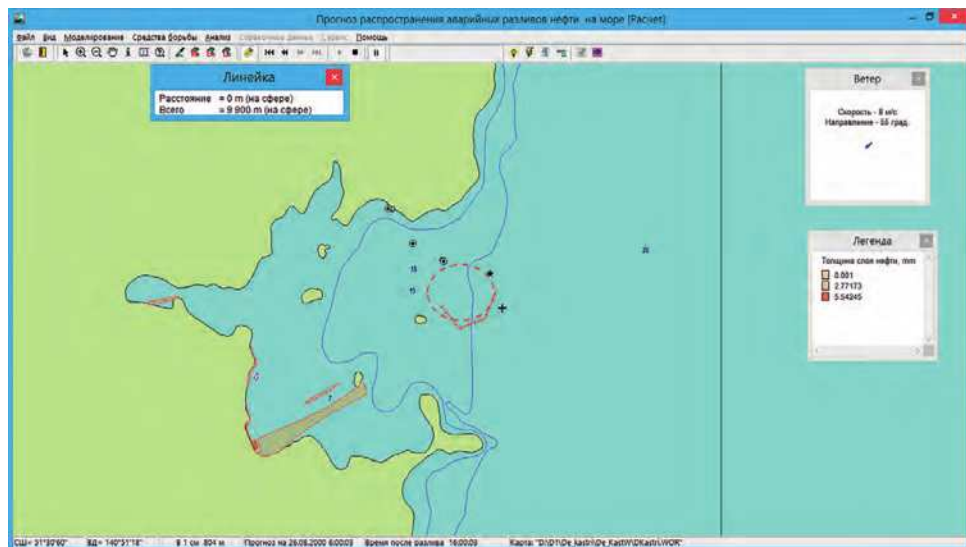


Рис. П2.21. «Линейка» для измерения расстояний

Сохранение сценария расчета

Сценарий – это запись результатов расчета распространения нефтяного разлива с определенными исходными данными либо совокупность исходных данных, достаточных для проведения такого расчета.

Адрес папки для сценариев «по умолчанию» записан в spillmod.ini, ее можно изменить в «настройках модели» либо задавать каждый раз вручную при сохранении сценария.

Для сохранения сценария расчета выберите в меню «Моделирование» опцию «Сохранить сценарий». После этого в появившемся окне «Сохранение сценария» укажите имя файла и путь.

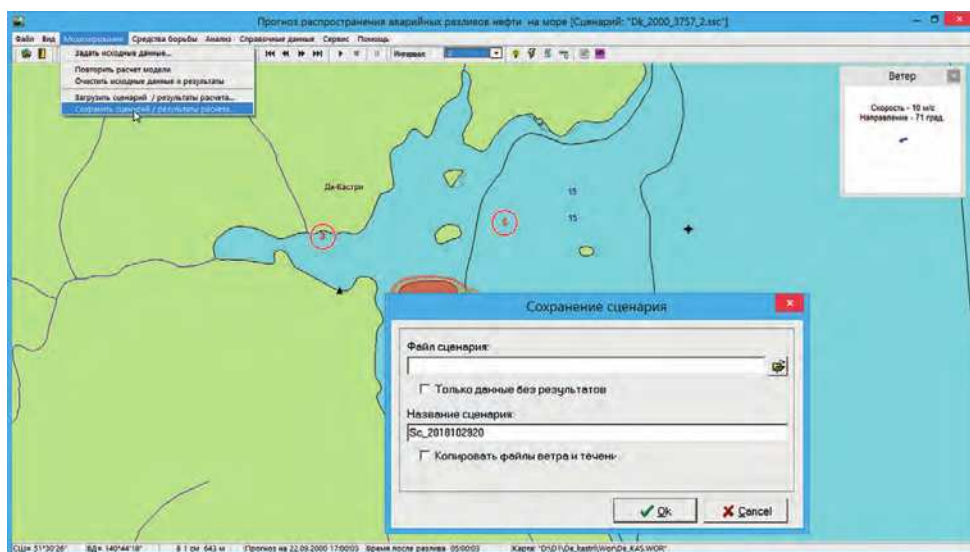


Рис. П2.22. Форма для сохранения сценария

Изменение отображения нефтяного пятна на карте

Чтобы изменить стиль отображения нефтяного пятна на экране компьютера, необходимо в разделе главного меню «Сервис» нажать опцию «Стиль отображения нефти».

Кнопки в окне «Стиль отображения нефти» позволяют изменить цвет и стиль основных линий и способов отображения нефтяного пятна на карте с помощью стандартных процедур, показанных на следующих рисунках.

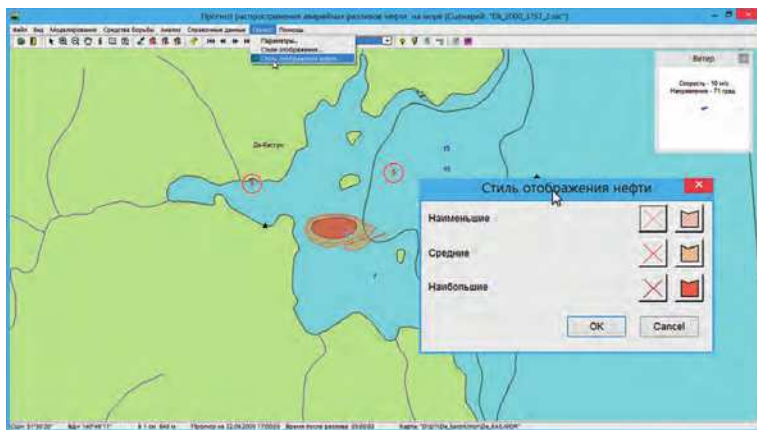


Рис. П2.23. Форма для изменения стиля отображения нефти

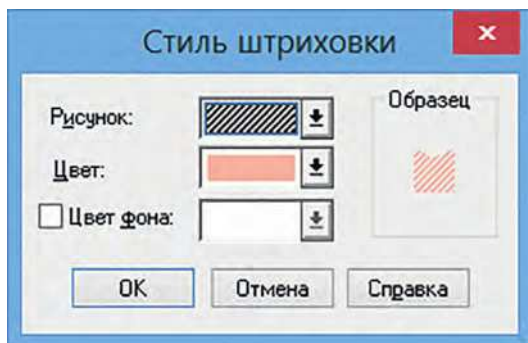


Рис. П2.24. Форма для изменения стиля штриховки

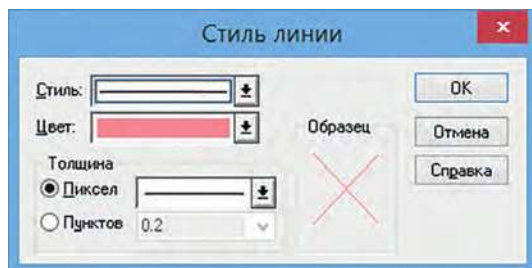


Рис. П2.25. Формы для изменения стиля линии

Условия прекращения расчета

Масса нефти на поверхности меньше определенной малой величины.

Оptionные разделы главного меню

Справочные данные

Этот раздел должен содержать архивную информацию о правовых вопросах, касающихся аварийных сбросов нефти в морскую среду, полезную для обучения информации о ТТХ средств сбора нефти и различных стратегиях борьбы с разливом.

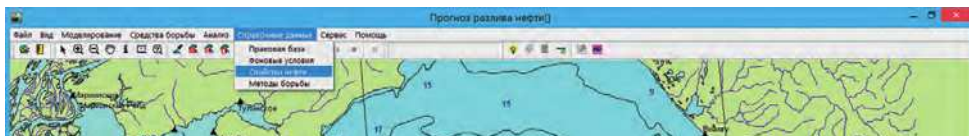


Рис. П2.26. Справочная система

Подготовка данных результата прогноза

Заключительный этап работы технологической цепочки состоит в подготовке информации для передачи заказчику прогноза. Этот этап в локальной версии ПК SPILLMOD тоже представляется интерактивным, т.к. состав и форма представления результатов могут варьироваться в зависимости от запроса и технических средств приема информации.

Для быстрой выдачи результата прогноза существует пункт меню «Сохранить карту» в разделе «Файл» и кнопка, доступные в режиме «Пауза» или «Стоп», т.е. после остановки расчета. В файле в формате JPEG сохраняется информация, содержащаяся на данный момент в окне карты. Папка по умолчанию – текущая папка для сценариев. Название файла по умолчанию зависит от того, было ли задано имя

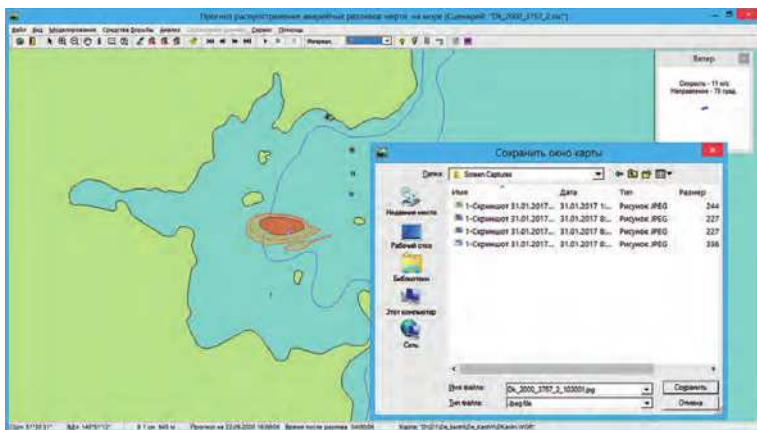


Рис. П2.27. Форма для сохранения изображения окна карты

сценария в данном расчете: `scrn_yuuyumdd.jpg`, если имя сценария не было задано, или `Ncs_yuuyumdd.jpg`, где `Ncs` – имя используемого сценария, если оно было задано. Имя файла может быть изменено пользователем.

Другой, более сложный вариант получения отчета – использование картографической информации, которая содержится в записанном сценарии. Ее можно использовать либо загрузив записанный ранее сценарий для отображения в `SPILLMOD`, либо с использованием `MAPINFO`. Для этого после окончания расчета необходимо в ГИС `MAPINFO` открыть папку с записанным сценарием, затем открыть файл `NscOil.tab`, где `Nsc` – название сценария. В данном слое содержатся последовательные положения нефтяного пятна за весь период расчета с шагом выдачи информации, заданном в исходных данных. Информацию о толщинах нефти внутри соответствующих контуров можно посмотреть, открыв соответствующую таблицу в окне `Browser`. Таблица содержит следующие колонки: *ID* – номер шага в сценарии, *NPP* – номер контура в шаге, *Density* – толщина слоя, соответствующая данному контуру, в мм.

Раскраска контуров соответствует распределению толщин в пределах данного шага. Изменить раскраску, например, сделать ее общей для всех шагов, можно, например, применив тематическую карту (*thematic map*) к данному слою (см. инструкцию к `MAPINFO`).

Для анализа изменения параметров разлива, кроме диаграммы баланса массы (Меню – Анализ – График), можно использовать также файл `tune.dat` текстовой файл с именем `Sc_N_..._dat`, где `N...` – уникальный номер, зависящий от времени записи файла. Файл записывается в папке со сценариями, его можно открыть после выхода из программы `SPILLMOD`. Параметры в файл выводятся следующие:

t – время в часах;

x – долгота в градусах;

y – широта в градусах;

M – общая пролитая масса нефти, т;

Ms – масса нефти на поверхности, т;

Me – испарившаяся масса нефти, т;

Md – масса нефти, диспергировавшая в водную толщу, т;

D – плотность нефти, кг/м³;

Msh – масса нефти, оставшаяся на берегу, т;

Area – площадь нефтяного загрязнения на поверхности моря, кв.м;

h – средняя толщина нефтяного slicka, мм;

W – скорость ветра в центре нефтяного пятна, м/с;

Ang – направление ветра, град (90 град – на восток, 0 – на север);

Cx – компонента вектора течений в центре пятна по параллели, см/с;

Cy – компонента вектора течений в центре пятна по меридиану, см/с;

Для анализа и построения графиков можно использовать, например, программу `MicrosoftOffice Excel`.

В директории со сценариями записываются файлы `tr_NNNNNNNN_s.mif` и `tr_NNNNNNNN_s.mid` – в экспортном формате ГИС `Mapinfo`, в которых содержатся данные о массе нефти, осажденной на определенных участках береговой линии. Файлы можно импортировать в `Mapinfo`, параметры в полученной таблице будут следующие:

ID – номер отрезка береговой линии;

Len – длина отрезка, м;

Oil – масса нефти, кг;

Ms – масса нефти на единицу длины береговой линии, кг/м.

Таблица П2.1

Структура файла Oiltypes.dat

Легкая нефть														
15	35,4	17	30	1,42										
150	190	235	280	325	370	415	460	505	554	609	662	712	764	850
72,7	64,2	56,7	51,6	47,6	45,2	41,5	37,8	34,8	30,6	29,1	26,2	24	22,5	11,4
2,5	3,5	4	4	4	4	3,9	3,9	3,8	4,2	4,5	4,2	1	1	51,6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Тяжелая нефть														
15	18,91	300	30	1,42										
150	190	235	280	325	370	415	460	505	554	609	662	712	764	850
72,7	64,2	56,7	51,6	47,6	45,2	41,5	37,8	34,8	30,6	29,1	26,2	24	22,5	11,4
1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	2	2	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5	72,4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Дизельное топливо														
8	40,2	5,1	30	10										
122	212	302	392	482	572	662	932							
86,3	69,9	57,8	49,3	43,5	39,5	36,4	23,8							
0	0	20	20	20	20	20	0							
86,3	69,9	57,8	49,3	43,5	39,5	36,4	23,8							
Бензин														
10	72	1	30	10										
104	140	176	212	248	284	320	356	392	428					
90,24	82,66	75,89	69,88	64,58	59,93	55,88	52,36	49,33	46,73					
26	4	14	26	14	1	3	7	3	2					
73,6	81,6	90,4	100	110,4	121,6	133,6	146,4	160	174,4					
Мазут														
15	22	8000	30	1,42										
150	190	235	280	325	370	415	460	505	554	609	662	712	764	850
72,7	64,2	56,7	51,6	47,6	45,2	41,5	37,8	34,8	30,6	29,1	26,2	24	22,5	11,4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Легенда

Название нефтепродукта														
1	2	3	4	5										
15	22	8000	30	1,42										

- 1 – количество фракций;
 2 – плотность нефтепродукта в единицах API;
 3 – вязкость нефтепродукта, сСт;
 4 – межфазное натяжение на границе нефть – вода, дин/см;
 5 – величина, обратная предельной доли воды в нефти.

Свойства нефти по узким фракциям

1	150	190	235	280	325	370	415	460	505	554	609	662	712	764	850
2	72,7	64,2	56,7	51,6	47,6	45,2	41,5	37,8	34,8	30,6	29,1	26,2	24	22,5	11,4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- 1 – температура кипения фракции, °F;
 2 – плотность фракции, API;
 3 – массовая доля фракции;
 4 – молекулярный вес фракции¹⁷.

¹⁷ Если молекулярный вес фракции неизвестен и четвертая строка занята нулями, то молекулярный вес пересчитывается в программе по формуле Воинова.

Приложение 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В МОРЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

При подготовке планов предупреждения и ликвидации аварийных разливов нефти (ПЛАРН), при анализе совокупной экологической выгоды (АСЭВ) в результате реализации тех или иных стратегий реагирования, при оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) необходимо рассмотреть множество сценариев распространения нефти в море, обусловленных изменчивостью гидрометеорологических условий и невозможностью заранее предсказать момент будущей аварии. 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, 2015].

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.

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 прикладных задачах необходимо оценить зоны потенциального воздействия от источников разливов нефти. С этой целью 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 противодействия разливу нефти. Для решения этой задачи требуются модели и методы, позволяющие описывать формирование области поверхностного нефтяного загрязнения с максимально возможной подробностью.

П3.1. Моделирование для ПЛАРН

Ответ на вопрос – существует ли угроза уязвимым ресурсам при возникновении ЧС, связанной с разливом нефти в море, – может быть дан при проведении риск-анализа распространения аварийных разливов нефти в море [Зацепина и др., 2014]. Используемые при этом математические модели должны по возможности адекватно описывать процессы трансформации нефти в морской среде.

Для анализа риска распространения разлива углеводородов путем математического моделирования рассчитываются все возможные сценарии распространения и трансформации разливов за период, достаточный для построения соответствующих статистических оценок. Гидрометеорологическая информация для анализа риска распространения разливов содержит согласованные метеорологические и гидрологические поля основных характеристик, влияющих на распространение и трансформацию нефти за 20-летний период времени, достаточный для исключения межгодовой изменчивости. Поскольку для этой задачи необходимо рассчитать десятки и сотни тысяч сценариев разлива в различных гидрометеорологических условиях, модели должны быть оптимизированы для повышения быстродействия.

В рамках анализа риска моделирование распространения разливов производится для каждого из вариантов технической аварии [Зацепина и др., 2015] с целью:

- определения зон риска распространения разливов для различных моментов времени, прошедшего с момента аварии, понимая под зонами риска акватории, за пределы которых разлив не выходит ни при одной из возможных гидрометеорологических ситуаций;
- расчета вероятности поражения зон особой значимости на акватории и побережье в зависимости от времени, прошедшего с момента аварии;
- расчета статистики естественного выветривания нефти из разлива в виде графиков максимального и минимального выветривания в зависимости от времени, прошедшего с момента аварии;
- определения сценариев распространения углеводородов, приводящих к поражению зон особой значимости и участков побережий с высоким приоритетом защиты.

При подготовке плана ЛРН необходимо определить состав и необходимое количество технических средств, предназначенных для противодействия распространению разлива нефти. При определении 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 [Зацева и др., 2016]. Оценка необходимого количества и типов скиммерных систем проводится на основании расчетов количества нефтеводяной эмульсии на поверхности моря, изменения ее вязкости при выбранных сценариях гидрометеорологических условий.

П3.2. Моделирование для АСЭВ

Под термином АСЭВ (Net Environmental Benefit Analyse (NEBA) в англоязычной литературе), понимается процедура принятия решения на основе сравнения возможных положительных и отрицательных последствий для окружающей среды применения различных технологий ЛРН. В результате этого анализа подготавливаются рекомендации о предпочтительности использования тех или иных технологий или запрете применения каких-либо из них.

Процедура АСЭВ рекомендована Комитетом по защите морской среды Международной морской организации [Guidelines for ..., 2015] и СТО 318.4.02-2005 «Правила применения диспергентов для ликвидации разливов нефти». Необходимость АСЭВ, особенно при применении диспергентов, вызвана тем, что диспергирование является специфическим методом реагирования, т.к. при этом нефть не удаляется немедленно из окружающей среды, а переводится в состояние более безопасное для некоторых ее компонентов и более доступное для ее природного разложения.

Анализ суммарной экологической выгоды проводится после определения зоны потенциального воздействия для каждого из сценариев технической аварии 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.

В качестве процедуры выбора сценариев для дальнейшего детального анализа может быть использована процедура инкрементального подхода к выбору критических сценариев распространения нефти [Зацева и др., 2017]. В соответствии с этим подходом из генеральной совокупности всевозможных сценариев распространения нефти отбираются варианты развития аварийной обстановки на основе использования ряда критериев, следующих из результатов риск-анализа распространения разливов, подготовка к реагированию на примере которых обеспечивает уровень готовности сил и средств, достаточный для обеспечения экологической безопасности с приемлемым уровнем риска. 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 (так называемый 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 [Семанов и др., 2017].

При математическом моделировании сценариев распространения разлива нефти используются сведения о технических характеристиках оборудования, используемого для сбора нефти, схемах лоцирования судов и расписании мобилизации применения сил и средств реагирования, изложенные в ПЛАРН.

При проведении расчетов принимаются во внимание ограничения на использование оборудования, связанные с метеорологическими условиями. Так, при расчетах считается, что применение механических средств сбора нефти невозможно при скорости ветра, превышающей 10 м/с, а при скорости ветра от 7 до 10 м/с используются J-образные ордера для траления нефти, в результате чего уменьшается производительность концентрирования нефти для последующего сбора скиммерной системой.

После выбора представительных метеорологических сценариев, как правило, сравнению подвергаются стратегии реагирования, предполагающие механический сбор нефти с помощью локализации нефтяного пятна боновыми заграждениями и использованием различных нефтесборных систем, сжигание нефти на поверхности воды, применение химических диспергентов или комбинации этих методов. Диспергенты¹⁸ многократно ускоряют естественный процесс разрыва нефтяной пленки на множество мелких капель, которые затем переходят в водную толщу и рассеиваются в ней до безопасных концентраций [Guidelines for ..., 2015].

Для расчета эффективности стратегий ЛАРН разрабатываются и применяются дополнительные модели процессов, описывающие воздействие на разлив технических средств локализации, сбора и ликвидации разливов на поверхности моря.

При моделировании следует принимать во внимание исходные данные о возможном времени начала аварии, продолжительности светлого времени суток, месте сдачи собранной в море нефти, времени, необходимом для швартовых операций, времени, необходимом для погрузки диспергента на внешнюю подвеску вертолета, скорости судов при механическом сборе нефти, эффективности скиммеров, ширине захвата навесной системы траления, скорости судна при обработке диспергентом, эффективности диспергента, ширине полосы обработки при использовании штанг для нанесения диспергента, скорости судов на переходе в порт, скорости вертолета с пустой корзиной, скорости вертолета/самолета при обработке пленки нефти, ширины обработки с воздуха и другие.

¹⁸ Диспергенты нефти – это химические препараты, специально разработанные для целей борьбы с разливами нефти, в состав которых входят нетоксичные, используемые в пищевой промышленности или парфюмерии, поверхностно активные вещества.

ПЗ.3. Моделирование для 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 $C_{oil}^k(x, y, z, t)$ (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.

Моделирование разливов нефти позволяет оценить вероятность 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. Эти пороговые 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. Выходную продукцию моделирования распространения нефти должны представлять собой карты вероятности возникновения высоких уровней загрязнения морской среды 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, моделирование распространения нефти для ОВОС следует проводить для сценариев сбросов с меньшими объемами, но имеющими значительно более высокую вероятность реализации.

Вероятность воздействия на биоресурсы оценивается как произведение вероятности возникновения высоких уровней загрязнения (определяемая по совокупности сценариев гидрометеорологических условий), 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.

Перечисленные прикладные 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.

Литература к Приложению 2

1. Зацепя 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.
2. Зацепя 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 2. Особенности реализации прикладных задач // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. 1 (107). С. 5–18.
3. Зацепя 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.
4. Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А. Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Труды ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 248–271.
5. Семанов Г. Н., Гутник А.Н., Зацепя С. Н. и др. Анализ суммарной экологической выгоды – инструмент принятия решения при ликвидации разливов нефти // Арктика: экология и экономика. 2017. № 1 (25). С. 47–58.
6. Guidelines for the use of dispersants for combating oil pollution at sea. IMO, 2015, London.

Зацева С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В.

**Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов
в случае аварийного разлива на морских акваториях
(научно-методическое пособие)**

Компьютерная верстка: Солнцева Л.А.

Корректоры: Пасютина Е.Б., Супье С.В.

Подписано в печать 30.11.18. Формат 70х100/16.

Печать цифровая. Тираж 300 экз. Заказ 1602.

Отпечатано в АО «Финпол». 109097, г. Москва, Б. Черкасский пер., д. 15-17, стр. 1, пом. 1.

Тел. (495) 913-46-60

ISBN 978-5-7637-0112-8

© Зацева С.Н., Ивченко А.А.,
Солбаков В.В.,
Становой В.В., 2018.

© ФГБУ «ГОИН», 2018.

© ФГБУ «ААНИИ», 2018.

© АО «Финпол», 2018.

16+

ISBN 978-5-7637-0112-8



9 785763 701128