

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И
МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(РОСГИДРОМЕТ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ Н.Н.ЗУБОВА»
(ФГБУ «ГОИН»)**

**Методические рекомендации по прогнозированию
распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного
разлива на морских акваториях**

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

ФГБУ «ГОИН»	ФИО
Отв. исполнитель проекта, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.	Зацева С.Н.
Старший научный сотрудник	Ивченко А.А.
Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	Солбаков В.В.

Содержание

1 ВВЕДЕНИЕ (ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА)	5
1.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	5
1.1.1 Актуальность.....	5
1.1.2 Область применения.....	5
1.1.3 Структура документа.....	6
1.2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ - ТЕХНОЛОГИЯ.....	8
1.3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	10
2 ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОГНОЗА	13
2.1 ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИСТОЧНИКЕ АВАРИИ.....	13
2.1.1 Информация по данным МЧС или МЧСЦ.....	13
2.1.2 Подготовка информации по результатам спутникового мониторинга.....	15
2.1.3 Форма информации об обнаруженных нефтяных пятнах на поверхности моря.....	19
2.1.4 Регламент взаимодействия при обнаружении нефтяного загрязнения на поверхности моря.....	19
2.1.5 Идентификация источников.....	21
2.2 О ПРОГНОЗЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ.....	21
2.3 О ГИС ФОРМАТАХ И КАРТОГРАФИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ.....	24
3 МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	29
3.1 МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ.....	29
3.2 ПРИМЕР ТЕХНОЛОГИИ.....	29
3.3 ВАРИАНТЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ.....	32
3.3.1 SeaTrackWeb (Швеция).....	32
3.3.2 ГеоЕСИМО (Россия).....	33
3.4 ВЫХОДНАЯ ПРОДУКЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	39
3.4.1 Траекторные модели.....	39
3.4.2 Модель SPILLMOD.....	40
3.5 ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ.....	43
3.6 ОЦЕНКА ВЫНОСА НЕФТИ НА БЕРЕГ.....	45
3.7 МОДЕЛЬ ADIOS2.....	45
4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИНФОРМАЦИОННОМУ ОБМЕНУ ПРИ ЧС	48
5 СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В МОРЕ	50
6 ПРИЛОЖЕНИЯ	51
6.1 ТИПОВАЯ ФОРМА СПРАВКИ О ПРОГНОЗЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВАРИЙНОГО РАЗЛИВА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ.....	51
6.2 СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ SPILLMOD.....	53
6.2.1 Функциональные возможности.....	53
6.2.2 Инструкция по работе с ПО SPILLMOD (для Каспийского моря).....	54
6.2.3 Описание структуры и основных функции ПК SPILLMOD.....	56
6.2.4 Подготовка к запуску.....	57
6.2.5 Первый запуск.....	58
6.2.6 Начало работы.....	58
6.2.7 Исходные данные для моделирования.....	60
6.2.8 Прогноз распространения аварийных разливов нефти в море.....	64
6.2.9 Проблемы при использовании и способы их решения.....	66
6.2.10 Моделирование использования средств борьбы с разливом.....	67
6.3 ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОВЕДЕНИЕ НЕФТИ В МОРСКОЙ СРЕДЕ.....	76
6.3.1 Свойства нефти.....	76
6.3.2 Процессы трансформации.....	78
6.3.3 Подводный выброс нефти.....	82
6.4 НЕКОТОРЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ.....	84
6.4.1 Перенос.....	84
6.4.2 Площадь нефтяного разлива.....	85
6.4.3 Испарение.....	86
6.4.4 Диспергирование.....	88
6.4.5 Образование эмульсии типа вода-в-нефти.....	89
6.4.6 Изменение плотности и вязкости.....	91
6.4.7 Взаимодействие с берегом.....	92
6.5 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В МОДЕЛИ SPILLMOD.....	92
7 ЛИТЕРАТУРА	97

Список рисунков

Рисунок 1. Компоненты технологии прогнозирования распространения аварийных разливов нефти	9
Рисунок 2. Следы облаков и бентосных образований, ошибочно интерпретируемые как пятна нефти.....	17
Рисунок 3. 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).....	17
Рисунок 4. Часть крупного пятна коричневой/оранжевой эмульгированной тяжелой фракции нефти (IFO 600).....	18
Рисунок 5. Крупные разорванные пятна тяжелой фракции нефти.....	18
Рисунок 6. Пример снимков со спутника ENVISAT 23-26.05.2010	18
Рисунок 7. Пример неправильной привязки снимка.....	20
Рисунок 8. Пример хранения информации на оперативных ресурсах ЕСИМО Гидрометцентра РФ	22
Рисунок 9. Пример визуализации результатов прогнозов для Баренцева моря по гидродинамической модели Гидрометцентра России	23
Рисунок 10. Сравнение детализации представления береговой линии на картах разных масштабов.	25
Рисунок 11. Детализация береговой линии участка акватории Кемской губы Белого моря на Интернет-ресурсе http://map.openseamap.org (а) и в Google Earth (б).....	26
Рисунок 12. Фрагмент расчетной сетки течений в Белом море.....	27
Рисунок 13. Схема технологической линии прогнозирования аварийных разливов нефти для Баренцева моря	30
Рисунок 14. Стартовый интерфейс пользователя при работе с программой SeaTrackWeb	33
Рисунок 15. Стартовое окно сервиса ГеоЕСИМО	34
Рисунок 16. Стартовое окно для выбора РМК.....	35
Рисунок 17. Задание параметров для расчета на РМК «Разлив нефти».....	35
Рисунок 18. Анализ данных моделирования разлива нефти в Каспийском море.....	37
Рисунок 19. Визуализация временных срезов моделирования нефтяного пятна в Google Earth	37
Рисунок 20. Пример вывод информации о разливе в ГеоЕСИМО	38
Рисунок 21. Пример вывода текстовой информации в Гео ЕСИМО	39
Рисунок 22. Одна траектория (а) и последовательные конфигурации (б) разлива нефти.....	40
Рисунок 23. Пример моделирования распространения разлива нефти с помощью модели SPILLMOD.....	42
Рисунок 24. Пример расчета основных параметров разлива нефти в модели SPILLMOD	42
Рисунок 25. Наблюденная на станции и рассчитанная по модели скорость ветра	43
Рисунок 26. Расчет распространения разлива нефти на двое суток с учётом ошибок прогноза ветра.....	44
Рисунок 27. Интерфейс для задания информации о разливе нефти в ADIOS2	47
Рисунок 28. Пример представления результатов расчетов в программе ADIOS2	47
Рисунок 29. Совокупность основных процессов, которым подвергается нефть в водной среде.....	79

1 ВВЕДЕНИЕ (ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА)

1.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1.1 Актуальность

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 последовательных положений и конфигурации нефтяного разлива, изменения физико-химических характеристик разлива выбираются стратегии борьбы с разливом для защиты в первую очередь приоритетных объектов, уязвимых нефтяным загрязнением морской среды.

1.1.2 Область применения

Настоящие методические рекомендации предназначены для специалистов Управлений гидрометеорологической службы РФ и научно-исследовательских учреждений Росгидромета. Рекомендации могут быть полезны специалистам других ведомств, в чью компетенцию входит оценка возможных угроз для окружающей среды в результате техногенных аварий на море. Прогнозирование распространения разливов нефти и нефтепродуктов в морской среде необходимо для оценки риска воздействия разливов на уязвимые объекты на акватории и на побережье в море. Распространения разлива нефти или нефтепродуктов в морской среде всецело зависит от гидрометеорологических условий в районе аварии. Тяжесть последствий разлива нефти зависит от масштаба сброса и взаимного расположения источника сброса и объектов социально-экономического и экологического характера, потенциально уязвимых разливами.

Методика прогнозирования, описанная в данном документе, ориентирована на расчет распространения нефти и нефтепродуктов в результате аварийного сброса и, прежде всего, на оценку поверхностного нефтяного загрязнения, которое может быть локализовано с помощью соответствующих средств противодействия разливу нефти.

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 системы уравнений термогидродинамики для нескольких сред – атмосфера, море, слой нефти на водной поверхности. В современных условиях прогнозисты имеют дело не с моделями физических процессов, а с программным обеспечением, созданным для решения конкретных задач. В задачу специалиста по прогнозированию входит подготовка исходных данных для решения

математической задачи и подготовка отчета о проведении расчетов. В настоящих рекомендациях обсуждаются основные вопросы, ответы на которые необходимы в ходе прогнозирования разливов нефти в море.

В документе использованы примеры расчетов распространения аварийных разливов нефти, выполнявшиеся авторами. В большинстве примеров, приведенных в целях демонстрации выходной продукции моделирования, было использовано программное обеспечение SPILLMOD, основные сведения о функциональных возможностях которого приведены в разделе 6.2.

1.1.3 Структура документа

Нефть и нефтепродукты, от газоконденсата до мазута, представляют собой чрезвычайно разные по физическим свойствам жидкости, плотность, вязкость, поверхностное натяжение и фракционный состав которых меняются после попадания в морскую среду и на поверхность моря. В связи с необходимостью использовать при прогнозировании сведения о возможных аналогах разлитой в море субстанции (легкая или тяжелая сырая нефть, мазут, моторное топливо), интерпретация расчетов по моделям выветривания нефти должна учитывать возможное несоответствие свойств пролитой нефти или нефтепродукта и ее аналога.

Прогнозирование распространения нефти в морской среде в результате аварийного сброса может иметь особенности в зависимости от информационного обеспечения. Интерпретация результатов прогнозирования распространения аварийных разливов нефти должна осуществляться с учетом неопределенностей в задании исходных данных. Во второй главе Рекомендаций обсуждаются варианты задания информации о разливе нефти, в том числе, при отсутствии некоторых важных сведений. В этом случае предлагается использовать консервативный подход, т.е. ориентироваться на наиболее неблагоприятные варианты сброса нефти для принятия мер по локализации и ликвидации разлива и минимизации его негативных последствий. Все параметры состояния морской среды (ветер, течения, ветровое волнение, температура, соленость, ледовые условия, концентрация взвешенных частиц) имеют пространственно-временную изменчивость и единственным способом их определения в произвольной точке акватории является применение гидродинамических моделей. Важно понимать, что любые модели представляют собой имитацию природных процессов и их точность априорно ограничена тем, насколько верно в них представлены реальные физические процессы. Расчет распространения нефтяных разливов в море относится к категории прогнозов на прогнозах и при его интерпретации следует принимать во внимание возможные погрешности гидрометеорологических прогнозов.

В третьей главе документа методика прогнозирования аварийных разливов нефти представлена как технология. Приведен пример реализации технологии для прогнозирования разливов нефти на примере организации рабочих мест в Северном УГМС и в Дагестанском ЦГМС - филиале ФГБУ «Северо-Кавказского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Обсуждаются варианты создания и эксплуатации технологий прогнозирования с использованием распределенных баз данных и сети Интернет.

При прогнозировании распространения аварийных разливов нефти очевидны два отчасти отдельных подраздела, в первом из которых акценты ставятся на прогноз перемещения и, по сути дела, оценку возможности воздействия на уязвимые объекты в регионе, а во втором, в фокусе внимания оказывается трансформация разлива нефти на поверхности моря. Для альтернативной оценки количества нефти, испарившейся в атмосферу, проникшей в виде капель в водную толщу и других процессов выветривания нефти в главе 3 приведены ссылки на общедоступное программное обеспечение, разработанное Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA), которое может быть полезным в ситуации, когда сведения о разлитом типе нефти или нефтепродукта отсутствуют и приходится оценивать варианты трансформации для возможных аналогов.

В главе 4 обсуждаются вопросы организации взаимодействия между Заказчиком прогноза распространения нефти и службами, обеспечивающими функционирование технологии прогнозирования. Заранее разработанный Регламент информационного обмена поможет сэкономить время на поиск и анализ достоверности данных об источнике аварии и обеспечит «усвоение» результатов прогнозирования при принятии управленческих решений.

Глава 6 посвящена Приложениям. В разделе 6.1 Приложения приведена возможная форма справки, которая должна готовиться по факту проведения расчетов, в разделе 6.2 сведения о применении программного обеспечения SPILLMOD, разработанного на основе модели нефтяного разлива, созданной в ФГБУ «ГОИН», включая инструкцию для пользователя. Конкретная реализация той или иной технологии прогнозирования может вносить коррективы и в форму итоговой отчетности и в подготовку данных для начала расчетов.

Судьба нефти в море после аварийного сброса в результате ЧС и возможность оказать негативное воздействие на уязвимые ресурсы в регионе контролируется целым рядом процессов трансформации разлива. Распространение нефти в море после аварийного сброса зависит от гидрометеорологических условий и свойств нефти или нефтепродукта. Некоторые определения и сведения об основных характеристиках нефти и нефтепродуктов приведены в разделе 6.3.1 Приложения. Базовые сведения об основных процессах трансформации нефти в море и некоторые определения даны в разделе 6.3.2 Приложения. Для большинства процессов в разделе 6.4 Приложения приведены наиболее распространенные расчетные

соотношения. Поскольку изученность многих процессов и экспериментально, и теоретически остается недостаточной, по мере появления новых данных исследований, некоторые из соотношений могут претерпеть изменения.

Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов в результате аварийного сброса в морскую среду следует отнести к прогнозам событий редкой повторяемости, носящих чрезвычайный характер. При испытаниях подобного рода моделей и технологий прогнозов необходимо, прежде всего, использовать региональную информацию о произошедших событиях. Успех в применении той или иной модели нефтяного разлива при прогнозировании распространения нефти на любом из морей Мирового океана не дает оснований рассчитывать на аналогичный результат при аварийной ситуации на другой акватории.

1.2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ - ТЕХНОЛОГИЯ

Прогнозирование распространения нефти в море осуществляется путем реализации нескольких шагов, в совокупности образующих технологию. 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. Аналогично, 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, либо реализующее расчеты по соответствующим моделям (атмосферы, океана, нефтяного разлива), либо отвечающее за взаимодействие с локальной или распределенной базой данных, куда, в соответствии с разработанной спецификацией взаимодействия компонент технологии, размещаются результаты расчетов. Как правило, конечные результаты моделирования представляются в форматах распространенных геоинформационных систем. Некоторые варианты реализации технологий прогнозирования распространения аварийных разливов нефти обсуждаются в главе 3 документа.

На рисунке 1 показаны все необходимые компоненты для реализации прогноза распространения нефти. При отсутствии или ненадлежащем функционировании одной из компонент прогноз будет невозможен, либо ограниченно эффективен.

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?

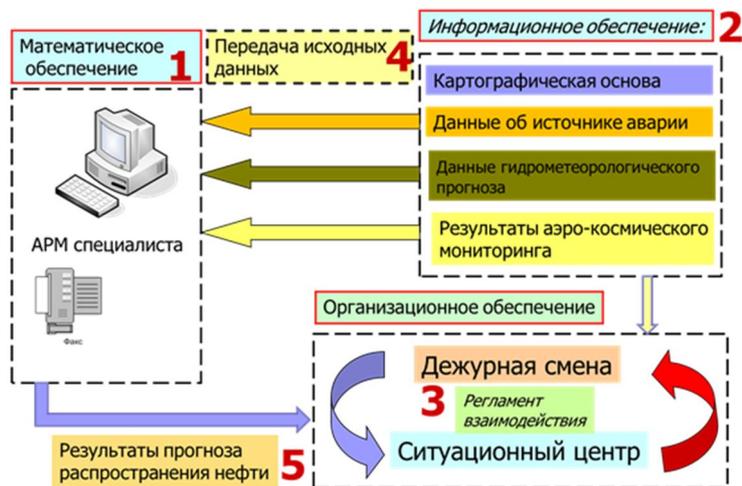


Рисунок 1. Компоненты технологии прогнозирования распространения аварийных разливов нефти

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 ее передавать 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 в разработке Регламента взаимодействия между Заказчиком прогноза, в роли которого может выступать региональный центр МЧС или МКСЦ и службой или организацией, обеспечивающей предоставление прогнозов распространения нефти в море в результате аварийного сброса.

Каждый из элементов технологии прогнозирования распространения аварийных разливов нефти 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.

Что такое адаптация? Адаптация – один из самых важных этапов реализации технологии прогнозирования распространения аварийных разливов нефти, 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 «операторов», или людей, 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. Технология прогнозирования предполагает, что все элементы ее реализации, кроме интерактивного ввода данных об источнике аварии, по умолчанию готовы к автоматическому использованию. Таким образом, первым шагом в подготовке к прогнозированию распространения аварийных разливов нефти, должно стать создание технологической линии прогнозирования. Пример такой технологической линии приведен в главе 3 документа.

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 прогнозирования, которые можно использовать для принятия управленческих решений. В справке по результатам прогнозирования должны быть отражены все сведения, использованные при расчетах. Типовая (возможная) форма справки приведена в Приложении к документу. 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.

1.3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем документе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Нефтяное загрязнение (в море) - по определению ИМО, означает нефть в любом виде, включая сырую нефть, жидкое топливо, нефтесодержащие осадки, нефтяные остатки и очищенные нефтепродукты

Зона потенциальной опасности для объекта – область акватории, в которой при аварийном сбросе нефти в морскую среду возможно поражения уязвимых объектов с приоритетами защиты.

Локализация разлива (нефти) - комплекс мероприятий, направленных на предотвращение распространения разлитой (или выливающейся) нефти на поверхности моря путем установки боновых заграждений.

Разлив (нефти) - сброс нефти в воду независимо от причин и обстоятельств, вызвавших такой сброс, который приводит к изменению природных условий морской среды и может нанести ущерб обитающим в ней живым организмам, побережью, а также промышленным объектам и рекреационной зоне, здоровью человека.

Дешифрирование космических снимков - процесс опознавания по спутниковому изображению отдельных предметов и объектов, границ контуров, а также определение их количественных и качественных характеристик с обозначением их соответствующими условными знаками.

Масштаб воздействия – оценка линейных и площадных характеристик нефтяного разлива, изменяющихся с течением времени после сброса под действием растекания, диффузии, физико-химических процессов. Масштаб воздействия зависит от количества сброшенной в воду нефти, и ее физико-химических свойств, режима сброса (продолжительный или одномоментный/залповый), гидрометеорологических условий.

Режим сброса нефти – оценка интенсивности истечения ($\text{м}^3/\text{час}$) нефти или нефтепродукта, её изменение со временем и продолжительность истечения.

В настоящем документе применены следующие сокращения:

24/7 – обеспечение прогноза 24 часа в сутки 7 дней в неделю

ASAR -Advanced Synthetic Aperture Radar - радиолокатор с синтезированной апертурой

SPILLMOD – (Spill Modelling) название модели нефтяного разлива и соответствующего ПО, разработанных в ФГБУ «ГОИН»

ААНИИ – Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

АПС – аппаратно-программные средства

АРМ – автоматизированное рабочее место

АСОИИ – автоматизированная система обработки оперативной информации в Гидрометцентре России

ВСВ (UTM) – всемирное скоординированное время (бывший Гринвич)

ГИС – геоинформационная система

ГОИН – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»

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), агентство ООН, занимающееся вопросами безопасности судоходства и сохранения чистоты океанов
- 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
- МКСЦ** – морской координационно-спасательный центр
- МЧС** – Министерство по чрезвычайным ситуациям
- НИУ** – научно-исследовательские учреждения
- ООПТ** – особо охраняемые природные территории
- ПАВ** – поверхностно-активные вещества
- ПК** – программный комплекс
- ПКМ** – правая клавиша мыши
- ПО** – программное обеспечение
- РАН** – Российская академия наук
- РЛИ** – радиолокационное изображение
- РМК** – расчетно-модельный комплекс
- Росгидромет** – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.
- 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
- УФ** – ультрафиолетовый диапазон спектра излучения
- ЧС** – чрезвычайная ситуация
- ЭКО ЕСИМО** – Электронная картографическая основа ЕСИМО

2 ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОГНОЗА.

2.1 ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИСТОЧНИКЕ АВАРИИ

2.1.1 Информация по данным МЧС или МКСЦ

Составление прогноза распространения аварийного разлива нефти возможно при наличии полной информации об источнике разлива нефти, гидрометеорологических условиях в точке разлива и на прилегающей акватории.

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 сброса нефти следует использовать консервативные оценки и рассматривать сброс нефти как продолжительный, начало которого положено самим фактом аварии, а окончание не определено. *Продолжительность сброса нефти*, таким образом, будет определена как разность времен начала аварии и последнего момента времени, на который дается гидрометеорологический прогноз. Уточнение информации о разливе необходимо производить постоянно в течение всей кампании по борьбе с разливом, и прогноз должен даваться всякий раз, когда поступают новые данные прогнозов течений и ветра и когда появляется возможность уточнить сведения о типе нефти и характеристиках сброса.

При невозможности получения информации об объеме и интенсивности утечки нефти или нефтепродукта при аварии прогнозирование следует проводить, исходя из максимально возможных значений, указанных в Постановлениях Правительства Российской Федерации от 14 ноября 2014 г. N 1189 "Об организации предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации", 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 процентов 2 смежных танков максимального объема;

б) нефтеналивные баржи (не имеющие разделительных переборок) - 50 процентов их общей грузоподъемности;

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 процентов 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 процентов 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 процентов 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 процентов 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 т.н. инерционный прогноз, предполагая, что и скорость ветра, и скорость течений в районе в ближайшее после аварии время будут не слишком отличаться от измеренных величин в точке и в момент аварии.

2.1.2 Подготовка информации по результатам спутникового мониторинга

Для обеспечения спутникового мониторинга загрязнения морских акваторий в специализированных центрах по приему аэрокосмической информации 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);
- представление выделенных контуров в векторном формате (в виде шейп-файлов).

Для обнаружения нефтяного загрязнения на морской поверхности используют современные средства ДЗЗ в широком диапазоне длин волн (ультрафиолетовом (УФ), видимом, ближнем и дальнем инфракрасном (ИК) и микроволновом (СВЧ)), однако при использовании спутниковых средств ДЗЗ, наиболее эффективными являются радиолокационные методы. Радиолокационные методы являются всепогодными, то есть качество информации на радиолокационных изображениях не зависит от влияния освещенности и облачности.

Возможность обнаружения из космоса нефтяных пленок на морской поверхности в активном микроволновом диапазоне определяется эффектом сглаживания пленками

высокочастотной составляющей морского волнения (наиболее важен процесс выглаживания мелкомасштабных компонент ветрового волнения). Присутствие пленок на взволнованной морской поверхности приводит к уменьшению радиолокационного рассеяния 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/сек (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.

Для идентификации нефтяных загрязнений моря, помимо радиолокационных изображений (РЛИ), могут быть использованы съемки многозональных сканирующих устройств видимого диапазона среднего и высокого разрешения. Эффективность использования указанных средств определяется следующими характеристиками: чувствительностью к областям выглаживания морской поверхности (поверхностной шероховатости); толщиной пленки; пространственным разрешением; периодичностью повторного обзора; оперативностью обработки и доставки информации и т.п. Более надежное обнаружение нефтяных загрязнений моря можно выполнить по совокупности космических снимков видимого и микроволнового диапазонов высокого пространственного разрешения. На видимых изображениях нефтяные разливы часто маскируются облачностью (Рисунок 2а), процессами цветения вод и мелководными участками дна.

В видимом диапазоне нефтяное пятно может быть как темнее, так и светлее фона, в зависимости от положения источника освещения (Солнца). Морские водоросли и донные скальные образования могут привести к ошибочной идентификации нефти, как показано на Рисунке 2б. В процессе дешифрирования на радиолокационном изображении автоматически или интерактивно выделяются участки, отличные по яркости изображения (темные пятна) от фоновой морской поверхности (серый тон). Далее в учет принимаются дополнительные признаки: форма, размер, контуры, текстура, границы, контраст пятно - чистая вода, а затем косвенные признаки - положение пятен относительно возможных источников загрязнения.



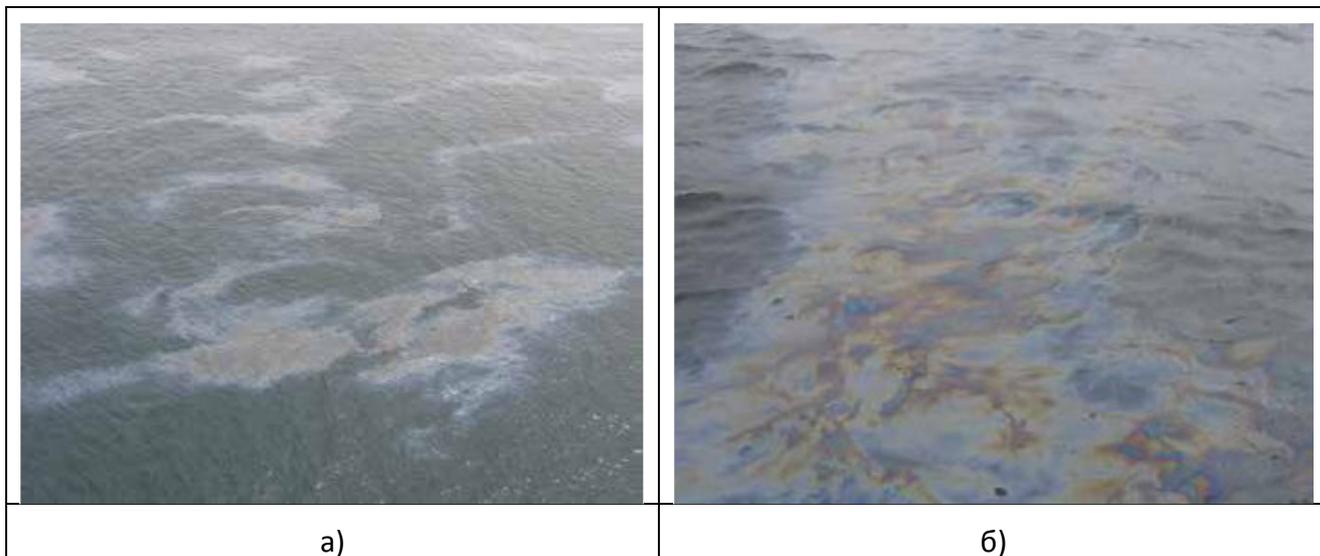
а)



б)

Рисунок 2. Следы облаков и бентосных образований, ошибочно интерпретируемые как пятна нефти

Так как, помимо пленок нефти, нефтепродуктов и ПАВ на РЛИ могут отобразиться проявления процессов в верхнем слое моря и придном слое атмосферы, то для повышения достоверности идентификации нефтяных пятен в рассмотрение необходимо принимать дополняющую океанологическую и гидрометеорологическую информацию, и, в первую очередь, данные о состоянии водной поверхности, скорости и направлении ветра.



а)

б)

Рисунок 3. 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)



Дешифрирование спутниковых радиолокационных изображений – сложный процесс, требующий для выполнения этой работы опытных специалистов-дешифровщиков. Нефтяные пленки на радиолокационных изображениях довольно часто сложно отличить от неоднородностей на морской поверхности, вызванных другими причинами. Сглаживание ветрового волнения на морской поверхности может быть вызвано не только нефтяными пленками, но и самыми 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 др. могут создавать похожие поверхностные проявления на радиолокационных изображениях, которые легко спутать с сигнатурами нефтяных разливов.. На Рисунке 6 приведен пример двух последовательных радиолокационных съемок акватории в районе Нефтяных Камней на Каспийском море.

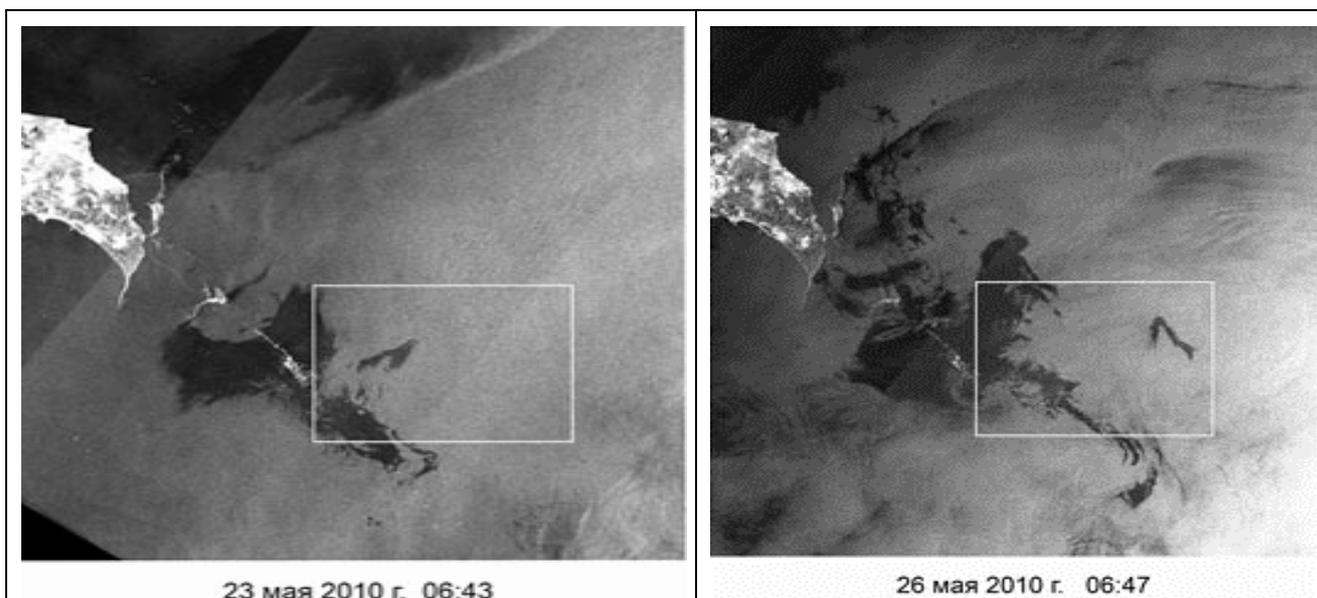


Рисунок 6. Пример снимков со спутника ENVISAT 23-26.05.2010

При анализе космоснимков принимаются во внимание геометрические характеристики нефтяных пятен (размер, форма), 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.

2.1.3 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 (оконтуривание) 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).

Информация о загрязнении поверхности моря нефтью и нефтепродуктами должна включать следующие параметры:

- Контуры нефтяного загрязнения на поверхности моря в виде полилинии;
- Количество нефти в каждом из контуров (если возможно);
- Тип нефтепродукта на поверхности моря (если возможно).

Минимальная площадь нефтяного пятна, подлежащая мониторингу, составляет 0,01 км², меньшие площади нефтяных разливов не представляют существенной угрозы для окружающей среды и не подлежат наблюдениям.

Информация спутникового мониторинга должна составляться специалистом по дешифрированию на основании обработки спутниковых снимков в различных диапазонах спектра.

Результаты интерактивного дешифрирования на радиолокационных изображениях нефтяных пленок на морской поверхности должны быть представлены в векторном формате (в виде шейп-файлов, широко используемых в различных ГИС). Все точки контуров нефтяной пленки должны быть геокодированы, чтобы, при необходимости, быть нанесенными на карту любой проекции и масштаба.

2.1.4 Регламент взаимодействия при обнаружении нефтяного загрязнения на поверхности моря

Моделирование распространения нефтяных загрязнений в морских акваториях на основании данных спутникового радиолокационного мониторинга, является важным элементом системы оперативной поддержки реагирования на чрезвычайные ситуации, связанные с морскими нефтяными разливами.

В случае ЧС, связанной с разливом на морской поверхности нефти/нефтепродуктов необходимо провести детальный анализ информации спутникового мониторинга по интересующему региону. Для использования в модели расчета нефтяного загрязнения в море информации спутникового мониторинга необходимо:

1. Провести предварительную обработку спутникового радиолокационного изображения (распаковку, вырезку фрагмента, радиометрическую коррекцию и географическую привязку);

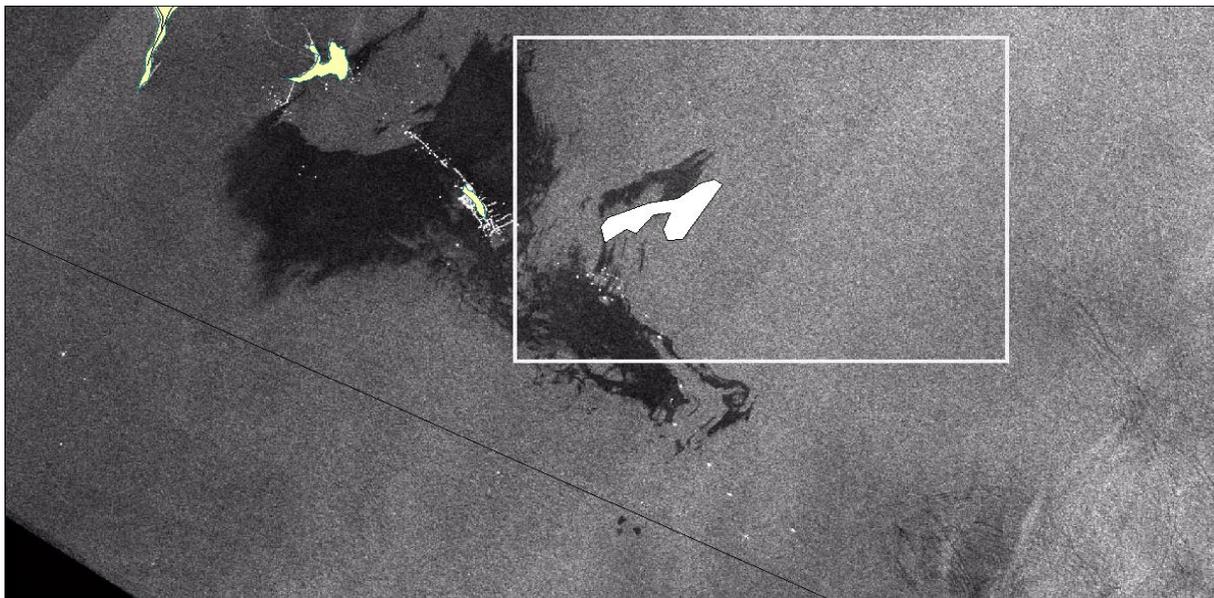


Рисунок 7 Пример неправильной привязки снимка

2. Осуществить дешифрирование на радиолокационном изображении обнаруженных пятен нефти на поверхности моря;
3. Оконтурировать обнаруженные нефтяные пятна на поверхности моря.
4. Подготовить информацию о контурах нефтяных пятен в электронном виде в векторном формате (в виде таблицы Mapinfo или Shape файла ArcGis);
5. Записать дату и время спутниковой радиолокационной съемки в стандарте ВСВ/UTC в имени файла или архива с данными, например, Oil_Caspian_Sea_20110523_1718.rar.
6. Оценить, если есть основания, площадь нефтяного разлива, предполагаемый объем аварийного сброса или толщину нефти внутри контуров.
7. Сделать выводы, если есть основания, о возможном источнике загрязнения.
8. Передать информацию с темой «Контурные обнаруженных нефтяных пятен. Дата. Время» по электронной почте в службу или организацию, обеспечивающую прогнозирование распространения разливов нефти.
9. При обнаружении предполагаемых нефтяных пятен на поверхности моря продолжить мониторинг акватории. При повторном обнаружении нефтяного загрязнения повторить п.1 – п.8 настоящего Регламента.

10. Дешифрованные и географически привязанные снимки с обнаруженными пятнами нефти на акватории сохранить в специализированном хранилище данных и направить для возможного последующего анализа ситуации.

2.1.5 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. С этой целью результаты представляются в ГИС-формате, а, зачастую, программное обеспечение сразу строится как ГИС приложение, либо с использованием ГИС технологий. Следует отметить, что траектория распространения разлива нефти, в тех случаях, когда о ней можно говорить¹, определяется расположением источника и гидрометеорологическими условиями. Таким образом, наличие угрозы воздействия нефтяного разлива на уязвимые объекты (УО) и особо охраняемые природные территории (ООПТ) можно спрогнозировать без полного набора информации об источнике разлива, однако, для оценки масштабов воздействия необходимо уточнить все параметры разлива, включая дату и время, координаты, объем, интенсивность и продолжительность сброса, тип нефти или нефтепродукта с максимальной детализацией.

2.2 О ПРОГНОЗЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Определение характеристик гидрометеорологических условий в месте аварийного сброса нефти на морской акватории возможно на основании соответствующих прогнозов. С этой целью для каждого региона необходимо разработать и ввести в оперативную практику модели для расчета метеорологических параметров приземного слоя атмосферы над морем, гидрологических параметров для океана, включающих поля течений на различных горизонтах, поля температуры и солености, поля параметров ветрового волнения.

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

¹ При продолжительном истечении нефти более корректно говорить не о траектории, но рассматривать последовательные конфигурации нефтяного разлива

Приведем пример размещения данных для использования при прогнозировании аварийных разливов нефти на Каспийском море. Обновляемый в оперативном режиме массив данных предназначен 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>



Рисунок 8. Пример хранения информации на оперативных ресурсах ЕСИМО Гидрометцентра РФ

Основу массива составляет продукция оперативной системы АСООИ Гидрометцентра РФ, в рамках которой действует технология прогноза гидрометеорологических характеристик Каспийского моря. Ежедневно 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.

Мнемоника именования файлов:

fcstYYYYMMDD_00.bin

fcstYYYYMMDD_12.bin

где *YYY*, *MM*, *DD* — календарные атрибуты стартовой даты прогноза.

Файлы записаны в бинарном виде (*form='binary'*) и допускают обработку (чтение) как в режиме последовательного доступа, так и в режиме прямого доступа.

Структуру файла удобно рассматривать в контексте языка Фортран. Содержимое файла прогностических полей можно представить как запись одного 4-мерного массива (типа *integer*2*):

$$fcst(nx,ny,nf,nt) \iff fcst(1:126, 1:216, 1:5, 1:49)$$

($nx=126, ny=216$) — горизонтальная сетка модели Каспийского моря с пространственным ,

$l: nx$ — упорядоченность по долготе с запада на восток, шаг сетки по долготе меняется с широтой (массив координат следует получить у авторов модели);

$l: ny$ — упорядоченность по широте с юга на север, от широты 36,525 град. с.ш. с постоянным шагом 0,05 град;

$l: nf=5$ — последовательность прогностических полей:

- 1) Ветер: зональная составляющая скорости ветра (u-компонента) [см/с];
- 2) Ветер: меридиональная составляющая скорости ветра (v-компонента) [см/с];
- 3) Течения: восточная компонента вектора (u-компонента течения) [мм/с];
- 4) Течения: северная компонента вектора (v-компонента течения) [мм/с];
- 5) Уровень моря: в отклонении от невозмущенной поверхности -27 м БС [см].

$l: nt=49$ — заблаговременность прогностических полей: 0, 1, 2, ..., 47, 48 час.

Дополнительно к цифровым массивам данных полезно размещение на ресурсах и графической информации о соответствующих полях гидрометеорологических характеристик, как, например, на оперативных ресурсах ЕСИМО Гидрометцентра РФ.

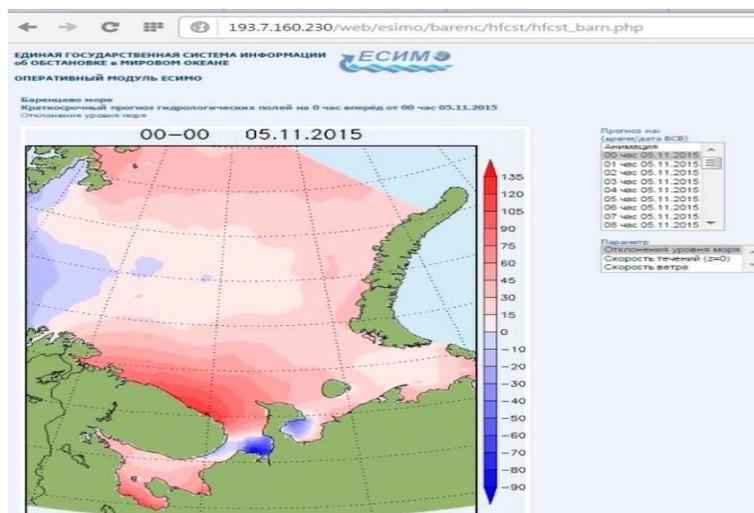
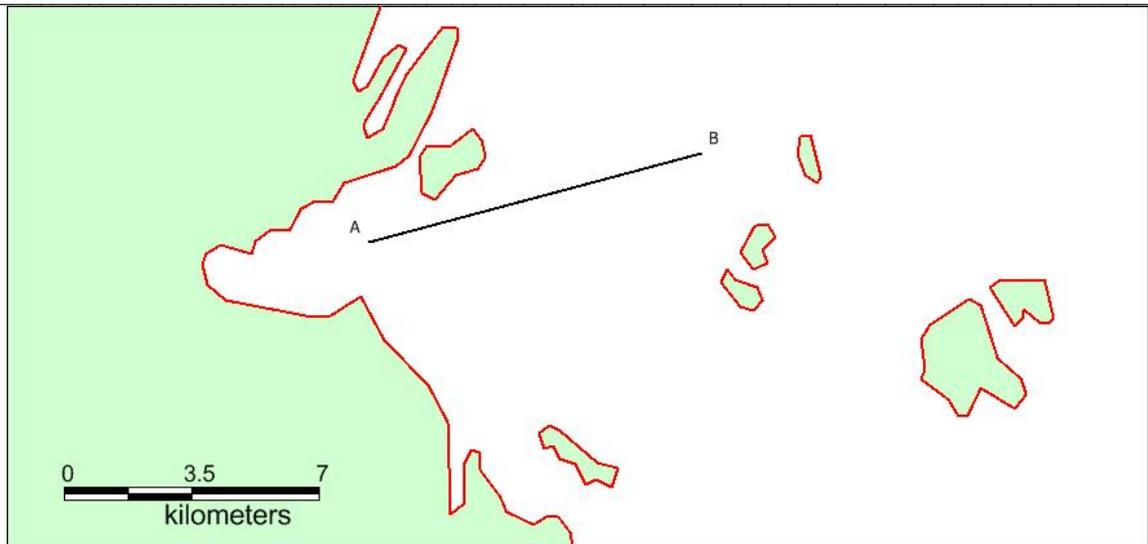


Рисунок 9. Пример визуализации результатов прогнозов для Баренцева моря по гидродинамической модели Гидрометцентра России

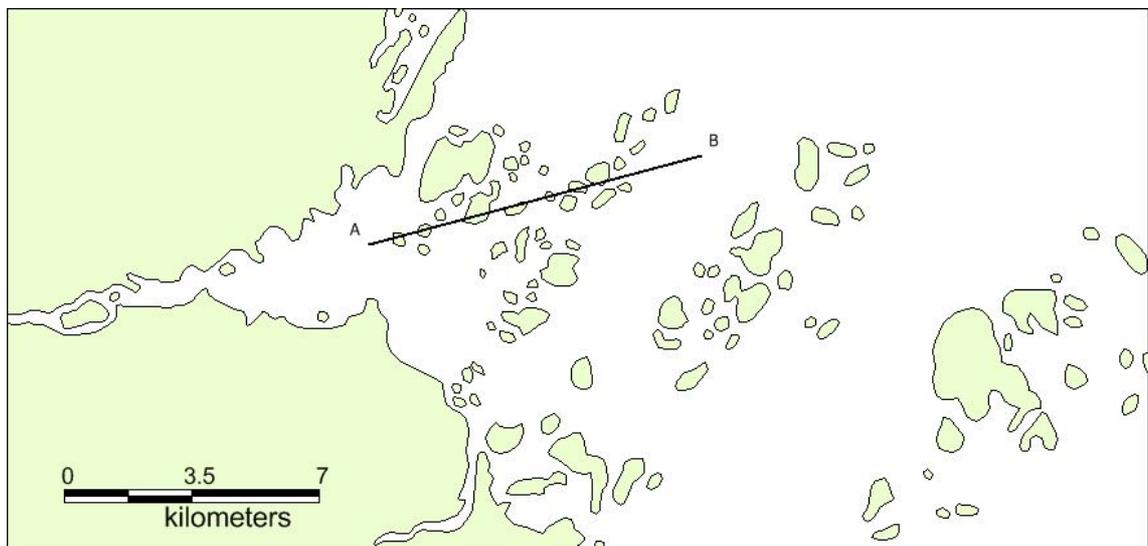
На сайтах международных организаций (NCEP, ECMWF) прогнозы гидрометеорологических полей, как правило, размещаются в машинно-независимом двоичном формате файлов NetCDF (Network Common Data Form), являющимся стандартом для обмена научными данными, прежде всего в метеорологии.

2.3 О ГИС ФОРМАТАХ И КАРТОГРАФИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ

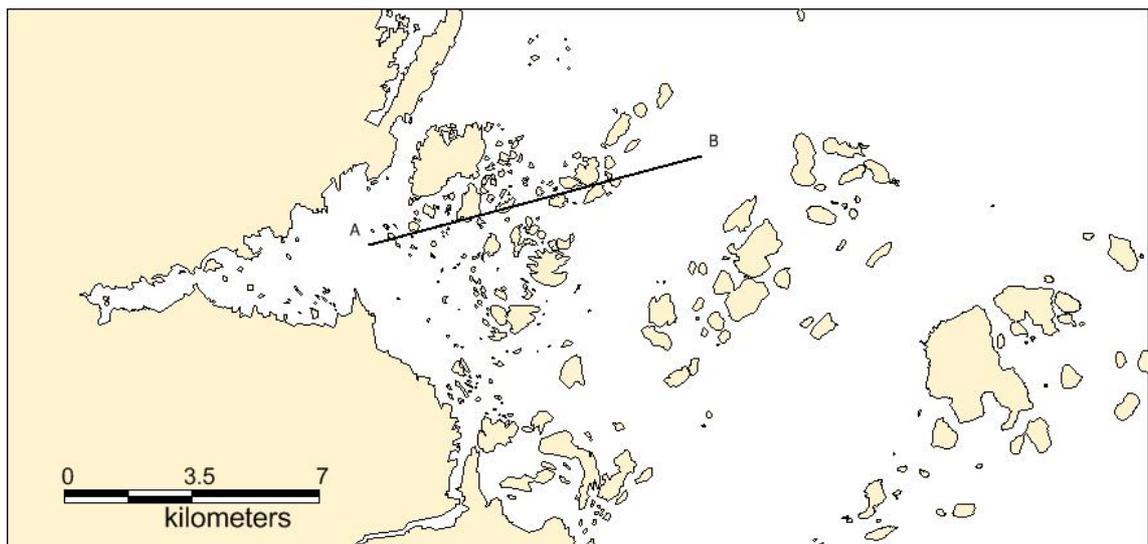
Особенностью задачи о распространении нефти по поверхности моря является тот очевидный факт, что препятствием для движения нефти являются искусственные и естественные преграды, главными из которых являются побережье и острова. Расчеты траекторий распространения разлива, когда о них можно говорить (см. раздел 3.4.1) должны учитывать 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 естественно сможет отойти от берега и продолжить свободное распространение до следующего препятствия. Рассмотрим, например, ситуацию, когда нефтяной разлив, случившийся в устьевой зоны реки Кемь, под действием ветра будет распространяться из точки **A** в точку **B**, как показано на рисунке 10а. 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 1:1000000, используемых в ЕСИМО для описания побережий РФ в целом. Для большинства задач отображения гидрометеорологических данных на картах подобной детализации достаточно. Однако задача о расчете распространения нефти имеет особенности. Как видно из рисунка, 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 1:500000, показанной Рисунке 10б. 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 **A** и **B**. 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 распространения нефти.



а) М 1:1 000 000



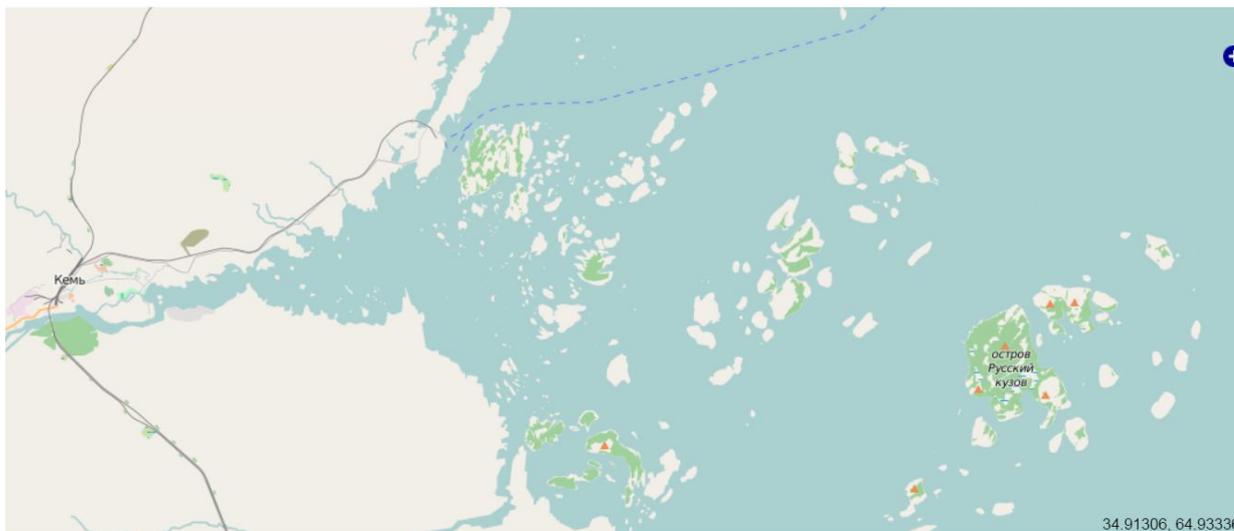
б) М 1:500 000



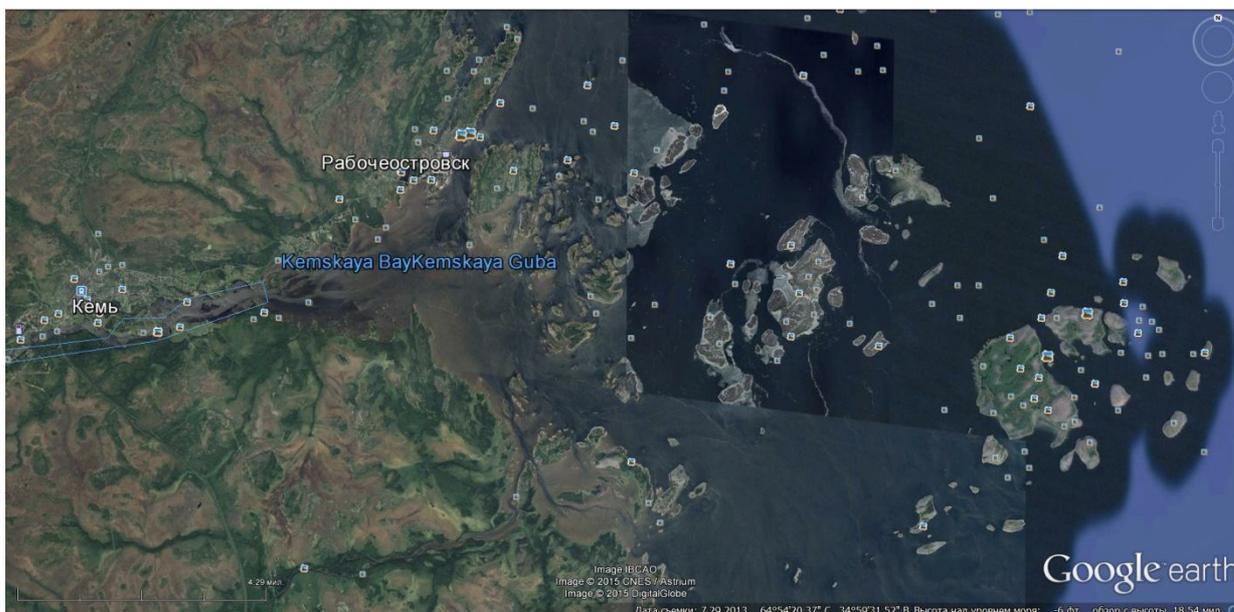
в) М 1:100 000

Рисунок 10 Сравнение детализации представления береговой линии на картах разных масштабов.

Как будет показано в разделе 3.3.2, в некоторых случаях результаты моделирования удобно отображать на картах, предоставляемых сервисом Google Earth или интернет ресурсом <http://map.openseamap.org>.



а)



б)

Рисунок 11 Детализация береговой линии участка акватории Кемской губы Белого моря на Интернет-ресурсе <http://map.openseamap.org> (а) и в Google Earth (б)

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, 1:500000), а для представления результатов карта с худшей детализацией (например, 1:1000000), 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 1:1000000 отобразить на карте масштаба 1:500000 или на картах с

ресурсов <http://map.openseamap.org> и Google Earth. Упомянутые курьезные ситуации 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 сложных 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 12 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 (рисунок 9). Гидродинамическая модель хорошо описывает подъем уровня моря под действием ветра и прилива, однако, как видно из рисунка 12, 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 12.

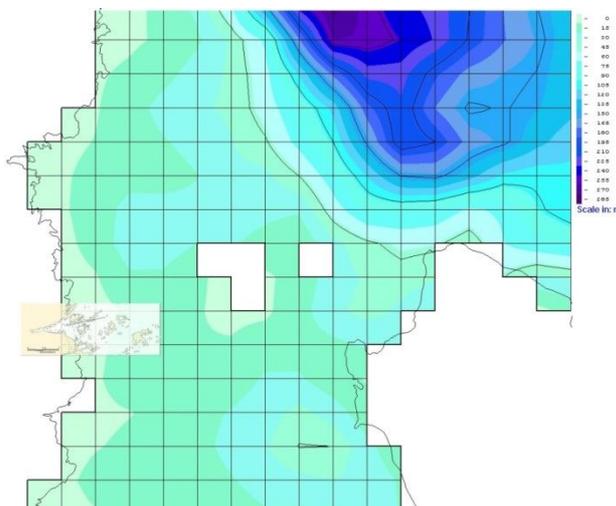


Рисунок 12 Фрагмент расчетной сетки течений в Белом море

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, как описано в разделе 3.5.

3 МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

3.1 МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ

На сегодняшний день прогнозирование эволюции и распространения разлива нефти в морской среде может быть осуществлено с помощью модельных комплексов, включающих, собственно, модели эволюции нефти в море, модели атмосферы для расчета параметров приземного слоя атмосферы над морем в районе интереса и модели океана для расчета гидрологических параметров.

Проведение расчетов по моделям атмосферы и океана, как правило, требует серьезных вычислительных ресурсов и осуществляется в крупных научных центрах Росгидромета (Северный ледовитый океан – ААНИИ, Баренцево море - Гидрометцентр России, ГОИН, Карское море - ААНИИ, ГОИН, Каспийское море - Гидрометцентр, Черное море – ГОИН, МГИ РАН, Балтийское море - Гидрометцентр, СПБО ГОИН, Охотское море - Гидрометцентр, ГОИН, ДВНИГМИ, Японское море - ГОИН. По этой причине, как правило, для расчета распространения разлива нефти после аварийного сброса результаты гидрометеорологических прогнозов доставляются по сети Интернет на рабочее место специалиста, составляющего прогноз.

На сегодняшний день, наиболее известные мировые модели распространения нефтяных разливов в море, к которым относятся OILMAP и GNOME (США), COZOIL и OSCAR(Норвегия), OSIS (Великобритания), SPILLMOD и OilMARS(Россия), PADM (Швеция) используют примерно одинаковые параметризации процессов физико-химической трансформации (weathering) (испарения, диспергирования) нефти в море. Основные расчетные соотношения приведены в разделе 6.4.

3.2 ПРИМЕР ТЕХНОЛОГИИ

При наличии какой-либо из моделей нефтяного разлива, развернутой на вычислительных средствах, которые можно использовать для составления прогноза распространения нефти в море, следует организовать технологическую линию (ТЛ) прогнозирования. Приведем пример создания подобной ТЛ для прогнозирования распространения аварийных разливов нефти в Баренцевом и Белом морях.

В состав ТЛ SPILLMOD входят 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.

Экспертная поддержка ТЛ SPILLMOD осуществляется на АРМ прогнозирования распространения аварийных разливов нефти в лаборатории моделирования состояния морской среды ГОИНа, где была разработана модель SPILLMOD и соответствующее программное обеспечение.

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 заказчику прогноза.

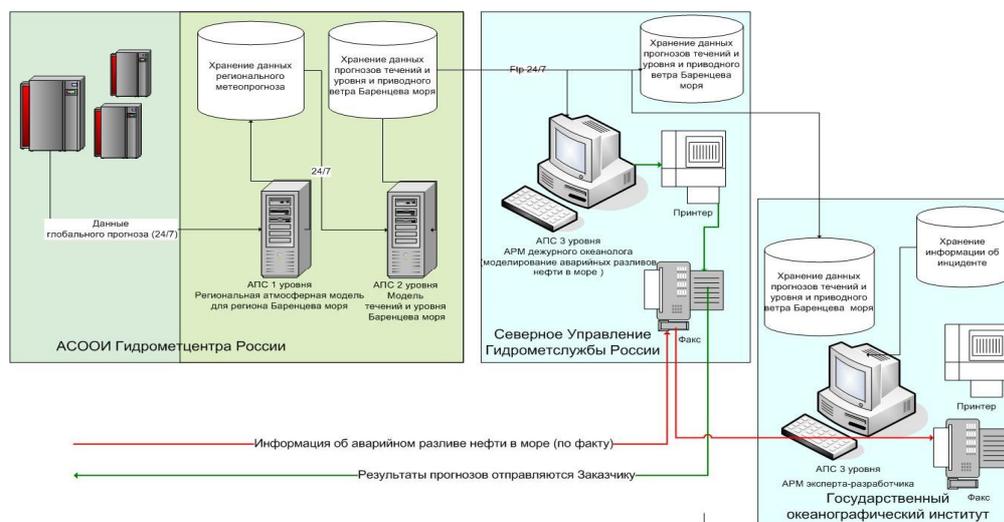


Рисунок 13 Схема технологической линии прогнозирования аварийных разливов нефти для Баренцева моря

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, тип нефти или нефтепродукта, интенсивность или объем сброса, и запустить программу для решения математической задачи в соответствии с расчетными соотношениями (1)-(32) или подобными.

После окончания расчетов необходимо подготовить справку о результатах прогноза распространения нефти, согласованную с Заказчиком прогноза, например, по форме, указанной в Приложении 1 к настоящему документу.

Технологические линии для прогнозирования распространения аварийных разливов нефти в море могут быть созданы только 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.

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/Интранет.

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. 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 для авторского контроля за работой модели. 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 2 к данному документу приведена, для примера, инструкцию по использованию модели “SPILLMOD”. Результаты расчетов по модели SPILLMOD использованы в «Типовой форме справки о прогнозе распространения аварийного разлива нефти и нефтепродуктов» (Приложение 1). 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 ВАРИАНТЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

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.

3.3.1 SeaTrackWeb (Швеция)

В предыдущем разделе был представлен образец технологии прогнозирования, когда гидрометеорологические прогнозы осуществляются в Москве, в Гидрометцентре России, информация об аварии приходит в Северное Управление Гидрометслужбы России, где оборудовано рабочее место для реализации модели прогноза распространения нефти и передачи прогнозов Заказчикам. Шведская технология прогнозирования устроена иначе. Пользователь вводит информацию о разливе на специально созданном Интернет сайте и задание на исполнение прогноза распространения нефти «отправляется» в Шведский Гидрометеорологический институт (SHMI), где задание обрабатывается и отсылается обратно Заказчику. Это коммерческая система прогноза распространения аварийных

разливов нефти. При этом атмосферный прогноз считается в Швеции, модель течений Балтийского моря в Германии, программное обеспечение для расчета распространения нефти на сервере SMHI, а запуск задания на счет реализуется с любого компьютера, подключенного к сети Интернет <https://stw-helcom.smhi.se>. Для работы с системой необходимо скачать и установить на компьютере java –приложение и зарегистрироваться.

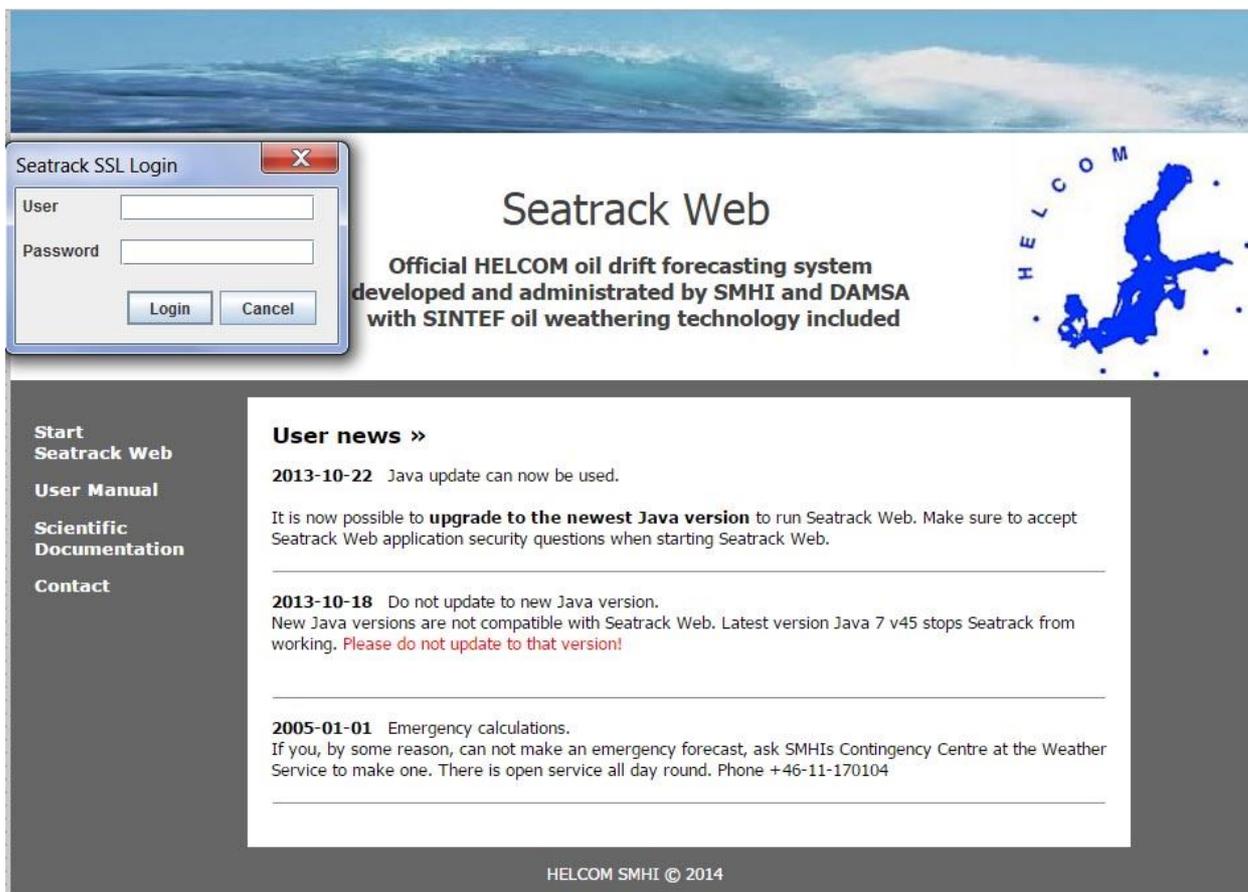


Рисунок 14 Стартовый интерфейс пользователя при работе с программой SeaTrackWeb

С инструкцией по работе с программой SeaTrackWeb можно ознакомиться по ссылке http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.15599!SeaTrack%20Web%20manual.pdf. Сервис доступен только расчета инцидентов, произошедших на акватории Балтийского моря.

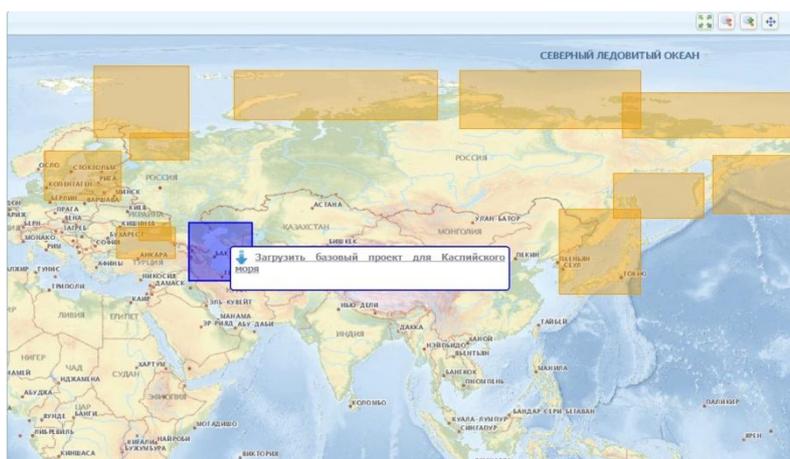
3.3.2 ГеоЕСИМО (Россия)

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

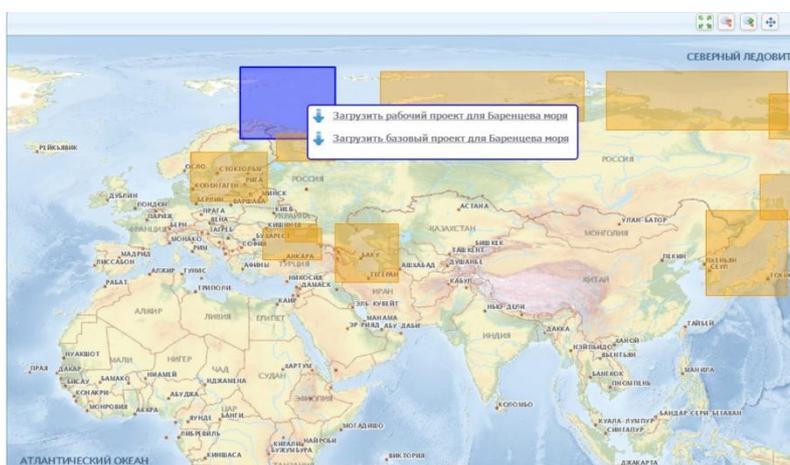
В ЕСИМО разработаны расчетно-модельные комплексы (РМК), применяемые для решения ряда прикладных задач (ПЗ), связанных с исследованием и мониторингом Мирового океана (Гитис и др., 2012). РМК реализованы как в виде серверных приложений, так и настольных решений. В качестве интерфейса пользователя разработана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

На портале ЕСИМО пользователь открывает сервис ГеоЕсимо по ссылке <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/services/geoesimo>. И далее выбирает один из

районов российского континентального шельфа или внутренние моря, для которых реализован проект ГеоЕСИМО. На рисунке ниже показано, как можно с помощью клавиши мыши загрузить проект для Каспийского (а) и Баренцева моря (б).



а)



б)

Рисунок 15 Стартовое окно сервиса ГеоЕСИМО

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.

Принципиальным отличием от шведского варианта распределенной системы прогнозирования является наличие ГИС интерфейса пользователя ГеоЕСИМО, разработанного в Институте проблем передачи информации имени А.А. Харкевича (ИППИ РАН).

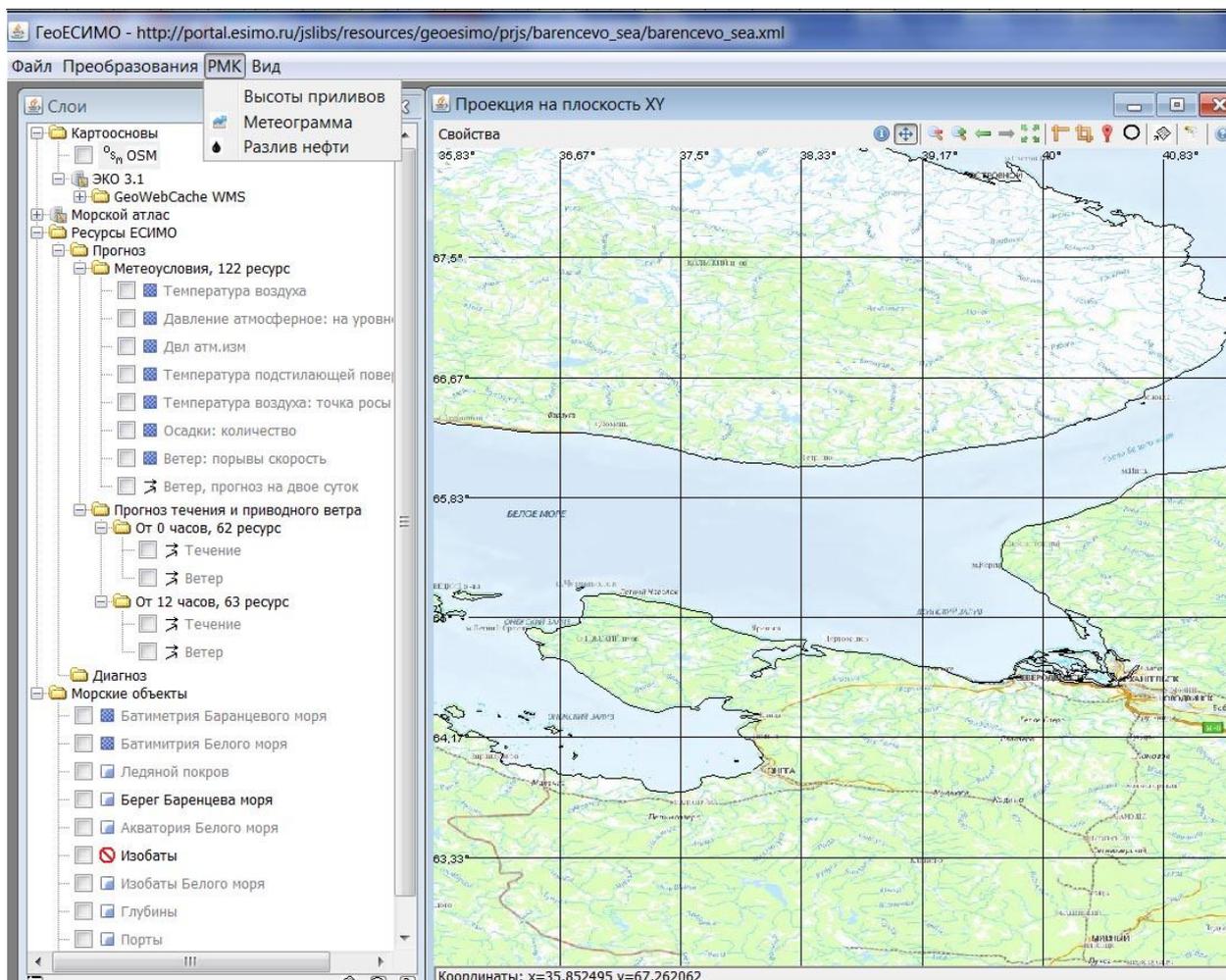


Рисунок 16 Стартовое окно для выбора РМК

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 ГеоЕСИМО с применением специальной формы ввода начальных данных, передаваемых РМК для его работы.

Рисунок 17 Задание параметров для расчета на РМК «Разлив нефти».

В Гео-ЕСИМО создается слой «Разлив нефти», который записывается в древовидный список 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 точкой разлива.

ГИС приложение Гео-ЕСИМО передает параметры задания в объект РМК-service, в котором формируется запрос к WEB-сервису. В дальнейшем, через этот сервис поддерживается связь Гео-ЕСИМО и сервером интеграции. После отправки задания РМК запускается счетчик для мониторинга времени выполнения задания. Гео-ЕСИМО контролирует заданное пользователем время работы с РМК и по его истечении (если РМК к этому моменту еще не закончил задание на все время прогноза) посылает РМК прерывание через WEB-сервис. ГеоЕСИМО позволяет пользователю также оперативно прервать сеанс работы с РМК.

WEB-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, 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 (virtual private network). WEB-сервис должен обеспечить доставку в Гео-ЕСИМО результат РМК по каждому шагу расчетов для последовательных моментов прогноза. WEB-сервис транслирует в сообщение-ответ в Гео-ЕСИМО: аварийное сообщение, сообщение о завершении расчетов WEB-сервис передает от ГеоЕСИМО к РМК прерывание для оперативного завершения его работы.

РМК выполняет расчеты согласно заданным в ГИС-приложении начальным параметрам, прогнозным метеорологическим данным и другим данным, требующимся для расчетов. Каждый шаг прогнозирования выполняется по данным, соответствующим текущему интервалу времени, определенному пользователем в задании для РМК.

Результаты каждого шага расчетов записываются в выходной текстовый файл, содержащий информацию об условных координатах центра нефтяного пятна, данных о количестве испарившейся нефти, диспергированной нефти, нефти на поверхности моря, а также шейп-файлы для отображения контуров толщины нефти внутри области загрязнения с расширениями *.shp, *.dbf, *.prj и *.shx. Имена файлов состоят из названия файла сообщения с расширением .mes и номера шага прогнозирования. Выходные файлы размещаются на сервере ГОИНа. Признаком окончания шага служит формирование txt-файла. Веб-сервис должен проверить этот факт и после этого отправить результаты в соответствующий региональному идентификатору проект Гео-ЕСИМО.

На Рисунках 18 и 19 показаны возможности визуализации в Гео-ЕСИМО результатов расчетов с помощью расчетно-модельных комплексов, расположенных на серверах ГОИНа. Название слоя разлива нефти (полигоны) и начальной точки расчетов выводятся в окно слоев. Возможно формирование нескольких заданий, для каждого из которых можно определить свои названия слоя разлива и начальной точки.

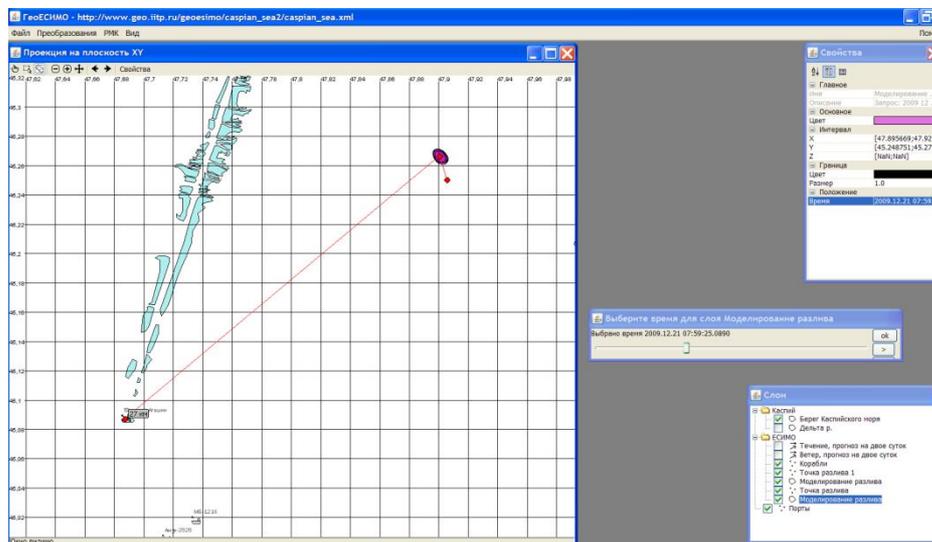


Рисунок 18. Анализ данных моделирования разлива нефти в Каспийском море.

На увеличенном фрагменте карты показаны точка разлива, прогноз положения пятна на 07:59 21.12.2009 и расстояние до ближайшего судна. Выходная продукция прогнозирования может быть экспортирована в формате KML из ГИС ГеоЕСИМО в популярный картографический сервис Google Планета Земля (Google Earth), как показано на следующем рисунке. Точка разлива показана символом +.

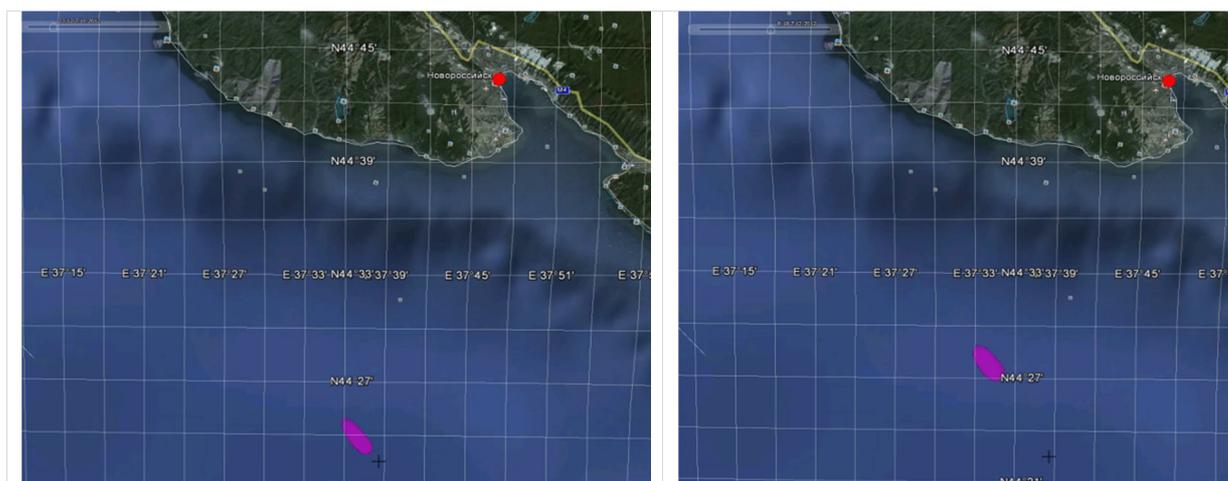


Рисунок 19. Визуализация временных срезов моделирования нефтяного пятна в Google Earth

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

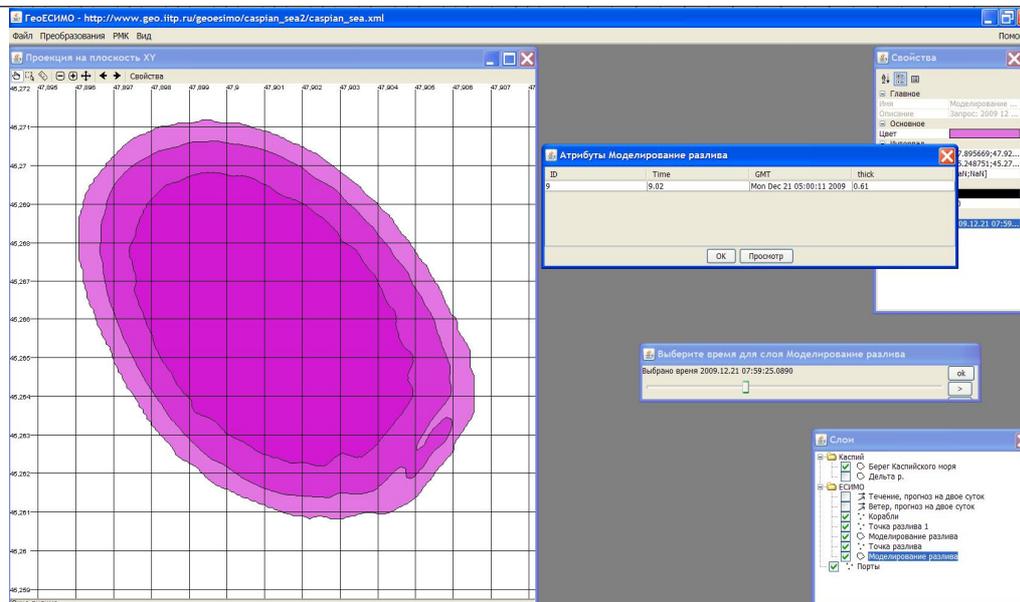


Рисунок 20. Пример вывод информации о разливе в ГеоЕСИМО

Разлив нефти может отображаться для моментов времени, кратных шагу времени прогноза, и в виде анимации последовательных моментов прогноза. Режим визуализации управляется из окна «Выберите время для слоя моделирования разлива», которое открывается из поля «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 дописать в документ необходимый комментарий.

Пример вывода атрибутивной информации в табличной форме показан на Рисунке ниже.

Платформ...	Судно: курс	Судно: ско...	Дата и вре...	X	Y	T
Павел Щепелев...	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 ...
Анетистовый	140.0	0.0	Tue Aug 05 ...	129.004167	35.079833	2008-08-05 ...
Муринский	159.0	0.0	Wed Aug 06 ...	33.0515	68.966667	2008-08-06 ...
ОТ-2016	56.0	0.0	Sun Aug 10 ...	40.728667	64.479333	2008-08-10 ...
Беломорски...	299.0	6.0	Tue Aug 12 ...	28.689333	60.220833	2008-08-12 ...
Беломорски...	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 ...
Ясногорский	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 ...

Рисунок 21. Пример вывода текстовой информации в Гео ЕСИМО

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 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, что реализуется в результате использования моделей боновых систем и судов нефтесборщиков, например, в программе SPILLMOD.

В настоящее время не для всех акваторий российских морей доступны в оперативном режиме данные гидрометеорологических прогнозов. В результате вышеприведенный вариант экспресс-анализа распространения нефти на сегодняшний день реализован только для Каспийского, Баренцева моря и части акватории Черного моря, примыкающей к Кавказскому побережью.

3.4 ВЫХОДНАЯ ПРОДУКЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выходная продукция при прогнозировании распространения аварийных разливов нефти может быть различной. Состав и форму представления результатов расчетов следует обсуждать заранее, на этапе подготовки регламента информационного взаимодействия при ЧС, связанных с разливами нефти и нефтепродуктов.

3.4.1 Траекторные модели

Как следует из описания процессов, контролирующей судьбу нефти в море (см. Приложение), ряд характеристик нефтяного разлива поддаются оценке с помощью

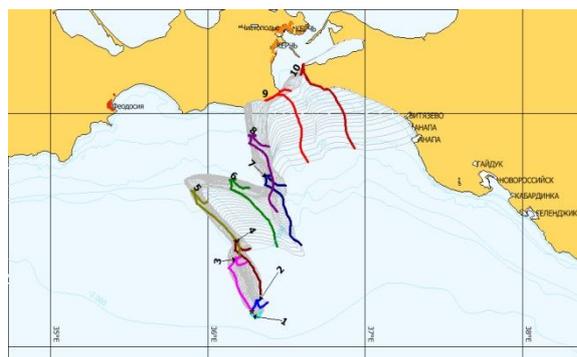
относительно простых расчетных соотношений (П.1)-(П.32). К таким характеристикам относятся:

- Координаты центра разлива или отдельных его частей;
- Площадь нефтяного пятна
- Количество нефти, испарившейся в атмосферу;
- Количество нефти, проникшей в верхний слой моря в виде капель;
- Изменения плотности и вязкости нефти
- Образование эмульсии

При использовании траекторной модели распространения нефти, используя соотношения (П.1) и (П.2) можно получить результат, показанный на Рисунке 22(а), где коричневой линией отмечена траектория распространения залпового сброса нефти, а на Рисунке 22(б) показаны последовательные конфигурации нефтяного разлива, рассчитанные путем моделирования перемещения отдельных «порций» продолжительного (в течение 3-х суток) сброса нефти. На Рисунке 22(б) тонкими серыми линиями показаны 72 траектории распространения элементарных разливов, а толстыми линиями разных цветов – упрощенные конфигурации 72-х часового разлива на конец каждых суток 10-ти суточного периода, цифры на рисунке соответствуют времени в сутках, которое прошло от начала разлива.



(а)



(б)

Рисунок 22. Одна траектория (а) и последовательные конфигурации (б) разлива нефти

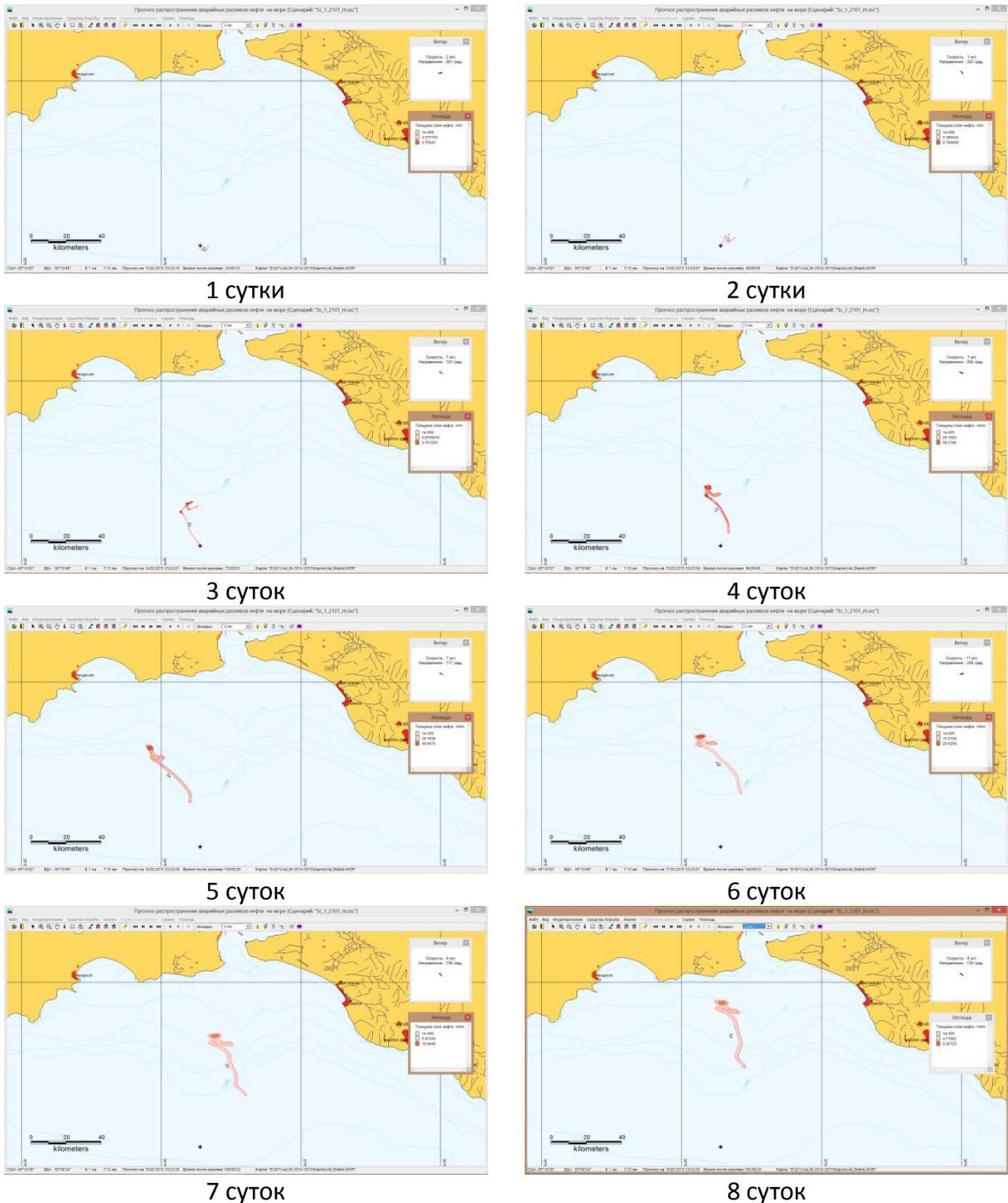
При использовании более сложных в вычислительном отношении моделей появляется возможность интерпретировать дополнительные параметры области нефтяного загрязнения, как то, например, площадь нефтяного пятна и распределение толщины слоя нефти внутри.

3.4.2 Модель SPILLMOD

Модель нефтяного разлива в море SPILLMOD рассчитывает конфигурацию нефтяного разлива на основе уравнений гидродинамики с учетом движущихся и неподвижных контактных границ произвольной формы. По этой причине, модель SPILLMOD имеет преимущества при оценке конфигурации и площади нефтяного разлива, исключая штормовые гидрометеорологические условия. В остальном для всех перечисленных моделей успех в прогнозировании распространения нефти будет

определяться качеством данных об источнике разлива, включая точные координаты, дату и время аварии, тип нефти или нефтепродукта, режим истечения, и качеством гидрометеорологического прогноза приводного ветра, поверхностных течений, параметров волнения.

На Рисунке 23 показан расчет по модели SPILLMOD последовательных конфигураций разлива при распространении гипотетического разлива нефти в результате аварийного сброса, продолжавшегося в течение 72 часов, по сценарию технической аварии, результаты расчета которой по траекторной модели, представлены на Рисунке 22(б).



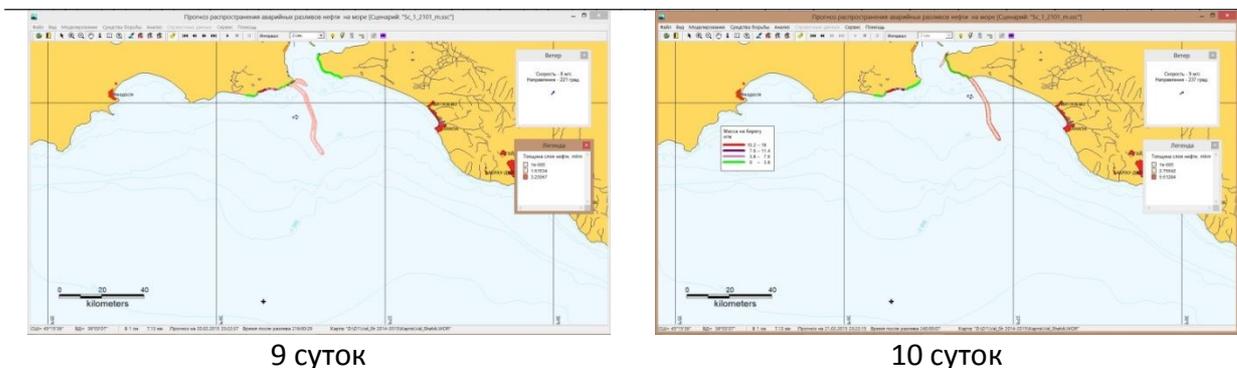


Рисунок 23. Пример моделирования распространения разлива нефти с помощью модели SPILLMOD

Как видно из сравнения рисунков 22 и 23 модель SPILLMOD представляет больше информации для анализа аварийной ситуации и принятия управленческих решений, однако, зачастую, скорость оценки риска воздействия разлива на уязвимые объекты в регионе ЧС может оказаться приоритетней, чем тщательный анализ. Оптимальным представляется двухэтапное решение, когда на первом этапе предоставляется информация от траекторных моделей распространения нефти, а при необходимости более полной информации о развитии аварии в морской среде на втором этапе могут применяться более полные модели. В разделе 6.4 Приложении приведена постановка задачи и некоторые сведения о вычислительной технологии для модели SPILLMOD.

Информация о выветривании нефти может предоставляться и в виде таблиц и в виде графиков. Данные о выветривании являются выходной продукцией всех без исключения моделей нефтяных разливов, однако в случае использования траекторных моделей следует признать, что расчеты выветривания могут быть менее точными, так как зависят от оценки площади нефтяного пятна, которая в траекторных моделях считается при целом ряде упрощающих предположений.

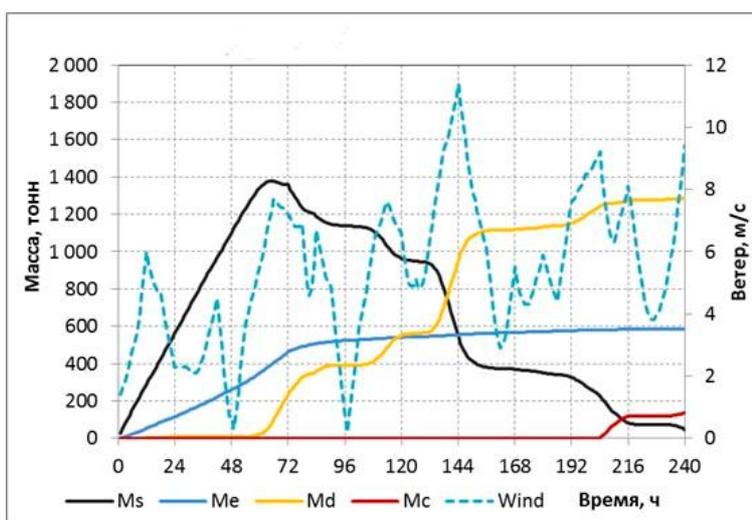


Рисунок 24. Пример расчета основных параметров разлива нефти в модели SPILLMOD

3.5 ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Приведем пример расчета распространения нефтяного пятна, когда есть возможность сделать оценку погрешности результатов метеорологического прогноза. На Рисунке 25 приведен фрагмент ряда наблюдаемых и рассчитанных значений U – компоненты (зональной) скорости ветра. В некоторые, достаточно длительные промежутки времени, наблюдаемые значения скорости ветра превышают расчетные, но бывает и наоборот.



Рисунок 25. Наблюденная на станции и рассчитанная по модели скорость ветра

Статистический анализ временных рядов отклонений скорости ветра от наблюдаемых значений показал, что распределение ошибки расчета скорости с увеличением длины ряда стремится к приближенно нормальному распределению, где отсутствуют большие значения расхождений между наблюдениями и расчетом. Однако и функция распределения ошибок, и нулевое среднее и дисперсия не в полной мере характеризуют анализируемую случайную величину. Важным параметром для оценки погрешности в прогнозах перемещения нефти является радиус временной корреляции наблюдаемого и рассчитанного рядов скорости ветра, на основании которого может быть построена оценка для расчета размеров области возможного обнаружения нефти. Предполагая, что наблюдаемые и рассчитанные с помощью моделей поля скорости ветра не имеют систематических ошибок, то расчет перемещения по соотношению (П.2) может рассматриваться как определение наиболее вероятного положения нефтяного пятна после сброса. В тоже время, расхождения в наблюдаемых и рассчитываемых скоростях ветра обуславливают необходимость оценки области возможного обнаружения нефти. Одним из простых способов оценивания радиуса рассеяния «реального наблюдаемого» от рассчитанного положения нефтяного пятна может быть прием, связанный с введением искусственного рассеяния для центра разлива, описываемого коэффициентом «диффузии» в соответствии с соотношениями:

$$K_L = \begin{cases} 2(\alpha \cdot \sigma_u)^2 T_u & t \gg T_u \\ 2(\alpha \cdot \sigma_u)^2 t & t < T_u \end{cases} \quad (3.5.1)$$

Описание неопределенности в местоположении пятна нефти на поверхности моря простым радиусом рассеяния недостаточно. Для продолжительных разливов нефти область вероятного обнаружения нефти может иметь довольно сложную геометрию. Погрешность в

данных метеорологического прогноза приведет к существенно большим областям рассеяния вблизи берега за счет трансформации течениями и взаимодействия нефтяного пятна с берегом. По этой причине для каждой «порции» нефти, попавшей на морскую поверхность в результате аварии следует, наряду с традиционным моделированием физико-химической трансформации, рассчитывать рассеяние ансамбля ассоциированных частиц в искусственном диффузионном процессе с коэффициентом диффузии, определенном соотношением (3.5.1). Огибающая для местоположений этих частиц определит область вероятного обнаружения нефти как показано на рисунке ниже.

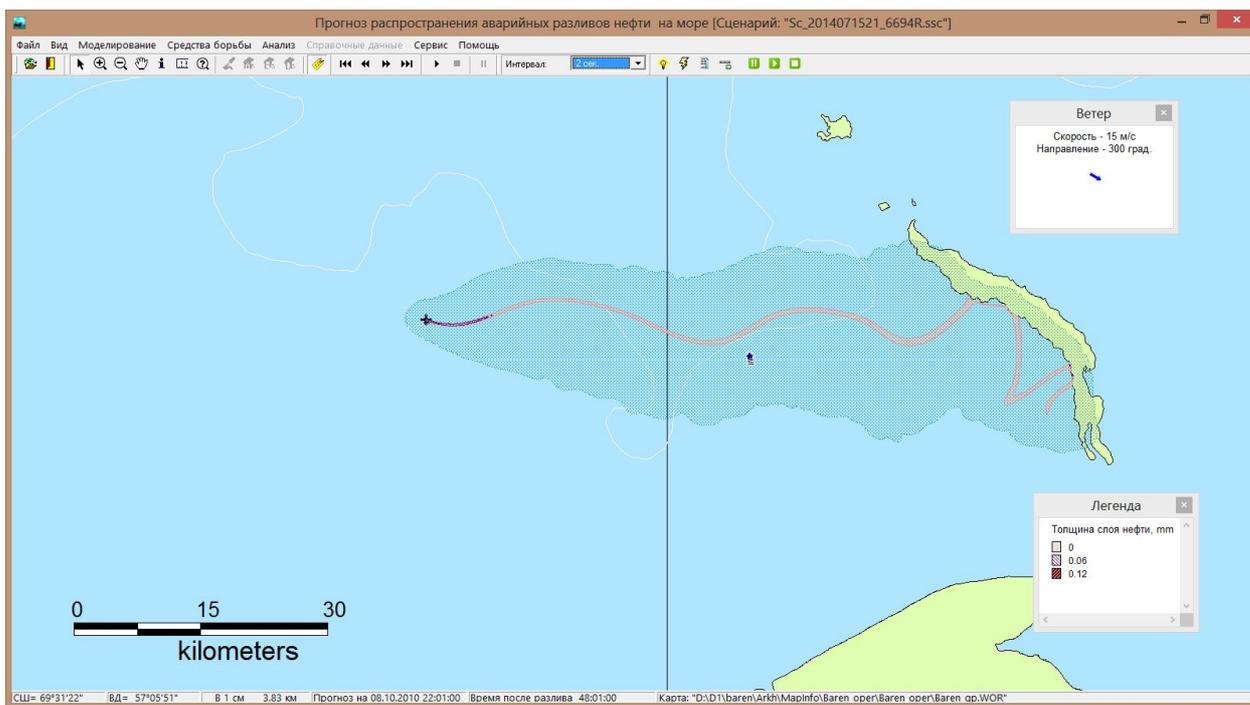


Рисунок 26. Расчет распространения разлива нефти на двое суток с учётом ошибок прогноза ветра.

На Рисунке 26 приведена конфигурация разлива нефти, соответствующая сценарию сброса на поверхность моря 10000 тонн нефти общей продолжительностью 5 суток с выбросом 20 % массы разлива за первые 12 часов (авария танкера). В приведенном примере разлив нефти еще не «оторвался» от источника и в данном случае мы говорим о конфигурации разлива на момент времени 48 часов после начала сброса, но не о траектории его распространения. Наиболее вероятная конфигурация разлива нефти, соответствующая ветровому сценарию по модели Гидрометцентра РФ, показана темным контуром, а зона возможного обнаружения нефти, рассчитанная с учетом погрешности метеорологического прогноза, отображена на Рисунке 26 светло-синим контуром со штриховкой. Вектор в геометрическом центре зоны нефтяного загрязнения показывает скорость суммарного течения (приливного и дрейфового), а в дополнительном окошке на Рисунке, представляющем копию экрана в системе прогнозирования SPILLMOD, скорость и направление ветра. Заметим, что область возможного обнаружения нефтяного пятна

формируется не мгновенным ветром, но его историей от начала аварии и до момента времени, на который дается прогноз.

Представленный выше пример показывает, что существуют объективные причины для дополнения традиционного подхода к составлению прогноза распространения нефти расчетом новой характеристики – области возможного обнаружения разлива нефти. «Старый» одно траекторный подход следует рассматривать как наиболее вероятную реализацию прогноза, однако необходимо предоставить потенциальному заказчику прогноза и сведения о возможных ошибках в прогнозировании, обусловленных неточностью в расчете скорости ветра и течений. Заметим, что такие характеристики, как площадь пятна нефти или оценка выветривания нефти на поверхности моря представляются менее зависимыми от ошибок метеопрогноза, чем определение местоположения разлива.

3.6 ОЦЕНКА ВЫНОСА НЕФТИ НА БЕРЕГ

В простом случае одномоментного/залпового сброса нефти неблагоприятным событием можно считать пересечение траектории движения нефтяного пятна с линией, аппроксимирующей береговой 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 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.

3.7 МОДЕЛЬ ADIOS2

Определенную помощь при прогнозировании судьбы нефти в море может оказать свободно распространяемая модель NOAA - ADIOS (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. 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 возможно провести расчет траектории распространения нефтяного разлива в соответствии с соотношениями (П.1-П.2) и дополнить результаты прогноза перемещения нефтяного разлива сведениями о его возможной физико-химической трансформации, рассчитываемыми в ПО ADIOS2. В программу следует ввести информацию об источнике сброса нефти. Пример интерфейса для задания исходных данных приведен на Рисунке 27.

Программа ориентирована на использовании информации об условиях окружающей среды, которую можно получить с места событий. Это может быть скорость ветра, высота волн, температура воды 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, изменение которых в программе моделируется с помощью расчетных соотношений типа (3) - (32). К оцениваемым свойствам нефти относятся плотность, вязкость, содержание воды в нефти или нефтепродуктов; скорость испарения и проникновения в воду в виде капель. База данных была 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 биodeградации и фотоокисления можно не принимать во внимание.

Программа ADIOS2 не русифицирована и мы советуем ее применять опытным пользователям с обязательным указанием всех заданных параметров разлива и окружающей среды и ссылкой на использование программы. На Рисунке 28 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.

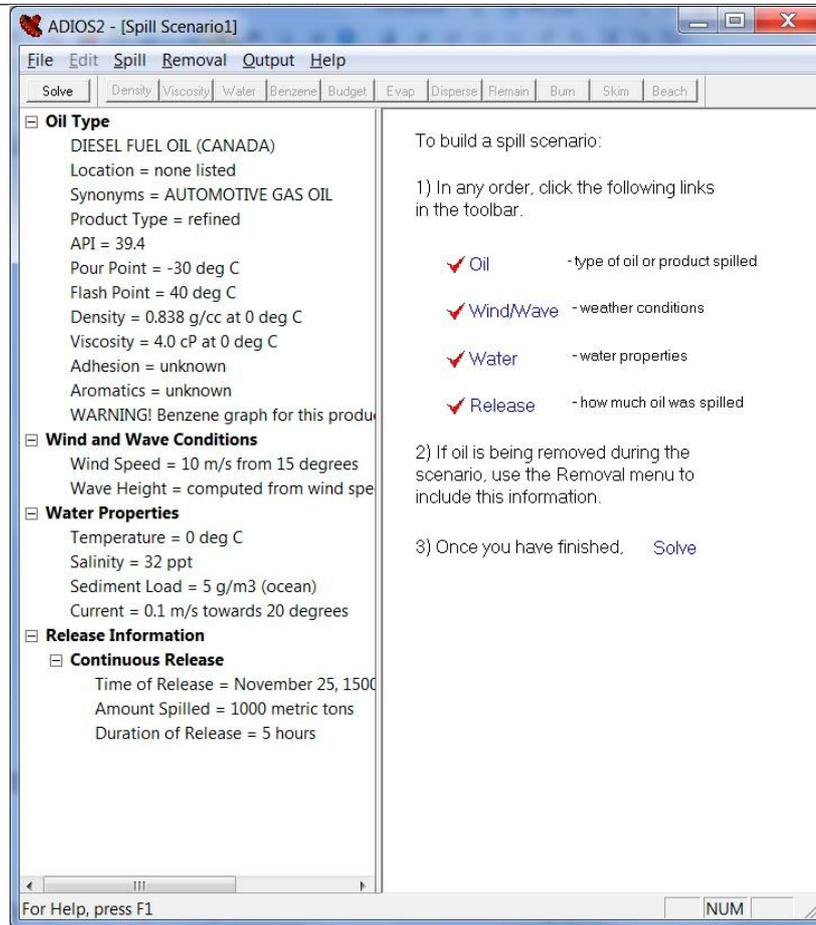


Рисунок 27. Интерфейс для задания информации о разливе нефти в ADIOS2

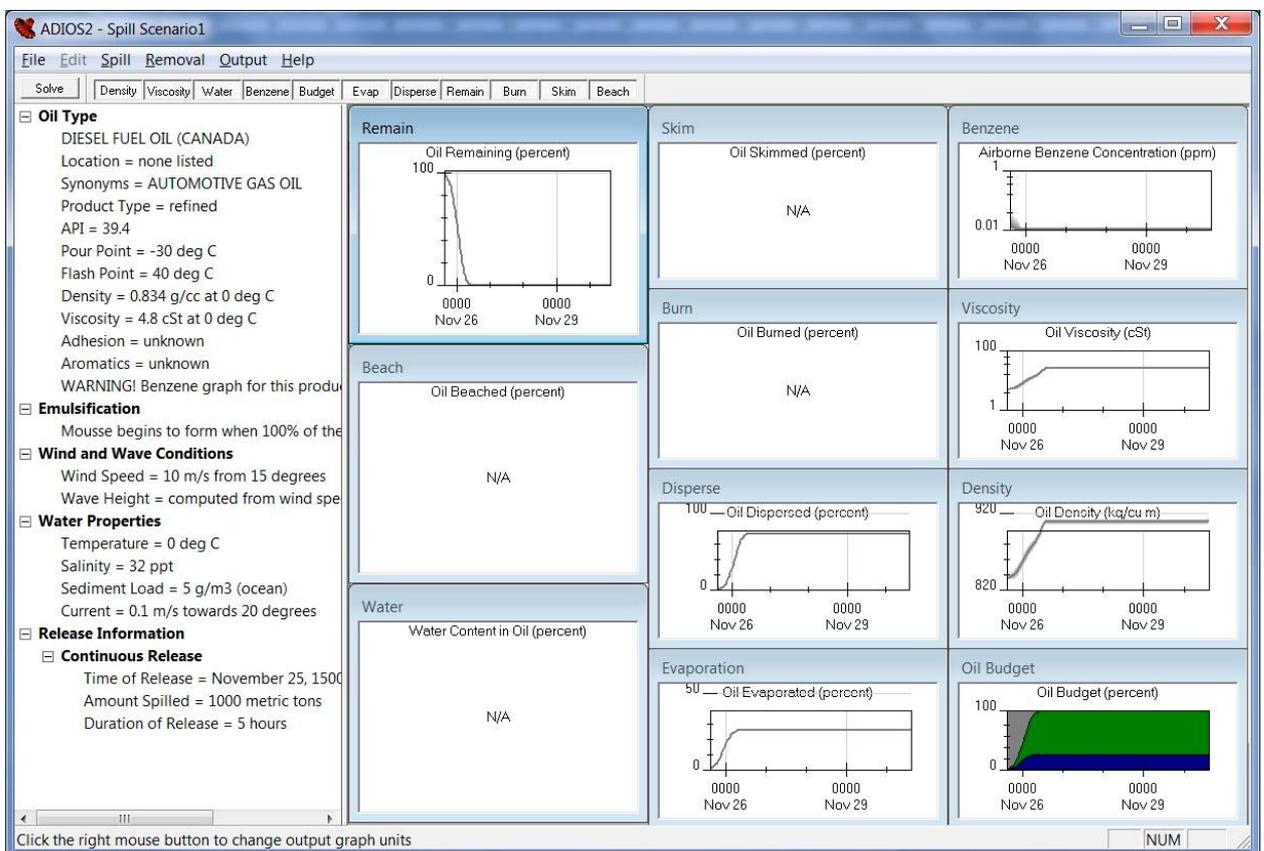


Рисунок 28. Пример представления результатов расчетов в программе ADIOS2

4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИНФОРМАЦИОННОМУ ОБМЕНУ ПРИ ЧС

Принятие управленческих решений при возникновении или угрозе чрезвычайных ситуаций, связанных со сбросом нефти или нефтепродуктов в морскую среду, основывается на оперативной информации, в том числе, о направлении распространения нефтяного разлива и возможности поражения уязвимых объектов на акватории и побережьях.

Прогноз распространения нефти в море не может быть реализован без информации об инциденте, включающем сведения об источнике аварии, координатах и времени сброса. Как уже было отмечено в разделе 3 Рекомендаций, для обеспечения прогноза распространения нефти необходимы результаты расчетов приводного ветра, и гидрологических параметров – скоростей течений, уровня и температуры поверхности моря в районе аварии. С этой целью необходимо разработать и ввести в действие Регламент информационного обмена при чрезвычайных ситуациях, связанных со сбросом нефти или нефтепродуктов в морскую среду.

В Регламенте следует определить состав, форму и способы передачи сведений и разливе на рабочее место прогнозиста и, после проведения расчетов, доведения результатов прогнозирования до Заказчика прогноза. Обмен информацией о разливе осуществляется между специалистами подразделений Гидрометслужбы РФ 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 предоставление прогноза распространения нефти в аварийной ситуации.

Для обеспечения взаимодействия при осуществлении информационного обмена между МЧС или МСКЦ и подразделениями Гидрометслужбы РФ 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 Гидрометслужбы 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 2. 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 информацию 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.

5 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. Системный 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 ПРИЛОЖЕНИЯ

6.1 ТИПОВАЯ ФОРМА СПРАВКИ О ПРОГНОЗЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВАРИЙНОГО РАЗЛИВА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Исходные данные об аварии²:

Время и дата поступления информации - 11 марта 2012 года 18 часов 15 минут

Источник информации - справка НЦУКС МЧС РФ № от "___" _____ 2012 года

Информация о ЧС:

Дата и время аварии - 15 февраля 2012 года, 18.15 местного времени

Координаты аварии - ___° ___' ___" В.Д., ___° ___' ___" С.Ш.

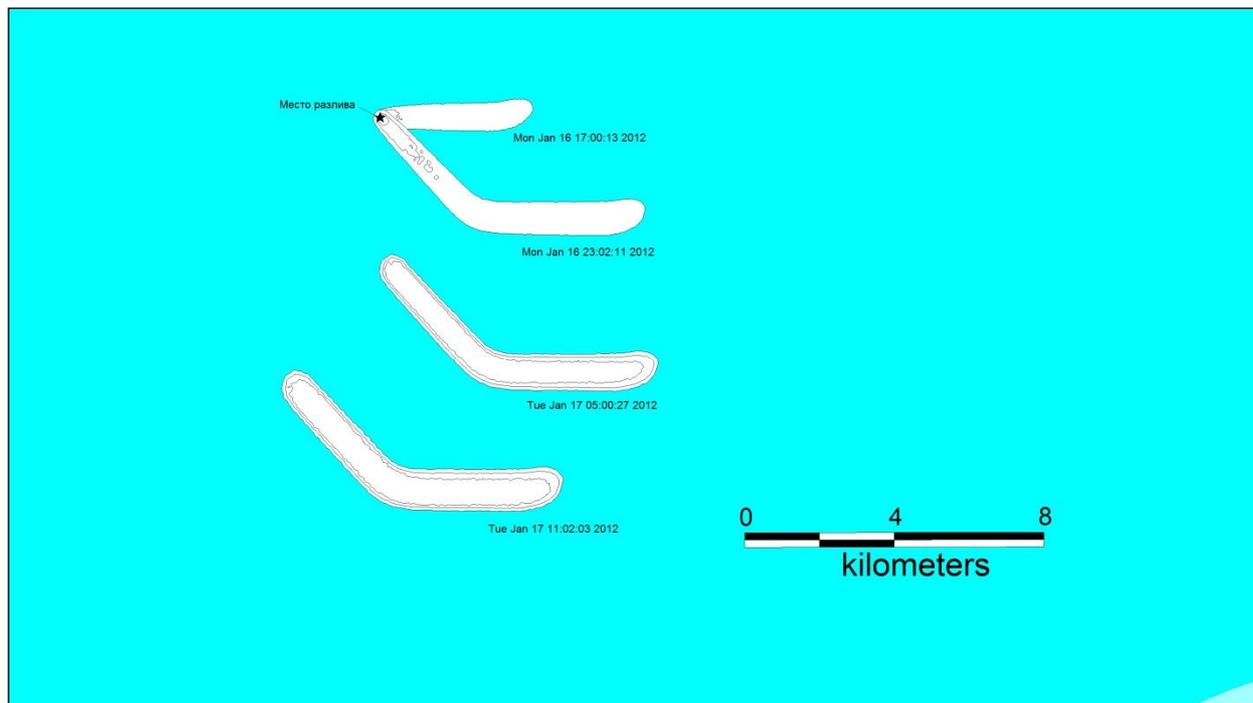
Объем нефти или нефтепродукта, сброшенной в море - 1000 тонн

Интенсивность и продолжительность утечки - 12 часов

Тип нефтепродукта - мазут

Картографическая расчетная информация

Пример последовательных положений и конфигурации поля нефтяного загрязнения



Расчетная информация в текстовом виде, содержащая:

1 - время от начала разлива нефти

2 - долгота, град³

3 - широта, град

² Заполняется на основании данных, поступивших от НЦУКС МЧС РФ

³ Долгота и широта в Таблице относятся к центру нефтяного загрязнения.

- 4 - масса пролившейся на поверхность моря нефти, т
 5 - масса нефти, оставшаяся на поверхности моря после процессов выветривания, т
 6 - масса испарившейся нефти, т
 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	998.8	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	2990.1	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.

Расчеты проводил

должность, организация

Ф.И.О.

Дата/время

6.2 СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ SPILLMOD

6.2.1 Функциональные возможности

SPILLMOD⁴ – программный комплекс, разработанный для реализации на персональном компьютере 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 меняющимися 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.

Программа обладает следующей функциональностью:

1. Ввод данных об аварии в интерактивном режиме, включая задание даты, времени, координат места аварии, выбор типа нефти или нефтепродукта, режима сброса нефти.
2. Проведение расчетов возможно при задании гидрометеорологических данных в интерактивном режиме, включая:
 - 1) задание поля течений в виде гидрологической сцены из совокупности векторов течений;
 - 2) использование данных гидрометеорологического прогноза, представляющего последовательность полей течений и приводного ветра, заданных на сетке.

Результаты расчета представляются на карте района аварии в виде последовательных конфигураций нефтяного пятна с вложенными изолиниями толщины слика, а также в графическом и текстовом виде для оценки изменения основных физико-химических

⁴ 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., Зацева С.Н.

характеристик, включая количество нефти на поверхности моря, количество нефти, попавшей в водную толщу за счет диспергирования, и для оценки использования средств противодействия разливу нефти.

Программный комплекс SPILLMOD позволяет проводить расчеты распространения нефти в море после аварийного разлива, сохранять результаты в виде jpeg 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.

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

6.2.2 Инструкция по работе с ПО SPILLMOD (для Каспийского моря)

ПРОЕКТ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ
СРЕДЫ

(РОСГИДРОМЕТ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. Н.Н.ЗУБОВА»

(ФГБУ «ГОИН»)



Программа моделирования аварийных разливов нефти на море «SPILLMOD»

Руководство пользователя

(версия 2.1.1 - Каспийское море)



Москва 2011

6.2.3 Описание структуры и основных функции 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 протяжённых источников;
- испарение легких фракций и изменение плотности нефти;
- изменение вязкости и плотности нефти за счёт 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 со свободными границами для сжимаемой среды. 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

твёрдой (контактной) границы с заданными характеристиками, необходимыми для расчёта 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-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 расчётов.

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 (Приложение 1. Компоненты программы)
- картографической нагрузке (Приложение 3. Картографическая основа)
- параметрах настройки модели. Они используются для привязки модели нефтяного разлива к условиям данного региона (Приложение 1. Компоненты программы).

Средства визуализации и документирования необходимы для обработки полученной информации с целью дальнейшего анализа и хранения. В данной версии АРМ позволяет запоминать и в дальнейшем воспроизводить в ускоренном режиме сценарии расчётов распространения нефти, отображать изменение основных характеристик нефтяного пятна (баланс массы нефти, плотность, вязкость) в виде графиков. Записанные сценарии могут в дальнейшем быть использованы для отображения и документирования в любой момент развития ситуации с целью сравнения с результатами наблюдений, анализа эффективности кампании по борьбе с разливом, обучения персонала.

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.

6.2.4 Подготовка к запуску

Работа программного комплекса возможна при условии, что на компьютер предустановлены операционная система «Windows XP/Vista/7» и геоинформационная система «MAPINFO» версии 5.0 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.

6.2.5 Первый запуск

6.2.5.1 Первый запуск системы может сопровождаться сообщением

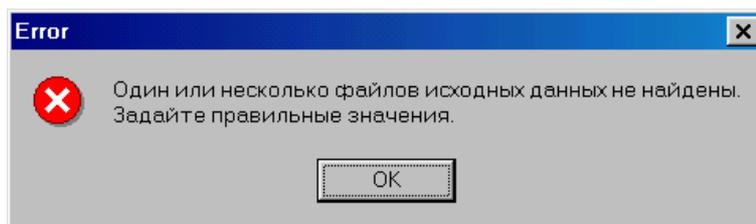


Рис. 1

После нажатия «ОК», на экране появится первое настроечное меню «Параметры». Проверьте наличие указанных файлов⁵ в соответствующих каталогах или задайте новые пути доступа.

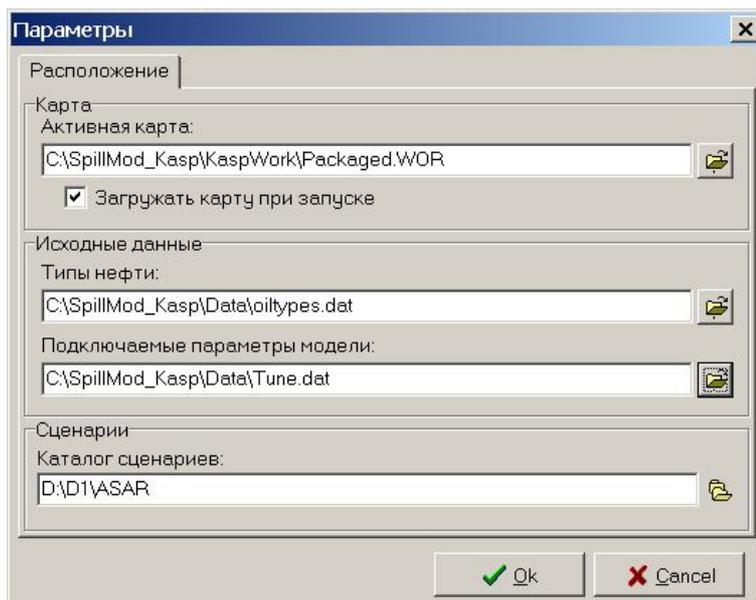


Рис. 2

6.2.6 Начало работы.

6.2.6.1 Главное меню

Файл

- Открыть карту
- Выход (Alt+X)

Вид

- Выбор

⁵ Packaged.wor, oiltypes.dat, tune.dat (см. Приложение)

- 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

6.2.6.2 Панель инструментов работы с картой

До старта модели Панель инструментов выглядит так:

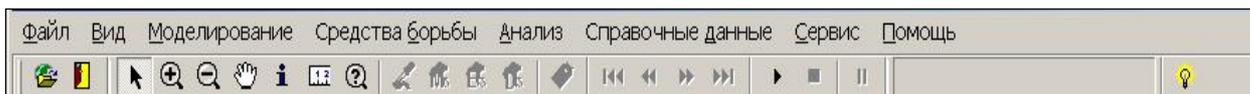


Рис. 3

Во время расчета

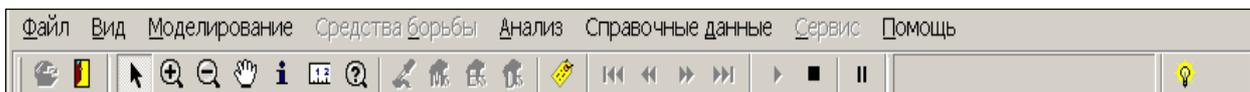


Рис. 4

Во время «Паузы»

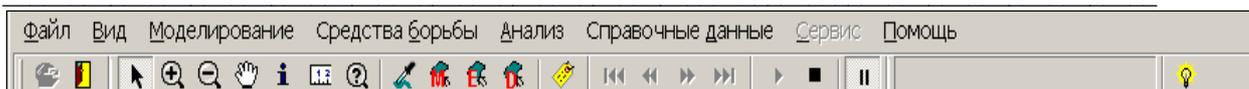


Рис. 5

6.2.6.3 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](#) (раздел 7 Руководства). Опция «Загрузить сценарий» необходима для воспроизведения на экране рассчитанного ранее сценария, или для использования уже сформированного сценария исходных данных, например, для повторного расчёта с изменёнными 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) Marinfo для использования в программе SPILLMOD должен содержать *только одно окно* карты и слой береговой линии в виде набора замкнутых областей (regions).

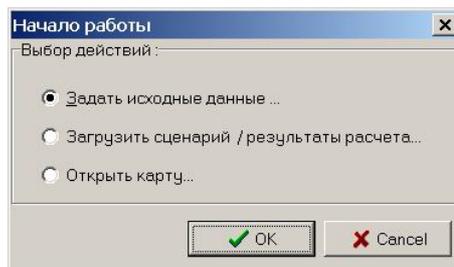


Рис. 6

6.2.7 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**.

6.2.7.1 Модель

На данном этапе Пользователь задает значения продолжительности расчетов в часах и период визуализации. Период визуализации (задаётся в минутах, 60 минут по умолчанию) не следует задавать слишком маленьким, т.к. на 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.

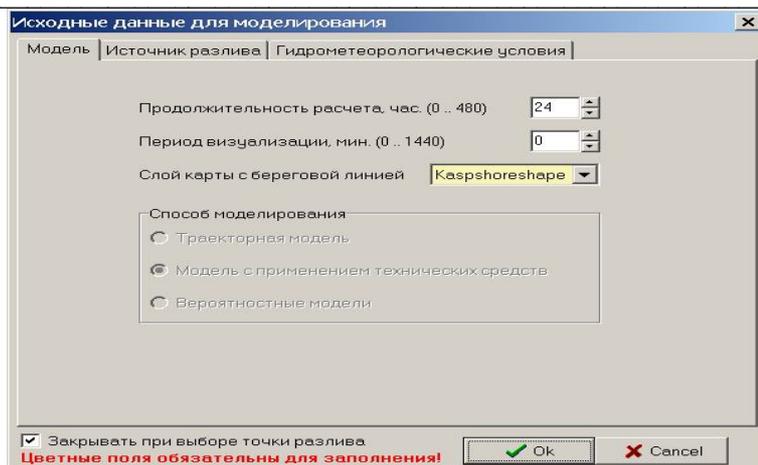


Рис. 7

Опция «Слой карты с береговой линией» очень важна для правильной работы модели. При работе с набором картографической информации для Каспийского региона здесь необходимо указать «Kaspshoreshape».

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».

6.2.7.2 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

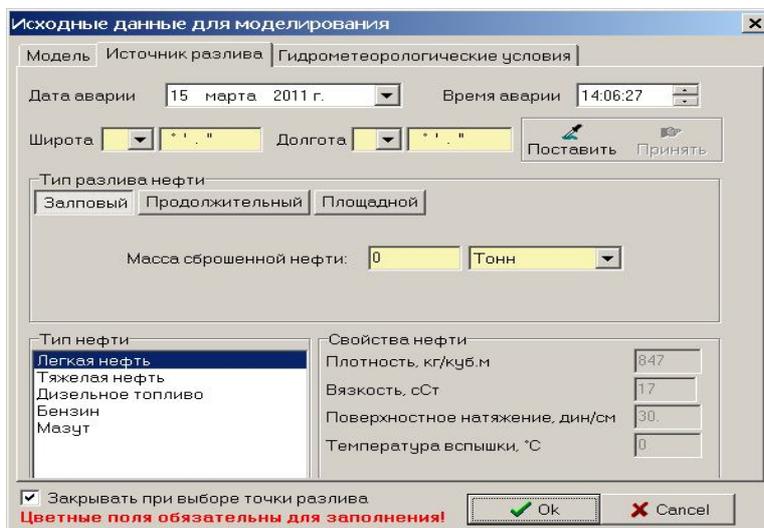


Рис. 8

Дата и время аварии задаётся по UTC (ранее GMT). 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 (тонны). При *продолжительном* сбросе появляются два поля «Продолжительность, час» и «Интенсивность, т/час» сброса нефти, при заполнении которых необходимо использовать 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 аэро-космической информации пользователь должен заранее подготовить данные о конфигурации нефтяного загрязнения используя ГИС MapInfo, 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 MapInfo, 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 задаётся выбором соответствующего файла *.TAB, подготовленного как указано выше.

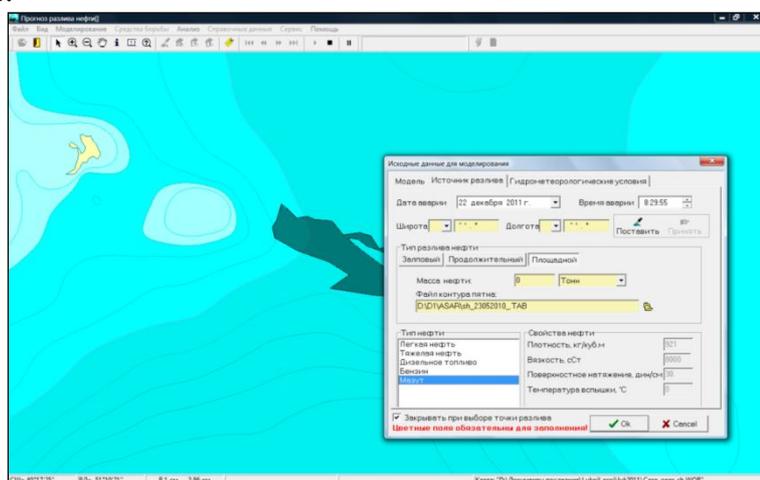


Рис. 9

6.2.7.3 Данные гидрометеорологического прогноза

В штатном режиме использования 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».

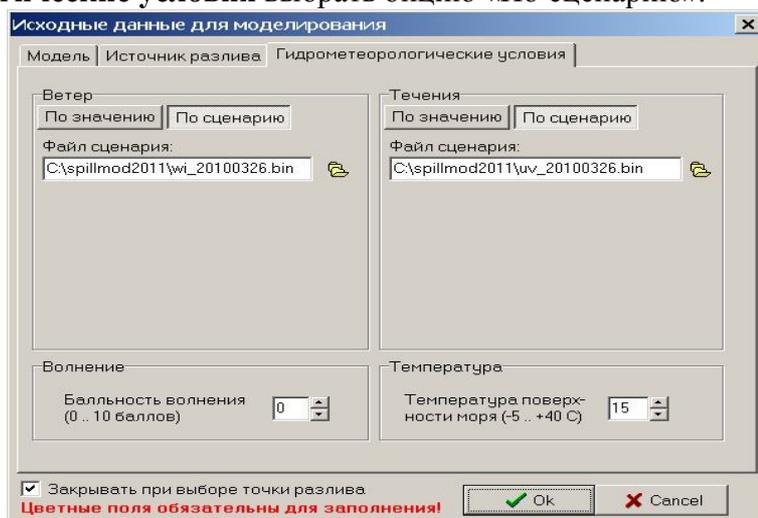


Рис. 10

и указать путь к файлам прогноза приводного ветра и течений, например, C:\spillmod2011\uv_20100326.bin.⁶

6.2.7.4 Ручной ввод гидрометеорологических условий

6.2.7.4.1 Ветер

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

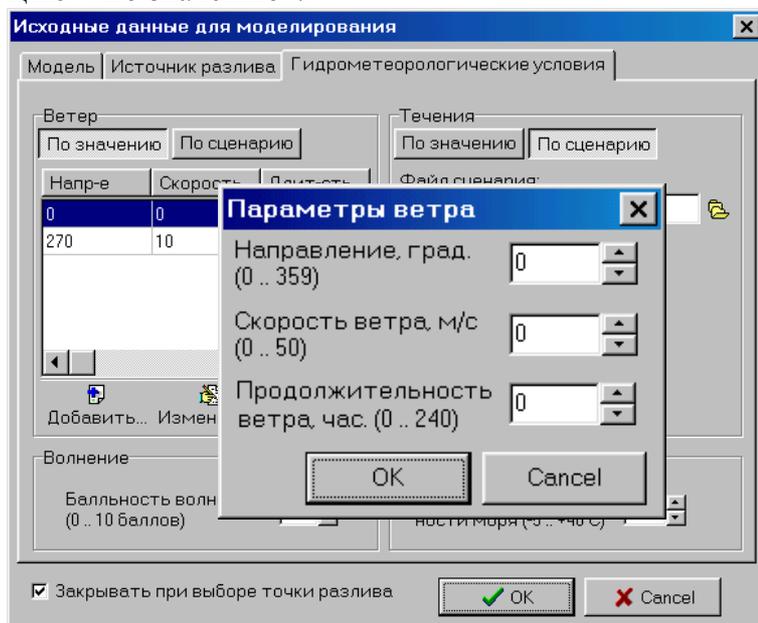


Рис. 11

Для осуществления расчета или прогноза распространения нефти необходимо задать значения скорости и направления ветра и продолжительность его действия. Данные

⁶В оперативной версии для Каспийского моря адрес и имена файлов ветра и течений, соответствующие текущей дате, задаются при открытии вкладки задания гидрометеоусловий «по сценарию» автоматически. При отсутствии указанных файлов необходимо запустить программу «read_wc_kasp.exe».

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 расчёта. 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».

6.2.7.4.2 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 дополнительно используются заранее рассчитанные поля течений, записанные в соответствующем формате для использования в модельном комплексе, аналогично использованию прогностических данных о течении и ветре.

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

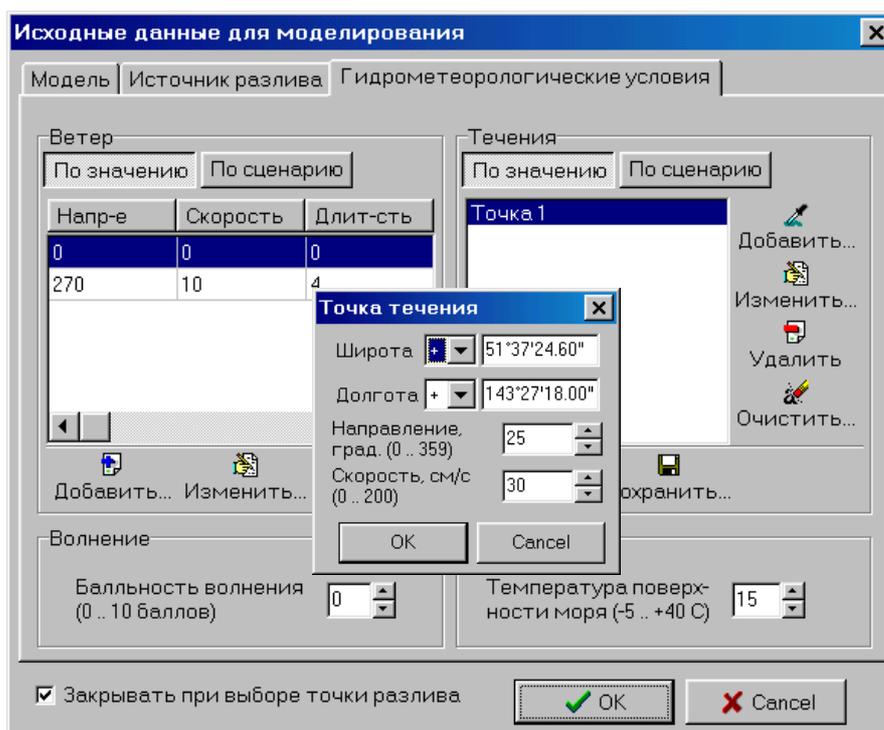


Рис. 12

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

6.2.8 Прогноз распространения аварийных разливов нефти в море.

6.2.8.1 Старт модели

После задания исходных данных (данные о разливе нефти и гидрометеорологические данные), старт началу расчетов осуществляется нажатием на указанную зеленой стрелкой кнопку.

6.2.9 Проблемы при использовании и способы их решения.

6.2.9.1 Сообщения об ошибках

Вариант 1. Сообщение *"OLE server MapInfo Cannot be started"* означает, что была произведена попытка запуска Spillmod.exe на компьютере без предварительно установленной ГИС MAPINFO.

Вариант 2.

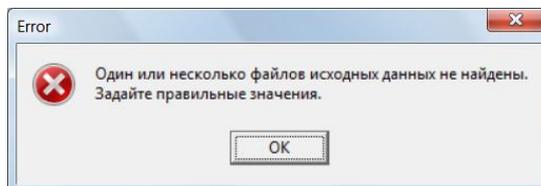


Рис. 15

Решение указано в п. [5.1](#)

Вариант 3.

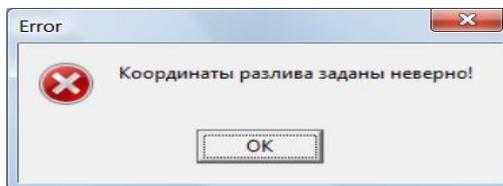


Рис. 16

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

Вариант 4.

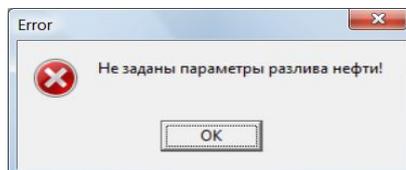


Рис. 17

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

6.2.10 Моделирование использования средств борьбы с разливом⁷

6.2.10.1 Боновые заграждения. Постановка

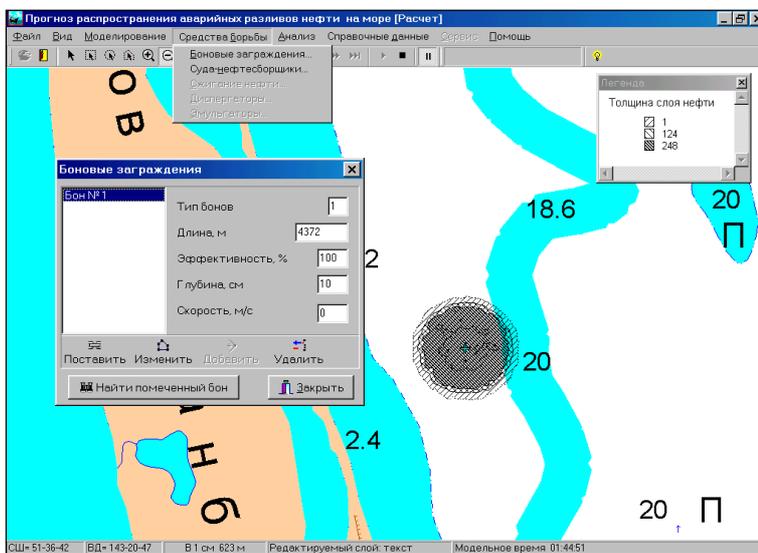


Рис. 18

Боновые заграждения можно:

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

6.2.10.2 Нефтесборщики

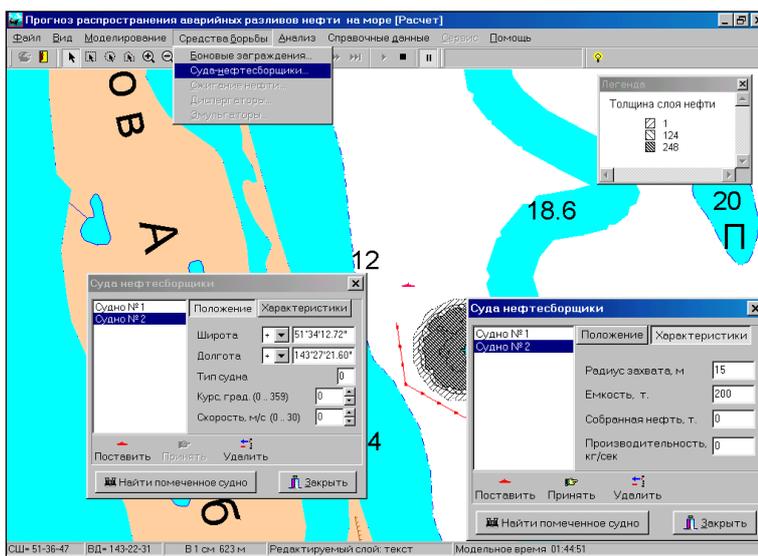


Рис. 19

Для судов-нефтесборщиков задается:

⁷ В версиях SPILLMOD для оперативного прогноза в штатном режиме не предполагается моделирование с использованием средств ЛАРН. Информацию в этом разделе следует рассматривать как ознакомительную.

- 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/сек

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

- количество собранной нефти
- местоположение

6.2.10.3 Анализ результатов расчетов

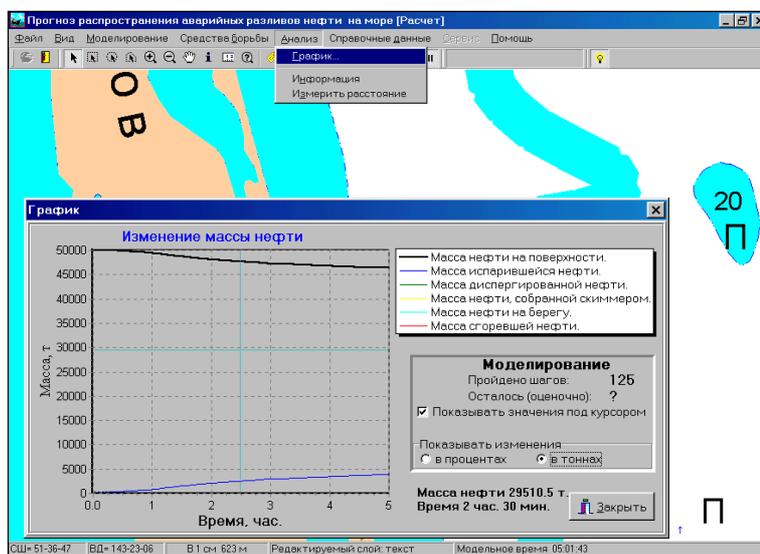


Рис. 20

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)

6.2.10.3.1 Действия с картой - Измерение расстояний

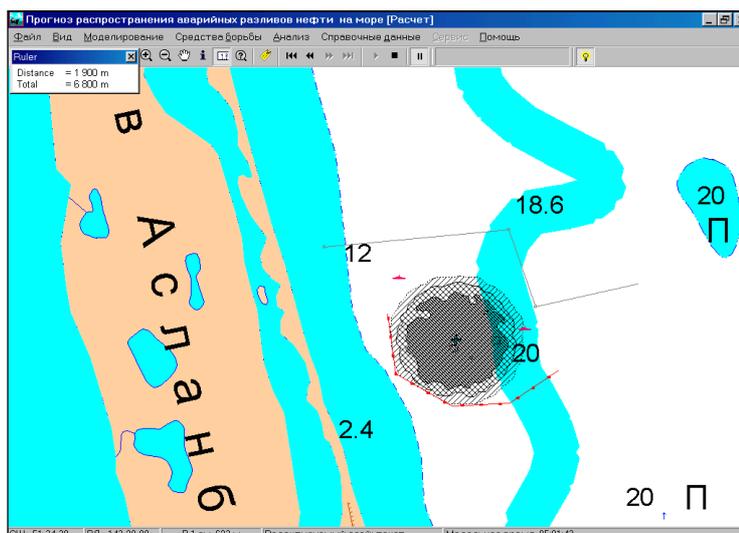


Рис. 21

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.

6.2.10.3.2 Сохранение сценария расчета

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

Адрес папки для сценариев «по умолчанию» записан в spillmod.ini, её 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.

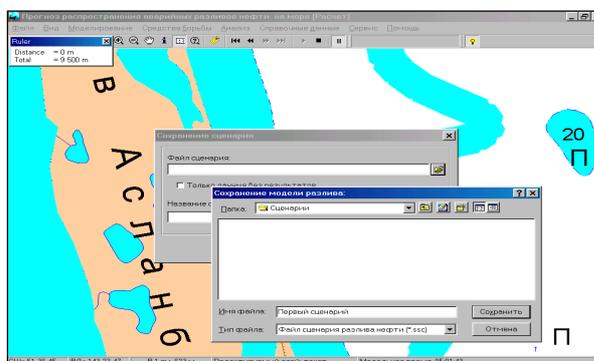


Рис. 22

6.2.10.3.3 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»

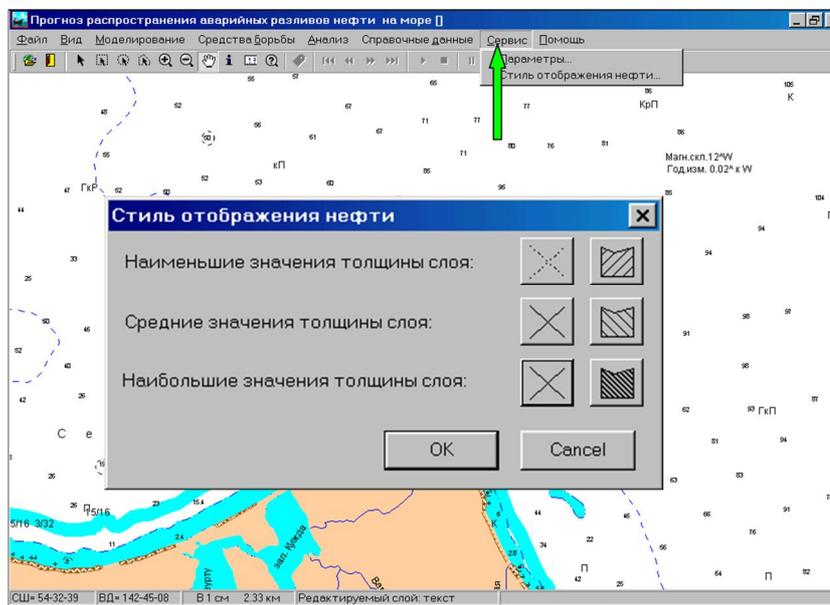


Рис. 23

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.

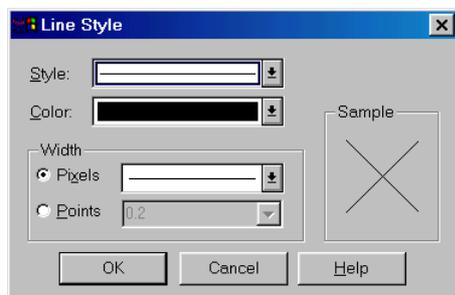


Рис. 24

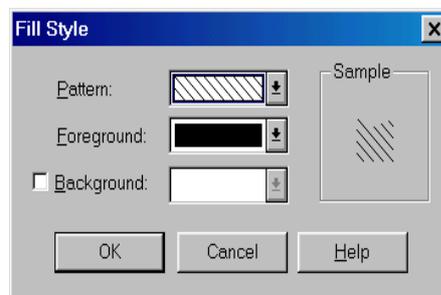


Рис. 25

6.2.10.4 Условия прекращения расчета

Масса нефти на поверхности меньше определённой малой величины.

6.2.10.5 Опционные разделы главного меню

6.2.10.5.1 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.

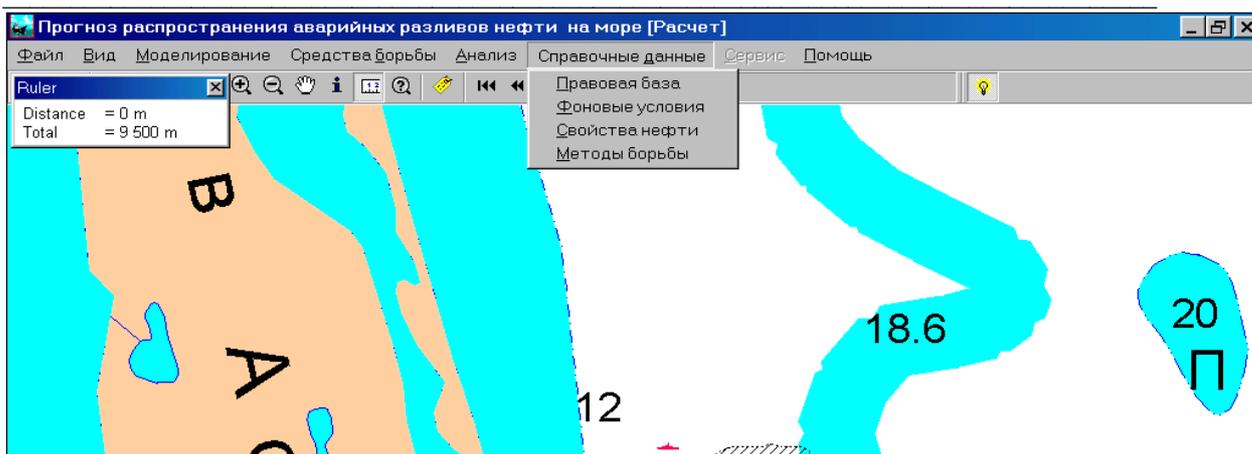


Рис. 26

6.2.10.5.2 Помощь

В разделе Меню «Помощь» используется этот файл.

6.2.10.6 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, так как 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 расчёта. 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 сценария а данном расчёте: scrn_yuuuymmdd.jpg, если имя сценария не было задано, или Ncs_yuuuymmdd.jpg, где Nsc – имя используемого сценария, если оно было задано. Имя файла может быть изменено пользователем.

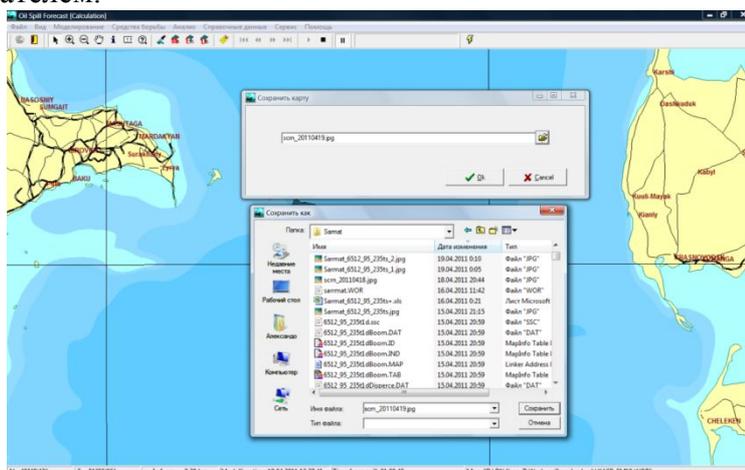


Рис. 27

Другой, более сложный вариант получения отчёта – использование картографической информации которая содержится в записанном сценарии. Её можно использовать либо загрузив записанный ранее сценарий для отображения в SPILLMOD,

либо с использованием MAPINFO. Для этого, после окончания расчёта, 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 расчёта 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 зависимости от параметра *TypeS* (=1 – в мм, 1000 – в микронах).

Раскраска контуров соответствует распределению толщин в пределах данного шага. Изменить раскраску, например, сделать её 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 записываемый в директории “Data” (в которой находятся «подключаемые параметры модели» - файл *tune.dat*) текстовый файл с именем *tr_N..._dat*, где *N...* - уникальный номер, зависящий от времени записи файла. Файл 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 неффти, 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 слика, 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 Microsoft Office Excel.

В директорий **Data** записываются файлы *tr_NNNNNNNN_s.mif* и *tr_NNNNNNNNN_s.mid* – в экспортном формате ГИС Mapinfo, в которых содержатся данные о массе нефти оказавшейся на определённых 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

6.2.10.7 Компоненты программы

Название	Примечание
Spillmod.exe	Программа управления
oil_lib.dll	Библиотека расчетных модулей
spillmod.ini	Файл настройки
manual_casp.chm	Файл справки
spillmod.ENG	Компонент программы
Oiltypes.dat	Данные о нефтях
Tune.dat	Файл настройки
Kaspshoreshape.lnd	Бинарный файл с данными о береговой линии
Caspian.wor	Рабочий набор Mapinfo
Manual_casp.files	Директорий с рисунками файла справки
toc.hhc	Вспомогательный файл справки

6.2.10.8 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	18.9		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					
90.2	82.6	75.8	69.8	64.5	59.9	55.8	52.3	49.3	46.7					
4	6	9	8	8	3	8	6	3	3					
26	4	14	26	14	1	3	7	3	2					
73.6	81.6	90.4	100	110.	121.	133.	146.		174.					
				4	6	6	4	160	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, F⁰; 2. плотность фракции, API; 3. массовая доля фракции; молекулярный вес фракции⁸.

⁸ Если молекулярный вес фракции неизвестен и четвертая строка занята нулями, то молекулярный вес пересчитывается в программе по формуле Воинова

6.2.10.9 Структура файла Tune.dat

№	параметр	комментарий
1	150	Число ячеек сетки для рисования контуров
2	0.03	Ветровой коэффициент
3	30	Начальный угол поворота скорости поверхностного течения
4	0.003	Коэффициент трения на границе нефть-вода
5	0.003	Диффузионный коэффициент
6	60	Временной интервал между отдельными выбросами, сек
7	-1	-1 - это расчёт по времени разлива заданном в исходных данных, положительное число - номер сценария, когда расчет ведется по архивным данным
8	1	Коэффициент для корректировки течений
9	50	Максимальный диффузионный масштаб, м
10	10000	Предельное расстояние (м) для учета точек течений
11	1/0	1-файл tr_NNNNNNN.dat пишется в директории Data 0- запись отчета не ведется
12	Draw_grid k_WindCur k_Angle Beta k_dif Num_Leak N_trj K_cur Scale_MAX Cur_Maxdist	

6.3 ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОВЕДЕНИЕ НЕФТИ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

6.3.1 Свойства нефти

Нефть - жидкость от светло-коричневого (почти бесцветная) до тёмно-бурого (почти чёрного) цвета (хотя бывают образцы даже изумрудно-зелёной нефти). Средняя молекулярная масса 220—400 г/моль (редко 450—470). Плотность 0.65—1.05 (обычно 0.82—0.95) г/см³; нефть, плотность которой ниже 0.83, называется лёгкой, 0.831—0.860 — средней, выше 0.860 — тяжёлой. Принципиальным для понимания проблемы является то, что нефть или нефтепродукты состоят из сложной смеси углеводородов различной молекулярной массы и некоторых других химических соединений.

Нефть содержит большое число разных органических веществ и поэтому характеризуется не температурой кипения, а температурой начала кипения жидких углеводородов (обычно >28 °С, реже ≥100 °С в случае тяжёлых сортов нефти) и фракционным составом — выходом отдельных фракций, перегоняющихся сначала при атмосферном давлении, а затем под вакуумом в определённых температурных пределах, как правило до 450—500 °С (выкипает ~ 80 % объёма пробы), реже 560—580 °С (90—95 %). Температура кристаллизации от -60 до + 30 °С; зависит преимущественно от содержания в нефти парафина (чем его больше, тем температура кристаллизации выше) и лёгких фракций (чем их больше, тем эта температура ниже). Вязкость изменяется в широких пределах (от 1,98 до 265,90 мм²/с для различных типов нефти, добываемых в России), определяется фракционным составом нефти и её температурой (чем она выше и больше количество лёгких фракций, тем ниже вязкость), а также содержанием смолисто-асфальтеновых веществ (чем их больше, тем вязкость выше). Нефть растворима в органических растворителях, в обычных условиях не растворима в воде, но может образовывать с ней стойкие эмульсии. (по материалам <https://ru.wikipedia.org/wiki/Нефть>)

Поведение нефти в морской среде существенно зависит от ее фракционного состава. Для многих практических задач, включая и расчеты испарения нефти с поверхности воды, удобно использовать представление нефти в виде псевдо-компонент, отличающихся, ранжированных по температуре кипения. Приведем, для примера, фрагмент описания нефти месторождения «Приразломное» в Печорском море по материалам ВНИИНП (Москва, 1999).

Таблица 1. Пример представления физических свойств нефти

Показатель	Значение	ГОСТ или методика
Плотность, (20 ⁰ С), кг/м ³	911.0	3900-82
Кинематическая вязкость (50 ⁰ С), мм ² /с	19.3	33-82
Температура застывания, ⁰ С :	-30	20287-74

Таблица 2. Фракционный состав нефти (ГОСТ 11011-85) и физические свойства узких фракций

	Пределы отбора, ⁰ С	Содержание фракции, % масс.	Содержание фракции, % масс, суммар.	Плотность при 20 ⁰ С, кг/м ³	Кинематическая вязкость, при ⁰ С			Температура застывания, ⁰ С
					20	50	100	
1	28-62	0.96	0.96	673.5				
2	62-100	2.03	2.99	729.1				
3	100-130	2.53	5.52	759.4				
4	130-150	2.29	7.81	764.8	0.99			
5	150-180	3.91	11.72	790.3	1.35	0.89		
6	180-200	2.75	14.47	813.7	1.99	1.01		<-60
7	200-230	5.45	19.92	831.2	2.58	1.43	0.87	-50
8	230-250	3.81	23.73	848.6	3.52	1.89	1.10	-39
9	250-280	6.23	29.96	864.7	5.09	2.51	1.32	-30
10	280-300	4.29	34.25	880.1	8.24	3.65	1.51	-21
11	300-320	4.23	38.48	892.9	11.8	4.68	1.85	-13
12	320-350	6.42	44.90	907.8	17.7	6.47	2.39	-4
13	350-380	5.62	50.52	921.2	46.6	10.4	3.37	8
14	380-400	3.40	53.92	931.1		16.7	4.51	16
15	400-420	3.56	57.48	937.5		23.1	5.88	20
16	420-450	4.20	61.68	944.8		42.7	8.34	26
17	450-480	4.68	66.36	950.5		74.1	11.6	32
18	480-500	3.06	69.42	955.4		98.1	23.8	35
19	Остаток > 500	30.58	100	1025.3				>50

К основным физическим характеристикам нефти относятся: плотность, вязкость, температура застывания и вспышки.

Плотность определяет плавучесть нефти, 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.

Вязкость нефти - это ее сопротивление растеканию. Нефти с высокой вязкостью растекаются медленнее, чем нефти маловязкие, обладающие высокой подвижностью. Многие свойства нефти при эксплуатации, транспортировке и хранении зависят от вязкости. При низкой температуре воды и воздуха увеличивается вязкость нефти, и ее распространение на водной поверхности происходит медленнее.

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

Температура вспышки - это температура, при которой над поверхностью разлитой нефти образуются пары в достаточном количестве для создания воспламеняющейся смеси. Эта характеристика важна для оценки обеспечения безопасности операций при ликвидации разливов нефти. Многие сорта свежеразлитой нефти могут легко воспламениться, пока не испарились и не рассеялись в атмосфере более летучие фракции.

6.3.2 Процессы трансформации

Независимо от пути попадания в водную среду (в виде поверхностного, подповерхностного или глубоководного разлива), нефть или нефтепродукт находится в море в виде плавающего поверхностного пятна и взвешенных в водной толще капель. Между поверхностной и взвешенной в воде нефтью происходит непрерывный обмен. Нефтяное пятно на поверхности воды подвержено, с одной стороны, переносу под действием течений и ветра, и, с другой стороны, множеству процессов трансформации.

Одним из самых важных трансформационных процессов для нефти на поверхности моря является гравитационное растекание. Благодаря растеканию пленка нефтяного загрязнения может покрывать десятки и сотни квадратных километров морской поверхности, приводя к значительным экологическим и социально-экономическим проблемам в регионе аварии. К кругу физических проблем здесь относится реология тонких пленок нефтепродуктов на поверхности моря, необходимость рассмотрения движения на взволнованной (не горизонтальной) границе раздела море-атмосфера, формирование пограничного слоя при движении или растекании нефти, изменение ее физических свойств с течением времени вследствие процессов выветривания, и сами процессы выветривания. Под выветриванием или "старением" нефти на поверхности моря, как правило, понимаются процессы испарения легких фракций, проникновение капель нефти в воду и обратный процесс, формирование эмульсии типа вода в нефти.

Кроме того, происходит сорбирование нефти твердыми частицами и осаждение на дно, взаимодействие с береговой линией и/или со льдом, фотохимические реакции и биодegradация. Последние могут изменять свойства и уменьшать количество нефти за длительный период времени.

Расчет переноса (траектории) нефтяного пятна позволяет определить его положение в пространстве. Расчет процессов выветривания нефтяного разлива определяет переход нефти между различными средами (морская поверхность, атмосфера, водная толща, береговая область, лед, дно моря, биота) и изменение ее характеристик (плотности, содержания воды, вязкости, поверхностного натяжения). Трансформация и перенос

нефтяного разлива в воде происходит в результате целого набора сложных, взаимосвязанных физико-химических процессов, которые зависят от свойств нефти, гидродинамических параметров и условий окружающей среды. На Рисунке 29 показаны физические, химические и биологические процессы, действующие на нефтяной разлив после попадания в морскую среду.

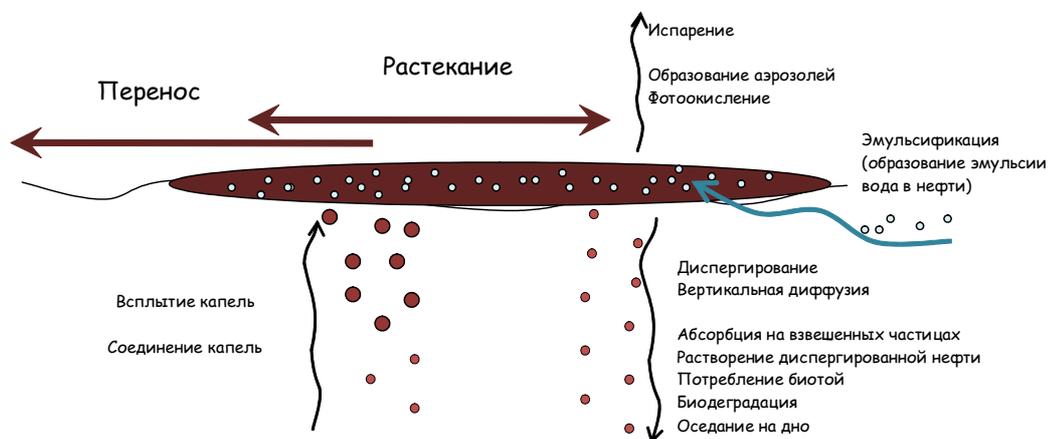


Рисунок 29 Совокупность основных процессов, которым подвергается нефть в водной среде.

Перенос/адвекция - перемещение нефти по поверхности водного объекта под действием ветра, волн и течений;

Растекание - увеличение площади нефти на водной поверхности за счет положительной плавучести, поверхностного натяжения и турбулентной диффузии;

Испарение - физико-химический процесс, приводящий к массопереносу углеводородов с водной поверхности в атмосферу. Это - наиважнейший исходный атмосферный процесс, в результате которого все летучие фракции (легкие фракции) нефти улетучиваются в течение первых нескольких часов после разлива нефти. Другая важная роль процесса испарения заключается в изменении физических и химических свойств нефти (в частности, ее плотности, вязкости, содержания воды и т.д.).

Атмосферный перенос - перенос испарившихся нефтепродуктов в атмосфере;

Эмульгирование / образование мусса - физико-химический процесс формирования эмульсии типа вода-в-нефти, в результате чего она приобретает коричневый оттенок, иногда именуемый «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.

Деформация может произойти вследствие турбулентности, капиллярных пульсаций, неустойчивости Релея-Тейлора и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

Проникновение нефти в водную толщу / диспергирование - перенос нефти с водной поверхности в водную толщу, вызванный обрушением волн, образование эмульсии типа нефть-в-воде. Диспергирование представляет собой физический процесс, при котором макроскопические сферические частицы нефти переносятся с водной поверхности в толщу воды вследствие разрушения волнами. Унесенная нефть разбивается на капли разного размера, которые распространяются и диффундируют в толщу воды. На стабильность диспергирования влияют такие факторы, как размеры капель, их плавучесть и турбулентность. Основными источниками энергии диспергирования являются разрушающиеся волны, образующиеся под действием ветра на поверхности водного объекта. Диспергированная нефть подлежит усиленному растворению и биодеструкции;

Растворение - физико-химический процесс, в результате которого часть массы нефти из пленочной или капельной фазы переходит в водную толщу. Растворение - это процесс, приводящий к массопереносу углеводородов (растворимых в воде фракций) из тонкой поверхностной нефтяной взвеси и капель нефти в толщу воды. Массоперенос, происходящий вследствие молекулярной диффузии, протекает более медленно по сравнению с испарением. Концентрация растворенных в воде углеводородов под тонкой поверхностной взвесью сначала возрастает, а затем быстро уменьшается спустя несколько часов в результате улетучивания компонентов при испарении. Растворение имеет большое значение при неинтенсивном испарении (диспергированные капли нефти и покрытые льдом поверхности). Растворенные углеводороды наиболее подвержены биодеструкции.

Фотоокисление - трансформация нефтяных углеводородов под действием солнечного света. Фотоокисление играет достаточно существенную роль в общем процессе трансформации нефти в высоких широтах в условиях полярного дня - вклад фотоокисления нефти может составлять до 15 - 30 % [Измайлов, 1988].

Биодеградация - уменьшение массы нефти в водной толще за счет действия микроорганизмов. Биодеградация или Биодеструкция - это биохимический процесс, изменяющий или превращающий углеводороды нефти благодаря жизнедеятельности микроорганизмов и (или) поглощению и удерживанию внутри микроорганизмов.

Погружение нефти в воду/ осаждение на дно - происходит за счет увеличения плотности нефти из-за процессов выветривания, соединения с минеральной или органической взвесью или вследствие захвата нефтяных капель микроорганизмами. В

результате осаждения на дне водного объекта образуются отложения адсорбированных частиц нефтяных осадков.

Взаимодействие с берегом - происходит за счет переноса нефти в направлении берега волнами и поверхностными течениями и вследствие атмосферного переноса испарившейся нефти

Взаимодействие со льдом - перенос и выветривание нефти в условиях замерзающего, тающего и движущегося ледового покрова. Полезная информация о поведении нефти в море может также быть получена с открытого ресурса <http://www.itopf.com>.

В процессе эволюции нефти в морской среде относительная роль перечисленных процессов может меняться. Временные «рамки» доминирования того или иного процесса существенным образом зависят от масштабов сброса и типа нефти и нефтепродукта. Так, бензин или газоконденсат полностью может исчезнуть с поверхности моря за счет процессов испарения фракций в течение первых часов после сброса, а мазут представляет нефтепродукт, в котором легколетучие фракции практически отсутствуют, и эволюция разлива мазута на поверхности моря будет зависеть от температуры верхнего слоя моря и точки текучести, 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 прогнозирование распространения нефти в морской среде, не учитываются процессы растворения, фотоокисления и биологического разложения нефтеуглеводородов. Растворение нефтеуглеводородов в морской воде имеет существенное экологическое значение за счет их токсичности, но растворяются, в основном, легкие фракции, которые и испаряются в первую очередь, но при этом скорость испарения гораздо выше, чем скорость растворения.

В средних широтах роль фотоокисления незначительна. Напротив, вклад биоразложения нефти возрастает при повышении температуры воды. При оптимальных условиях доля окисления нефти бактериями может составлять 50-60% [Израэль и Цыбань, 1989]. По результатам экспериментов в Арктике доля микробиологической деструкции составляет в летний период около 2 - 7 %, в остальные сезоны она близка к нулю [Измайлов, 1988]. К настоящему времени достаточно немногочисленные лабораторные и натурные эксперименты показали сильную пространственно-временную изменчивость и очень большой разброс количественных оценок влияния процессов фото- и биоокисления, поэтому их включение в общую модель трансформации нефти (хотя бы на уровне

уравнений регрессии или параметров неконсервативности) не представляется целесообразным.

6.3.3 Подводный выброс нефти

Развитие глубоководного выброса нефтегазовой смеси может варьироваться в широких пределах в зависимости как от характеристик самого выброса – расхода, скорости выхода, состава нефтегазовой смеси, так и от многих гидрологических факторов – температуры, течений, солёности.

Трудность моделирования и прогноза распространения нефти в результате глубоководного выброса следует хотя бы из того факта, что до настоящего времени ни одного описания реального глубоководного выброса не известно, кроме, быть может, эксперимента [Johansen, 2000]. Вместе с тем, подводный выброс сопровождается целым рядом процессов, без учёта которых обоснованный прогноз и даже его обнаружение не представляются возможными.

По имеющимся представлениям, глубоководный разлив будет сопровождаться следующими физическими явлениями (Fanneløp, Sjøen, 1980, Johansen, 2000)

1) на первом этапе происходит выброс облака частиц нефти и газа, вызванный перепадом давлений – нефтегазовой смеси внутри пласта и воды на глубине бурения. Нефть в этом сильно турбулизированном потоке будет разбиваться на капли диаметром от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Далее, расширяющиеся пузырьки газа будут служить основной причиной быстрого подъёма этого облака к поверхности, увлекающего с собой капельки нефти. Собственная скорость всплытия капель нефти в этих условиях практически не имеет значения. Вследствие вовлечения окружающей воды, радиус потока будет расти, а вертикальная скорость быстро падать от нескольких метров в секунду до величины порядка 0.2-0.5 м/с. Вблизи поверхности скорость снова увеличивается за счёт быстрого увеличения объёма пузырьков газа. После подъёма на поверхность, за счёт сохранившегося импульса может происходить быстрое, близкое к радиально- симметричному распространение капель нефти от центра выброса.

2) Сказанное выше относится к сравнительно мелководным выбросам ($H < 200-300$ м). В случае более глубоководного выброса картина усложняется. В реальных условиях происходит потеря плавучести за счёт растворения газа в воде, потери пузырьков газа за счёт сдвига течений по глубине, а также образования газовых гидратов. По мере потери плавучести, поток практически теряет скорость, а его радиус значительно увеличивается. Вариации поля плотности также будут оказывать значительное влияние, вплоть до полной потери импульса за счёт больших его градиентов.

3) При достаточно большой глубине выброса, в результате контакта газа с водой под большим давлением, будут образовываться газовые гидраты (ГГ) - твердые кристаллические вещества, внешним видом напоминающие снег или рыхлый лед, решетчатые клатратные соединения, в которых молекулы гидрофобных (или близких к ним) газов включены в полости кристаллического каркаса, построенного посредством водородных связей из молекул воды. Как и все соединения этого типа, ГГ имеют относительно малую область термодинамической устойчивости и поэтому чрезвычайно чувствительны к изменениям условий равновесия. При большом давлении, скорость образования гидратов, по-видимому, будет определяться скоростью перемешивания газа с водой. В результате выброс будет значительно быстрее терять газовую фракцию, - основной источник плавучести, а глубина потери импульса будет зависеть в основном от скорости образования гидратов, которая, при достаточной глубине выброса, будет определяться скоростью перемешивания потока с водой. Расчёты показывают, что в этих условиях потеря скорости происходит на расстоянии нескольких десятков метров от дна. При изменении соотношения газ-нефть глубина потери импульса будет меняться незначительно. Как показывают эксперименты, в этом случае на поверхности газовых пузырьков образуется тонкая корка из кристаллов гидратов, препятствующая их дальнейшему образованию. Поэтому можно предположить, что при данной глубине выброса в гидраты перейдёт небольшая часть газа. Вопрос о том, как это повлияет на динамику выброса, нуждается в дальнейших исследованиях.

Образовавшиеся частицы ГГ, имеющие плотность несколько меньшую плотности морской воды (0.92-0.96), будут подниматься к поверхности, однако при достижении глубины, определяемой Р-Т фазовой диаграммой системы газ-вода (300-600м), они будут терять устойчивость. Выделившийся в результате диссоциации газ будет подниматься к поверхности в виде пузырьков, частично растворяясь в воде.

4) Выше глубины потери импульса будет происходить подъём капель нефти под действием собственной плавучести, со скоростью, определяемой размерами капель, образовавшихся в процессе первой фазы выброса, и разностью плотностей нефти и морской воды. Количество нефти, достигшей поверхности, и размеры образовавшегося пятна будет распределение капель нефти по размерам, стратификацией плотности морской воды и полем течений от поверхности до дна в окрестности выброса.

6.4 НЕКОТОРЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

6.4.1 Перенос

Трансформация и перенос нефтяного разлива в воде происходит в результате целого комплекса сложных и 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

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

где W - скорость ветра над нефтяным пятном, $U_{current}$ - скорость течения, рассчитанная в модели течений, $U_{drift}(W)$ - скорость дрейфового течения, рассчитанная параметрически, U_{wave} - скорость переноса за счет волн, U_{dif} - случайная добавка к скорости переноса, обусловленная процессами турбулентной диффузии. Как правило, считается, что в открытом море и вдали от берегов скорость дрейфового течения составляет порядка 3% (ветровой коэффициент) от скорости ветра и повернута в северном полушарии на угол порядка 15 градусов вправо при умеренных скоростях ветра. Распространенной параметризацией для угла отклонения дрейфа нефтяного пятна от направления ветра является

$$\alpha_{dev} = 25 \exp(-W^3 / 1184.75), \quad (\text{П.1b})$$

где W – скорость ветра. 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 форсинга и, чем лучше модели течений описывают динамику верхнего слоя моря, тем меньшее значение может иметь добавочный член $U_{drift}(W)$. Итоговая траектория движения нефтяного разлива в конкретном метеорологическом сценарии будет зависеть от аккуратной настройки ветрового коэффициента и угла поворота скорости дрейфового течения для выбранной модели гидротермодинамики океана и приводного слоя

атмосферы. Важным фактором, ответственным за дополнительный дрейф и проникновение нефтяных капель в воду, является ветровое волнение.

Соотношение (П.1), несмотря на универсальность формулировки, имеет сильно выраженную региональную привязку, так как все составляющие правой части определяются из региональных моделей динамики атмосферы, морской динамики и ветрового волнения.

Комментарий: перенос *отдельного нефтяного пятна* по поверхности моря может быть рассчитан по соотношению

$$\overline{X}^n(t) = \overline{X}_0 + \Delta t \sum_{i=1}^n \overline{U}_a^i(\overline{X}^i, t_i) \quad (\text{П.2})$$

$$t_i = i \cdot \Delta t$$

где Δt - шаг интегрирования по времени.

6.4.2 Площадь нефтяного разлива

Площадь *отдельного нефтяного пятна* часто рассчитывается с использованием полуэмпирических зависимостей, предложенных Фэем [Fay and Hoult, 1971], или их модификаций. Считается, что процесс растекания состоит из трех фаз: инерционная, гравитационно-вязкая и фаза поверхностного натяжения. Для одномоментного или «залпового» сброса нефти площадь пятна и эквивалентный радиус рассчитываются по соотношениям:

a. инерционная фаза:

$$R = 1.14 \cdot (\gamma g V)^{0.25} t^{0.5}, \quad (\text{П.3})$$

где R - радиус слика, $\gamma = \frac{\rho_w - \rho_{oil}}{\rho_{oil}}$, ρ_w – плотность воды, ρ_{oil} – плотность нефти, V - объем спиллета;

g - ускорение свободного падения, t - время от начала сброса.

Фаза заканчивается при толщине слика: $h_1 = \frac{V}{\pi R^2} = (v_w t)^{0.5}$, где v_w – кинематическая

вязкость воды.

b. гравитационно-вязкая фаза:

$$R = 1.45 \cdot \left(\frac{\gamma g V^2}{v_w^{0.5}} \right)^{0.17} t^{0.25} \quad (\text{П.4})$$

Фаза заканчивается при толщине слика: $h_2 = \frac{V}{\pi R^2} = \left(\frac{\sigma}{\gamma \rho_{oil} g} \right)^{0.5}$, где σ - суммарное

поверхностное натяжение.

с. фаза поверхностного натяжения:

$$R = 2.30 \cdot \left(\frac{\sigma^2 t^3}{\rho_{oil}^2 V_w} \right)^{0.25} \quad (\text{П.5})$$

Фаза заканчивается при площади слика

$$A_{\max} = \pi R_{\max}^2 = 10^5 \cdot V^{0.75} \quad (\text{П.6})$$

Соотношение (П.6) получено в предположении, что растекание прекращается, когда коэффициент растекания $\sigma = \sigma_{aw} - \sigma_{ow} - \sigma_{ao}$ поменяет знак из-за изменения поверхностного натяжения на границах нефтяного пятна, связанного с растворением/испарением наиболее легколетучих и растворимых компонент, продиффундировавших из объема нефтяного слика к его поверхности за счет молекулярной диффузии.

Отдельные, более развитые, модели для расчета растекания используют численное решение уравнений мелкой воды.

Комментарий: Соотношения (П.3)-(П.6) дают возможность оценить геометрические характеристики пятна нефти в предположении о мгновенном попадании нефти на поверхность моря при отсутствии ветра и течений. Соотношения Фэя (П.3)-(П.6) не учитывают выветривания нефти и изменения физических свойств растекающегося нефтепродукта. Как правило, вместо соотношений (П.3)-(П.6) в моделях нефтяных разливов используется модифицированное соотношение (П.4)

$$\frac{\partial A}{\partial t} = K_1 A(t)^{\frac{1}{3}} h(t)^{\frac{4}{3}} \quad (\text{П.7})$$

где $A(t)$ - площадь разлива нефти.

6.4.3 Испарение

Испарение из нефтяного пятна основывается на предположении, что нефть или нефтепродукт можно рассматривать как смесь нескольких (8-20) компонент с известными температурами кипения (true boiling point) и плотностями фракций.

Своеобразие типов нефтей связано с различным процентным соотношением компонентов в каждом конкретном случае.

Поток массы за счет испарения Q_e представляется в виде:

$$Q_e = k \sum_i \frac{M_i P_i X_i}{RT} = \sum_i Q_i \quad (\text{П.8})$$

где k - эмпирический коэффициент, зависящий от скорости ветра, P_i - парциальное давление пара i -той фракции нефти, M_i - молекулярный вес фракции, X_i - молярная концентрация фракции, R - универсальная газовая постоянная, T - температура подстилающей поверхности, Q_i - поток массы i -той фракции нефти. Если молекулярный вес фракции неизвестен, то он рассчитывается, например, по формуле Воинова [Мановян, 2001]

$$M_{i=60} + 0.3T_{bi} + 0.001T_{bi}^2 \quad (\text{П.9})$$

а давление насыщенного пара по формуле Ашфорта

$$\lg P_i = 2.68 \left[1 - \frac{\frac{1250}{\sqrt{T_w^2 + 10800 - 307.6}} - 1}{\frac{1250}{\sqrt{T_{bi}^2 + 10800 - 307.6}} - 1} \right] \quad (\text{П.10})$$

где P_i - давление насыщенного пара i -той фракции, T_{bi} - температура кипения i -той фракции, T_w - температура воды.

Для эмпирического коэффициента может быть выбрана следующая параметризация

$$k = \begin{cases} 0.0018 \cdot W_{10}^{0.78} & W_{10} > 4 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \\ 0.005 & W_{10} \leq 4 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \end{cases} \quad (\text{П.11})$$

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

Комментарий: Соотношения (П.9)-(П.11) могут иметь альтернативные формулировки, однако необходимость пересчета на каждом временном шаге молярных концентраций компонент узких фракций нефти требует программной реализации алгоритма расчетов. Соотношение (П.8) определяет поток массы с единицы площади поверхности нефтяного пятна. Общий отток нефти из нефтяного слика за счет испарения оценивается как

$$\Delta E = Q_e(t) \cdot A(t) \cdot \Delta t \quad (\text{П.12})$$

что предполагает корректный расчет площади слика на каждом временном шаге расчетов.

6.4.4 Диспергирование

При ветровом волнении часть нефти в виде капель может переходить в водную толщу и распространяться как внутриводное загрязнение, при этом форма существования нефти в морской среде трансформируется от пленочной (на поверхности) к дисперсии капель различного размера. Расчет вертикальной дисперсии нефти в воду, т.е. проникновение капель нефти в поверхностный слой моря за счет обрушения волн, в результате чего образуется эмульсия типа «нефть в воде», может производиться, например, с помощью метода [Delvigne and Sweeney, 1988; Reed et al., 1999].

$$Q_{disp} = C_{oil} D^{0.57} f_s F_{wc} d_o^{0.7} \delta d, \quad (\text{П.13})$$

где Q_{disp} – поток нефти (кг/м²с); f_s – часть поверхности моря, покрытая нефтью; d_o – средний диаметр капель; δd – интервал диаметров капель относительно d_o ; C_{oil} – параметр, зависящий от свойств нефти; D – диссипация волновой энергии на единицу площади:

$$D = 0.0034 \cdot \rho_w g H_{rms}^2, \quad H_{rms} = \frac{H_{wave}}{\sqrt{2}} \quad (\text{П.14})$$

где H_{wave} – высота волны, ρ_w – плотность воды.

F_{wc} – часть поверхности моря, покрытая “барашками (whitecaps)” в единицу времени:

$$F_{wc} = 0.032 \frac{(W - W_s)}{T_{wave}}, \quad (\text{П.15})$$

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

Считается, что нефть вбивается в воду в виде капель, 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].

Параметр C_{oil} зависит от свойств нефти и определяется экспериментально. В оригинальной работе [Delvigne and Sweeney, 1988] эксперименты проводились с тремя сортами нефти, в результате величина параметра C_{oil} оценивалась от 510 до 1800. Отмечается, что параметр C_{oil} сильно зависит от вязкости нефти [Delvigne and Sweeney, 1988; Reed et al., 1999]. Возможна параметризация, предложенную в модели MOHID [Miranda et al., 2000]:

$$C_{oil} = -312.25 \cdot \ln(\nu) + 2509.8 \quad (\text{П.16})$$

где ν – кинематическая вязкость нефти (сSt). При $C_{oil} \leq 0$ принимается, что $C_{oil} = 0$ и дисперсия отсутствует.

6.4.5 Образование эмульсии типа вода-в-нефти

Для образования эмульсии «вода в нефти» необходим минимальный уровень энергии. Fingas et al. [1999] по результатам лабораторных экспериментов получили величину 0.05-0.24 Дж/м³. Турбулентная энергия рассчитывается по формуле [Xie et al., 2007]:

$$E = \rho_w e = 0.5 \rho V^2 = \sqrt{\rho_w \mu_T \varepsilon / C_\mu}, \quad (\text{П.17})$$

где E – турбулентная энергия на единицу объема воды (Дж/м³); e – турбулентная энергия на единицу веса воды (Дж/кг); ρ_w – плотность воды; V – вихревая (eddy) скорость (м/с); ε – скорость диссипации турбулентной энергии на единицу веса воды (м²/с³); $(\rho_w \varepsilon)$ – скорость диссипации турбулентной энергии на единицу объема воды (Дж/м³с); μ_T – турбулентная (eddy) вязкость (кг/м с); C_μ – константа (= 0.09).

$$\mu_T = 0.1825 \cdot 10^{-4} W_s^{5/2}, \quad (\text{П.18})$$

где W_s – скорость ветра (см/с); μ_T – вязкость (г/см с).

Terray et al. [1996] предложили шкалу для скорости диссипации турбулентной энергии, основанную на параметрах ветра и волн. Они нашли, что при разрушении волн скорость диссипации зависит от глубины:

$$\varepsilon = \begin{cases} u_{*w}^3 / kz; H > z_I > z_t \\ \frac{0.3 u_{*w}^2 c h_w}{z^2}; z_t > z_I > z_b, \\ \varepsilon_b; z_b > z_I > z_0 \end{cases} \quad (\text{П.19})$$

где $z_b = 0.6 h_w$ (м); ε_b – скорость диссипации на глубине z_b (м²/с³); k – постоянная Кармана (=0.4); h_w – значимая высота волны; c – эффективная фазовая скорость (м/с); u_{*a} – динамическая (friction) скорость в воздухе (м/с); u_{*w} – динамическая скорость в воде (м/с); в уравнении принимается $z = 0.2$; H – глубина.

$$z_t = 6 \frac{c}{u_{*a}} z_b \text{ (м)}. \quad (\text{П.20})$$

Для расчета динамических скоростей используется соотношение:

$$u_{*a} = k \frac{W_s}{\ln(10/z_0)} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} u_{*w}^2 \right)^{0.5}, \quad (\text{П.21})$$

где ρ_a – плотность воздуха (кг/м³); z_0 – параметр шероховатости (м):

$$z_0 = 1.38 \cdot 10^{-4} \left(\frac{W_s}{c_p} \right)^{2.66} h_w.$$

На основе экспериментальных данных Terray et al. [1996] получили соотношения:

$$\frac{c}{c_p} = \begin{cases} 10 \frac{u_{*a}}{c_p} - 0.25; & \frac{u_{*a}}{c_p} \leq 0.075 \\ 0.5; & \frac{u_{*a}}{c_p} > 0.075 \end{cases} \quad (\text{П.22})$$

В глубоком море фазовая скорость волны (c_p) и период волны (T_w) связаны соотношением:

$$c_p = \frac{gT_w}{2\pi}. \quad (\text{П.23})$$

Отмечается, что при скорости ветра более 12 м/с достаточно быстро происходит дисперсия нефти в воду и эмульсия «вода в нефти» почти не образуется.

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 содержат 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 $S < 0.67$.

$$S_1 = X_a \exp[K_{ao}(1 - X_a - X_w)^2 + K_{aw}X_w^2] \exp[-0.04(T - 293)], \quad (\text{П.24})$$

$$S_2 = \begin{cases} (0.04CCI + W_s)/5.6 & \text{при } 5.24CCI - 9W_s \geq 0 \\ CCI/9.0 & \text{при } 5.24CCI - 9W_s < 0 \end{cases} \quad (\text{П.25})$$

$$CCI = Asph + Res + 0.4Wax \quad (\text{П.26})$$

где $K_{ao} = 3.3$ при 293 °К, $K_{aw} = 200$ при 293 °К, T - температура (°К), X_a – содержание асфальтенов, X_w – содержание парафинов, W_s – скорость ветра, CCI – индекс химического состава (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.

1. Метод, предложенный Расмуссеном [1985], используется, когда известно содержание асфальтенов и парафинов.

$$\frac{dF_{wo}}{dt} = R_1 - R_2 \quad (\text{П.27})$$

$$R_1 = \frac{k_1}{\mu} (1 + W)^2 (F_{fin} - F_{wo}) \quad (\text{П.28})$$

$$R_2 = \frac{k_2}{Asph \cdot Wax \cdot \mu} F_{wo}, \quad (\text{П.29})$$

где F_{wo} – объемное содержание воды в эмульсии, F_{fin} – конечное содержание воды в эмульсии (в модели используется $F_{fin}=0.7$ для сырых нефтей и 0.5 для мазута), W – скорость ветра, $Asph$ – содержание асфальтенов (+ смол) в нефти (%), Wax – содержание парафинов в нефти (%), k_1 and k_2 – эмпирические константы: $k_1=5 \cdot 10^{-7}$ (кг/м³) и $k_2=1.2 \cdot 10^{-7}$ (кг/мс²), μ – динамическая вязкость нефти.

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

$$\frac{dF_{wo}}{dt} = k(1 + W)^2 \left(1 - \frac{F_{wo}}{F_{fin}}\right) \quad (\text{П.30})$$

где k – эмпирическая константа (10^{-6}).

6.4.6 Изменение плотности и вязкости

Плотность и вязкость нефти значительно увеличиваются при испарении легких фракций нефти и при образовании эмульсий "вода в нефти". Также, плотность и вязкость нефти зависят от изменчивости температуры воды, что особенно важно при расчетах нефтяных разливов в арктических морях. Кроме того, технические характеристики дают плотность и вязкость нефти при 15-20 °С (или 60 °F). Таким образом, плотность и вязкость нефти увеличивается уже при попадании нефти на холодную поверхность воды или льда.

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; etc].

$$\rho = F_{em}\rho_w + \rho_o(1 - F_{em})(1 + c_{ev}F_{ev})[1 - c_T(T - T_o)] \quad (\text{П.31})$$

$$\mu = \mu_o \exp\left[a_T\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right]; \mu = \mu_o \exp[a_{ev}F_{ev}]; \mu = \mu_o \exp\left[\frac{a_1 F_{em}}{1 - a_2 F_{em}}\right], \quad (\text{П.32})$$

где ρ_o и μ_o – начальные плотность и вязкость нефти; ρ_w – плотность воды; T – температура воды; T_o – 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 [Нельсон-Смит, 1977], коэффициент $c_{ev}=0.14-0.25$. В статье [Belore and Buist, 1994] приводятся результаты анализа для 13 сортов сырой нефти. В результате коэффициент a_T изменяется в пределах от 1085 до 17838, коэффициент a_{ev} изменяется в пределах от 2.8 до 16.95.

Первые оценки характеристик аварийного сброса нефти могут быть получены из системы уравнений (П.2), (П.7) и интегрального баланса массы нефти M в разливе

$$\frac{dM}{dt} = Q_e + Q_d \quad (\text{П.33})$$

Эти уравнения легко решаются, но выходной продукцией при расчете являются переменные $\overline{X(t)}$, $A(t)$, $M(t)$.

6.4.7 Взаимодействие с берегом

Для расчета взаимодействия нефтяного загрязнения с берегом, вообще говоря, была разработана специальная модель COZOIL [Reed et al., 1989], в которой была предпринята попытка учесть вынос нефти на берег, впитывание в почву и частичный вынос обратно в море. Для реализации этой модели (или подобной) необходимо использовать расчетную сетку 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, либо используется вероятностный подход.

6.5 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В МОДЕЛИ SPILLMOD

Модель SPILLMOD описывает процессы физико-химической трансформации разлива нефти на поверхности моря. В основе математической постановки задачи лежат осредненные по вертикальной координате уравнения Навье-Стокса для тонкого слоя легкой жидкости на поверхности более тяжелого субстрата. Особенность постановки и реализации модели SPILLMOD заключается в том, что решение задачи ищется в области,

которая сама является искомой величиной. Приведем необходимые сведения об основных уравнениях модели и постановке задачи в целом.

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

$$h \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -hg' \nabla h - \beta |(\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c))| (\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c)) \quad (6.5.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h\mathbf{u}) = - \frac{Q_e + Q_{n_d} + Q_{ch_d} - Q_o + Q_{sc}}{\rho_o} \quad (6.5.2)$$

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, $g' = g(\rho_w - \rho_o)/\rho_o$ - 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 (6.5.1)-(6.5.2) должна быть дополнена следующими граничными условиями:

кинематическое:

$$L_1: R_t + \mathbf{u} \nabla R = 0, \quad (6.5.3)$$

где $R(t,x,y) = 0$ - уравнение свободной границы;

и динамическое условие:

$$L_1: h(x,y) = 0 \quad (6.5.4)$$

Соотношение (6.5.3) справедливо, когда перемещение границы обусловлено динамическими факторами. В некоторых случаях граница области может изменяться за счет удаления нефти с поверхности как под действием природных факторов – за счет испарения и диспергирования волнами, так и в ходе операций по борьбе с разливом нефти.

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

$$L_2: \mathbf{u}_n = 0, \quad (6.5.5)$$

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

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

Постановку задачи необходимо дополнить параметризациями потоков нефти с поверхности моря за счет различных процессов. Подобные параметризации приведены в разделе 6.4. Здесь обратим внимание, что параметрически описываются потоки с единицы поверхности нефтяного пятна, а общее количество нефти, удаленное из пятна в единицу времени, будет зависеть от величины потоков и площади пятна, от точности определения которой зависит результат.

При расчетах разлива нефти с учетом установки боновых заграждений граница $L=L_1(t,x,y) \cup L_2(x,y)$ области 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.

$$L_3: \mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{bn}, \quad (6.5.6)$$

$$L_3: Q_b = (1 - E_b) \rho h (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c - \mathbf{u}_b) \cdot \mathbf{n}, \quad (6.5.7)$$

где Q_b - поток нефти через бон, E_b - эффективность удержания нефти боном, зависящая от типа бона и гидрометеорологических условий, \mathbf{u}_b - скорость границы (бона), \mathbf{n} - единичный вектор нормали к элементу бона, \mathbf{u}_n - скорость движения нефти, нормальная к ближайшему участку бона.

При натуральных испытаниях эффективности бонов в различных гидрометеорологических условиях определяются специальные параметры: 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

$$E_b = \begin{cases} 1, (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} < u_{fl} \\ 1 - \frac{(\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} - u_{fl}}{u_{cl} - u_{fl}}, u_{fl} \leq (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} < u_{cl} \\ 0, (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} \geq u_{cl} \end{cases} \quad (6.5.8)$$

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

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 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 - той 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:

$$h_{i,j} = \frac{\rho_o}{\gamma \Delta x \Delta y} \sum_k^{N_{ij}} m_k \quad (6.5.6)$$

где γ - часть площади ячейки, занятая частицами, m_k - масса k -той частицы, N_{ij} - количество частиц в (i,j) -той ячейке $\Delta x, \Delta y$ - размер ячейки в по двум горизонтальным координатам, соответственно. В качестве метода восстановления скорости с частиц на сетку в SPILLMOD используется линейная регрессия, имеющая более высокий порядок точности в отличие от метода "ближайшего узла", использовавшийся в оригинальном методе PIC (Harlow, 1964).

После того как сеточные функции определены, полный вычислительный цикл может быть представлен как последовательность нескольких шагов. На первом шаге проводится расчет промежуточных значений \mathbf{u}_z и h_z в соответствии с уравнениями (1) и (2) 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, меняющихся из-за процессов выветривания или в ходе операции ЛАРН. В конце этого шага все характеристики среды полностью определены в лагранжевом представлении. Третий шаг представляет перенос всех свойств частиц через границы эйлеровой сетки и определение новых значений $h_{i,j}$ и $\mathbf{u}_{i,j}$, вообще говоря, на «эйлеровой» сетке, построенной с учетом новой конфигурации частиц. В конце этого шага характеристики объекта моделирования переносятся с лагранжевой сетки на эйлерову.

Важно отметить, что границы области, в которой ищется решение задачи, не фиксированные. При определенных условиях часть границы области, которая рассматривалась как контактная, может стать подвижной (свободной). Например, когда нефть отходит от берега под действием ветра. И, наоборот, кинематическое условие, реализующееся на подвижной границе, при подходе к берегу или бону трансформируется в условие непротекания. Это означает, что граничные условия в задаче определяются в ходе моделирования (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.

7 ЛИТЕРАТУРА

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.

Bao X., Zhang F. *Evaluation of NCEP–CFSR, NCEP–NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau // Journal of Climate.* 2013. Vol. 26. №. 1. P. 206-214.

Belore R., Buist I. *Sensitivity of oil fate model predictions to oil property inputs. // Proc. Of the 17th arctic and marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar, June 8-10, 1994, Vancouver, Canada.*

Blumberg A. F., Mellor G. L. *A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model //Three-dimensional coastal ocean models.* 1987. P. 1-16.

Bobra A.M., Fingas M.F. *The behaviour and fate of arctic oil spills. // Wat. Sci. Tech., 1986, Vol. 18, pp. 13-23.*

Bobra A.M., Fingas M.F. *The behaviour and fate of arctic oil spills. // Wat. Sci. Tech., 1986, Vol. 18, pp. 13-23.*

Castanedo S., Medina R., Losada I.J., Vidal C., Méndez F.J., Osorio A., Juanes J.A. *The Prestige oil spill in Cantabria (Bay of Biscay). Part I: Operational forecasting system for quick response, risk assessment, and protection of natural resources //Journal of Coastal Research.* 2006. – P. 1474-1489.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. *The ERA Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 2011. Vol. 137. №. 656. P. 553-597.

Delvigne G.A.L., Swinney C.E. *Natural dispersion of oil // Oil and Chemical Pollution.* 1988. 17. P. 281-310.

Dietrich D.E., Bowman M.J, Korotenko K.A., Bowman M. H. *Oil spill risk management. Modelling Gulf of Mexico Circulation and dispersion.* 2014, Scrivener Publishing. 216 p

Fay J. A. *Physical processes in the spread of oil on a water surface //International Oil Spill Conference. – American Petroleum Institute, 1971. Vol. 1971. №. 1. P. 463-467.*

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.*

- 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.*
- Fingas M.F., Hollebone B.P. *Review of behaviour of oil in freezing environments. // Marine Pollution Bull. 2003. Vol. 47. p. 333-340.*
- Haidvogel D.B., Arango H.G., Hedstrom K., Beckmann A., Malanotte-Rizzoli P., Shchepetkin A. F. *Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2000. Vol. 32. №. 3. P. 239-281.*
- Haidvogel D.B., Beckmann A. *Numerical ocean circulation modeling. // Series on Environmental Science and Management, Vol. 2. Imperial College Press, 1999. 318 p.*
- Japan Meteorological Agency. *JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis, Daily 3-Hourly and 6-Hourly Data. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2013.*
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Joseph, D. *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of the American meteorological Society. 1996. Vol. 77. №. 3. P. 437-471.*
- Klemas V. *Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills // Journal of Coastal Research. 2010. P. 789-797.*
- Korotenko K.A., Bowman M.J., Dietrich D.E., Bowman M.H. *Modeling 3-D Transport and Dispersal of Oil Plume Released During BP/Horizon Accident in the Gulf of Mexico in 2010 // Journal of Sustainable Energy Engineering. 2013. Vol. 1. №. 1. P. 85-104.*
- Large W.G., Yeager S.G. *The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // Climate Dynamics. 2009. Vol. 33. №. 2-3. P. 341-364.*
- Le Hénaff M., Kourafalou V.H., Paris C.B., Helgers J., Aman Z.M., Hogan P.J., Srinivasan A. *Surface evolution of the Deepwater Horizon oil spill patch: combined effects of circulation and wind-induced drift // Environmental science & technology. 2012. Vol. 46. №. 13. P. 7267-7273.*
- Lehr W., Jones R., Evans M., Simecek-Beatty D., Overstreet R. *Revisions of the ADIOS oil spill model // Environmental Modelling & Software. 2002. Vol. 17. №. 2. P. 191-199.*
- Liungman O., Mattsson J. *Scientific Documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references // Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 2011. 32 p.*
- 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.*

Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson S. *Oil spill processes and models* // Environment Canada Report No EE-8. Ottawa. Ontario. 1980.

Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson, S. *Oil spill processes and models* // Environment Canada Report No EE-8. Ottawa. Ontario. 1980.

Madec G. "NEMO ocean engine" (Draft edition r5171). Note du Pôle de modélisation // Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, 2014. No 27 ISSN No 1288-1619

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

NOAA. *ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills) user's manual*. // Seattle, Hazardous Materials Response and Assessment Division, NOAA. Prepared for the U.S. Coast Guard Research and Development Center, Groton Connecticut, 1994, 50p.

North E.W., Adams E.E., Schlag Z, Sherwood C.R., He R., Hyun K.H., Socolofsky S.A. *Simulating oil droplet dispersal from the Deepwater Horizon spill with a Lagrangian approach* // Geophys. Monogr. Ser. 2011. Vol. 195. P. 217-226.

Quiroga, F.O.B., Perez A.P. and 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.

Rasmussen D. *Oil spill modeling – a tool for cleanup operations*. // Proc. of Oil Spill Conf., American Petroleum Institute, 1985, pp 243-249.

Reed M. *The physical fates component of the natural resource damage assessment model system* // Oil and Chemical Pollution. 1989. 5. P. 99-123.

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.

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.

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.

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.

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, pp. 792-807.

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.*

Vos R.J. *Comparison of 5 oil weathering models // Werkdocument RIKZ/ZD/2005.011W. 49 p. (<http://edepot.wur.nl/174594>. 3.10.2015)*

Weisberg R.H., Zheng L., Liu Y. *Tracking subsurface oil in the aftermath of the Deepwater Horizon well blowout // In: Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise (Eds. Y. Liu, A. MacFadyen, Z.-G. Ji, and R. H. Weisberg) // Geophys. Monogr. Ser. 2011. 195, P. 205-215.*

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.*

Гумис В.Г., Вайниток А.П., Дерендяев А.Б., Зацепя 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.*

Дианский Н.А. *Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.*

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.*

Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Москвичев А.М., Солбаков В.В., Становой В.В. *К оценке области возможного обнаружения нефтяного загрязнения при прогнозировании распространения аварийных разливов нефти в море // Проблемы Арктики и Антарктики, 2014, 4(102), С. 61-70*

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. 2014. - № 4 (16). С.68-76.*

Иванов А.Ю., Ермошкин И.С., М. Фанг, М.-С. Хе, Кровотынцев В.А. *«Использование космической радиолокации для картографирования нефтяных загрязнений моря», Исследование Земли из космоса, 2005, № 5, с. 78-95*

- Измайлов В.В. Трансформация нефтяных пленок в системе океан–лед–атмосфера. Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана, т. 9, Л., Гидрометеиздат, 1988, – 145 с.
- Кулаков М.Ю., Макитас А.П., Шутилин С.В. AARI–IOCM – совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012, 2(92), С. 6-18.
- Мамаев А.Б., Нестерова М.П., Удовенко А.В. Об испарении нефтяных пленок с водной поверхности. // Водные ресурсы, 1991, № 3, с. 192–195.
- Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти // М.Химия, 2001, 577 стр.
- Нельсон-Смит А. Нефть и экология моря // Пер. с англ. под ред. Симонова А.И., М., Изд. "Прогресс", 1977 - 302 с.
- Овсиенко С.Н., Зацева С.Н., Ивченко А.А. Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Труды ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 248-271.
- Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. // Л.: Гидрометеиздат, 1986. 278 с.
- Попов С.К. Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // Метеорология и гидрология, 2004, № 5, С. 76-84.
- 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.
- Становой В.В., Лавренов И.В., Неелов И.А. Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // Проблемы Арктики и Антарктики, 2007, Вып. 77, С. 7-16
- Ткалин А.В. Испарение нефтяных углеводородов из пленок на гладкой поверхности моря. // Океанология, 1986, т. 26, вып. 4, с. 628–630.
- Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. // Л., Гидрометеиздат, 1980, - 319 с.