

*На правах рукописи*



ПЕРЕЖОГИН ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ПОЖАРНЫХ  
РИСКОВ НА ТЕРРИТОРИИ РАЗЛИВА НЕФТИ В АКВАТОРИИ  
МОРСКОГО ШЕЛЬФА  
(на примере нефтедобывающей платформы)**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная  
безопасность (нефтегазовая отрасль)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2019

Работа выполнена на кафедре «Пожарная и промышленная безопасность» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент  
**Хафизов Ильдар Фанилевич**

Официальные оппоненты:

**Ларионов Валерий Иванович**  
доктор технических наук, профессор  
ООО «Центр исследования  
экстремальных ситуаций» / первый  
заместитель генерального директора –  
директор по научной работе

**Гумеров Кабир Мухаметович**  
доктор технических наук, профессор  
ООО «Научно-исследовательский  
институт трубопроводного транспорта» /  
сектор надежности трубопроводных  
систем, заведующий сектором

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (г. Екатеринбург)

Защита состоится «29» марта 2019 года в 11.00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан « »

2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Абуталипова Елена Мидхатовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время в РФ ведется активная разработка нефтяных месторождений, расположенных на континентальном шельфе, и к 2030 г. объем добычи должен составить до 30 млн т. При этом, как правило, добыча осуществляется с помощью морских стационарных платформ (МСП), адаптированных к условиям со сложной ледовой обстановкой.

В силу специфики эксплуатации МСП особое значение приобретает обеспечение их пожарной безопасности. Обобщение результатов расследования аварий, произошедших на морских нефтедобывающих платформах, а также анализ типичных сценариев их протекания позволяют утверждать, что оценка рисков реализации подобных событий и разработка мероприятий по снижению их негативных последствий являются актуальными задачами при проектировании, строительстве и эксплуатации МСП.

Следует отметить, что оценку рисков необходимо проводить как в случае аварий, произошедших непосредственно на МСП, так и при авариях на соседних взрывопожароопасных объектах (например танкерах). Большинство аварийных ситуаций сопровождается разливом нефти и нефтепродуктов (далее – разлив), что влечет за собой их негативное развитие – взрывы, пожары, гибель людей и тяжелые последствия для экосистем.

В целях обеспечения эффективности управленческих решений, направленных на предупреждение и ликвидацию разливов, защиты населения и окружающей природной среды от их вредного воздействия, Правительством РФ введен в действие комплекс нормативных документов, регламентирующих требования, которые обязывают предприятия разрабатывать планы по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти (ПЛАРН).

Перспективным методом разработки ПЛАРН является, по нашему мнению, применение современных геоинформационных технологий (ГИС-технологий), которые позволяют осуществлять комплексный подход к оценке влияния различных факторов на особенности формирования, развития и завершения техногенных аварий в условиях функционирования сложных технологических систем.

### **Степень разработанности выбранной темы**

К моменту начала работы над диссертацией в российских и зарубежных научно-технических источниках присутствовало значительное количество публикаций о применении геоинформационных систем и технологий для оценки риска воздействия разливов на уязвимые технические объекты морской акватории. При этом отсутствовал общепринятый научно обоснованный подход к прогнозированию и ликвидации последствий аварийных разливов углеводородов. Такое состояние проблемы связано с тем, что наблюдалось заметное расхождение результатов количественной оценки рисков по методикам Ростехнадзора и МЧС, а математические модели, применяемые при прогнозировании последствий разливов в геоинформационной системе, описывают в большей степени миграцию пятна нефти по акватории и изменение его формы и размеров. Таким образом, методы моделирования аварийных разливов углеводородов в акватории морского шельфа и оценки их последствий для уязвимых объектов МСП в рамках ГИС-технологий были развиты весьма фрагментарно. В связи с этим дальнейшее изучение особенностей поведения нефти на водной поверхности для различных метеорологических сценариев аварийного разлива позволит углубить теоретические основы анализа возникающих при этом рисков и расширить функциональные возможности вновь создаваемых систем геоинформационного моделирования.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема работы и содержание исследований соответствуют **пунктам 3 и 6** области исследований, определяемой паспортом специальности 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль)»: «3. Научное обоснование принципов и способов обеспечения промышленной и пожарной безопасности на предприятиях промышленности, строительства и на транспорте» и «6. Исследование и разработка средств и методов, обеспечивающих снижение пожарной и промышленной опасности технологических процессов, предупреждения пожаров и аварий, тушения пожаров».

### **Цель и задачи работы**

Разработка структурно-методической системы, основанной на теории рисков, которая обеспечивает осуществление эффективных мероприятий по ликвидации

разливов нефти в акватории морского шельфа и корректное прогнозирование их последствий.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

1 Анализ статистических данных по авариям на морских нефтедобывающих объектах, сопровождающихся разливом и возможным возгоранием пожароопасных жидкостей, а также современных методов анализа рисков, прогнозирования и ликвидации их последствий.

2 Разработка системы оценки вероятности воздействия разлива нефти на уязвимые объекты в акватории МСП, основанной на геоинформационном моделировании.

3 Экспериментальные исследования изменения формы и параметров нефтяного пятна в зависимости от соотношения углеводородных фракций.

4 Разработка математической модели миграции нефти по водной поверхности, применимой в рамках ГИС-технологии для минимизации масштабов аварийных разливов, а также своевременной и эффективной ликвидации их последствий.

5 Разработка метода оценки пожарных рисков в акватории МСП, основанного на предложенной математической модели в рамках ГИС-технологии.

### **Научная новизна**

1 На основании математического моделирования процесса миграции компонентов системы «атмосферный слой – нефтяное пятно – морская поверхность» предложен и научно обоснован алгоритм прогнозирования развития аварийного разлива в акватории морского шельфа в соответствующей геоинформационной системе. Данный алгоритм позволяет оперативно прогнозировать направления миграции образующихся потоков адекватно складывающейся обстановке, места локализации взрывопожароопасных зон, оценивать значения рабочих параметров передвижения потоков, что обеспечивает в итоге возможность своевременного осуществления мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий возгорания углеводородов.

2 Выдвинута и научно обоснована идея о целесообразности введения поправочного коэффициента в уравнение Дж. Фэя для расчета площади растекания нефтяного пятна, позволяющего оценивать влияние концентрации отдельных фракций на характер растекания углеводородов и размеры образующегося разлива.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в создании алгоритма прогнозирования развития аварийного разлива в акватории морского шельфа в соответствующей геоинформационной системе на основе математического моделирования процесса миграции компонентов системы «атмосферный слой – нефтяное пятно – морская поверхность», позволяющего прогнозировать локализацию взрывопожароопасных зон в пределах рассматриваемой акватории, а также во введении поправочного коэффициента в формулу Дж. Фэя, в результате чего становится возможным проведение оценки влияния концентрации нефтяных фракций на характер растекания и размеры образующегося нефтяного пятна.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1 Предложенная математическая модель с программным обеспечением может применяться при разработке соответствующей проектной документации, составлении деклараций в сфере промышленной и пожарной безопасности и анализе рисков возможных аварий на МСП.

2 Результаты работы по оценке площади разлива пожароопасных жидкостей по водной поверхности используются в учебном процессе ФГБОУ ВО УГНТУ при выполнении курсовых работ по дисциплине «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности» направления 20.01.04 – «Техносферная безопасность» программы подготовки магистров «Системы пожарной безопасности в нефтегазовой отрасли» и отражены в учебно-методическом пособии «Разработка паспорта безопасности опасного производственного объекта».

## **Методология и методы исследований**

Методология выполнения работы заключалась в поэтапном проведении исследований, включающих анализ накопленных знаний в области оценки рисков на опасных производственных объектах и развитие на его основе инновационного метода оценки рисков на территории, прилегающей к МСП. Поставленные в работе задачи решались с применением методов математического анализа, численного моделирования, теории вероятностей, математической статистики и ГИС-технологий, а также с помощью разработанных автором алгоритмов и программных модулей.

## **Положения, выносимые на защиту**

1 Математическая модель процесса миграции компонентов системы «атмо-

сферный слой – нефтяное пятно – морская поверхность», позволяющая в рамках ГИС-технологии прогнозировать локализацию взрывопожароопасных зон в пределах рассматриваемой акватории.

2 Метод комплексной оценки рисков в акватории МСП, основанный на предложенной математической модели в рамках ГИС-технологии.

3 Аналитические решения уравнения расчета площади растекания нефтяного пятна по водной поверхности вблизи МСП.

4 Результаты экспериментальных исследований площади разлива нефти на водной поверхности при аварийных ситуациях на МСП. Поправочные коэффициенты для различного состава углеводородных фракций, вводимые в формулу расчета площади разлива углеводородов по водной поверхности.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы обеспечивалась путем применения широко апробированных методов и методик экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Основные положения и результаты работы докладывались на всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2016); IX-й междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2016» (Уфа, 2016); всеросс. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы и современные технологии обеспечения пожарной, экологической и промышленной безопасности» (Стерлитамак, 2017); заседании кафедры «Техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (Тюмень, 2018); заседаниях научно-технической секции «Пожарная и промышленная безопасность» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Уфа, 2018).

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 научных трудах, в том числе 4 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографического списка использованной литературы, включающего 150 наименований. Работа изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 29 рисунков, 46 таблиц, 2 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследований, приведены научная новизна и практическая значимость результатов работы.

**Первая глава** посвящена анализу научно-технической литературы по проблемам эксплуатации МСП, включая наиболее опасные варианты развития аварийных ситуаций, сопровождающихся разливом нефти в их акватории, а также методы обеспечения безопасности МСП.

Так, в работах М.В. Лисанова, В.П. Молчанова и В.С. Сафонова разработаны риск-ориентированные подходы в надзорной деятельности, проведено методическое совершенствование анализа рисков, рассматриваются вопросы экспертизы промышленной безопасности. Работы А.А. Александрова, В.А. Котляревского, В.И. Ларионова и С.И. Сущева посвящены созданию методических подходов к оценке возможного ущерба и рисков для человека и объектов техносферы в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. Р.М. Тагиевым, Ю.Н. Шебеко, С.А. Швырковым ведутся исследования по обеспечению пожарной безопасности сложных и опасных промышленных объектов, включая морские стационарные платформы для добычи нефти и газа на шельфе арктических морей. В.Ч. Реуттом внесен существенный вклад в разработку средств, приёмов и способов тушения пожаров.

Отмечается, что среди причин аварийности и травматизма при эксплуатации МСП 70 % занимают организационные недоработки, а около 50 % мероприятий, рекомендованных комиссиями по результатам инспекций, касаются совершенствования систем управления промышленной безопасностью и охраной труда на взрывопожароопасном объекте.

Значительное количество аварий на буровых платформах приходится на ситуации, связанные со столкновениями с другими техническими объектами (21,5 %),



утечками и выбросом опасных веществ (15 %), потерей контроля над скважинами (7,5–8,5 %), авариями системы налива при перегрузке нефти и нефтепродуктов с платформы на танкер и обратно (6,5–7,0 %), авариями якорных систем (4,5 %), пожарами (4,0 %), а также резким изменением погодных условий.

В настоящее время отсутствует единый общепринятый подход к прогнозированию и ликвидации последствий аварийных разливов, поскольку имеет место существенное расхождение результатов расчетов рисков по методикам Ростехнадзора РФ и МЧС. Вместе с тем, действующие руководящие документы Ростехнадзора рекомендуют использовать отдельные фрагменты методики МЧС для анализа последствий ряда пожарных сценариев при авариях на морских нефтедобывающих объектах.

Чрезвычайные ситуации, сопровождающиеся разливом пожароопасных жидкостей в морских условиях, всегда развиваются непредсказуемо во времени и пространстве, поэтому для обеспечения своевременного принятия управленческих решений, направленных на их предупреждение и ликвидацию, необходимы эффективные методы, позволяющие отслеживать происходящие события в онлайн-режиме.

Современным трендом в области оценки разлива нефти в морских акваториях и прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций является применение методов математического моделирования с привлечением ГИС-технологий. Такой подход позволяет не только повысить научную обоснованность и точность прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций на территории МСП, но и существенно увеличить достоверность получаемой в ходе моделирования информации.

Во **второй главе** изложен подход к созданию структурно-методической системы оценки вероятности воздействия разлива нефти на уязвимые объекты в акватории МСП, основанный на геоинформационном моделировании.

Практика расследования сценариев аварийных разливов показала необходимость проведения вероятностных оценок их возможного воздействия на близлежащие уязвимые объекты с одновременным моделированием сценариев распространения и возгорания нефти в акватории МСП при различных гидрометеорологических условиях.

Случайный характер сценария аварии, связанной с разливом и возможным возгоранием нефти в море, обуславливает необходимость определения зон их по-

тенциального воздействия, внутри которых могут находиться уязвимые объекты. Зона потенциального воздействия разливов зависит от масштабов и сценария техногенной аварии, а также от характерных или складывающихся гидрометеорологических условий.

В связи с этим для оценки масштабов аварий, сопровождающихся разливом нефти в акватории, необходимо проводить анализ риска аварий, основу которого составляет определение вероятности и последствий нежелательных событий на фоне всех возможных гидрометеорологических ситуаций.

Для обеспечения оперативного прогнозирования последствий аварийных разливов в рамках геоинформационной системы (ГИС) разработан расчетно-аналитический метод, который основан на вероятностных закономерностях, описывающих воздействие поражающих факторов на уязвимые объекты – основные объекты в акватории (МСП, танкеры, нефтеналивные суда и др.) и элементы риска (нефтепроводы и танки для хранения нефти):

- вероятность воздействия разлива на уязвимые объекты определяется местом и площадью перекрытия областей расположения этих объектов и нефтяного пятна в динамике в определенном интервале времени;

- вероятность воздействия разлива на уязвимые объекты для разных метеорологических сценариев оценивается временем, в течение которого пятно нефти находится в области расположения уязвимых объектов.

Прогнозирование последствий аварийного разлива может быть осуществлено с использованием моделей воздействия и законов поражения, являющихся основными составляющими, из которых с помощью процедур сопряжения на основе ГИС- технологий получают требуемые прогнозы и показатели риска.

Предлагаемый расчетно-аналитический метод включает четыре типа моделей воздействия:

- модель воздействия 1-го типа основана на факте свершившегося события (чрезвычайной ситуации) и используется для организации оперативного реагирования, а также при проведении заблаговременных расчетов по ожидаемым последствиям и оценке рисков. Характерные параметры этой модели – координаты центра очага, интенсивность или мощность воздействия и время;

- модель воздействия 2-го типа задана функцией распределения плотности вероятности случайной величины. В качестве случайных величин рассматриваются параметры поражающих факторов, вызывающих основные разрушения;

- модель воздействия 3-го типа определена функцией распределения случайной величины, характерной для рассматриваемой чрезвычайной ситуации;

- модель воздействия 4-го типа (обобщенная модель) строится на основе статистической обработки материалов наблюдений и эмпирических данных. Обычно эти модели приводятся в виде таблиц и карт (например опасность наводнений, сильных ветров, течений).

В случае распространения ожидаемых полей опасности при авариях с образованием топливовоздушных смесей масштабы определяются с учетом возможного дрейфа облаков и для построения функции распределения плотности вероятности поражающих факторов используем следующий алгоритм:

- определение повторяемости различных скоростей ветра на основе статистических данных;

- разбиение территории объекта на элементарные площадки размером  $\Delta x \times \Delta y$ , которые представляют точкой в центре с координатами  $x, y$ ;

- расчет поражающего фактора (доза облучения, токсодоза, избыточное давление в воздушной ударной волне) для фиксированного направления ветра и его минимальной скорости в рассматриваемой точке;

- определение значений поражающих факторов и их частоты до момента завершения расчетов для всех возможных скоростей ветра в рассматриваемом направлении;

- умножение полученных значений частот на повторяемость заданного направления и определение следующего шага по направлению ветра;

- вычисление значений поражающего факторов и их частоты в соответствии с предыдущими пунктами по всем возможным направлениям;

- построение гистограммы на основе полученной выборки, включающей значения поражающего факторов и частоты их появления;

- расчет функции распределения плотности вероятности поражающего фактора для точки с координатами  $x, y$  на основе гистограммы.

Модели воздействия 2-го и 3-го типа используются для проведения заблаговременных расчетов по прогнозированию обстановки в чрезвычайной ситуации и оценке рисков.

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма реализации прогноза развития аварийного разлива нефти в ГИС.

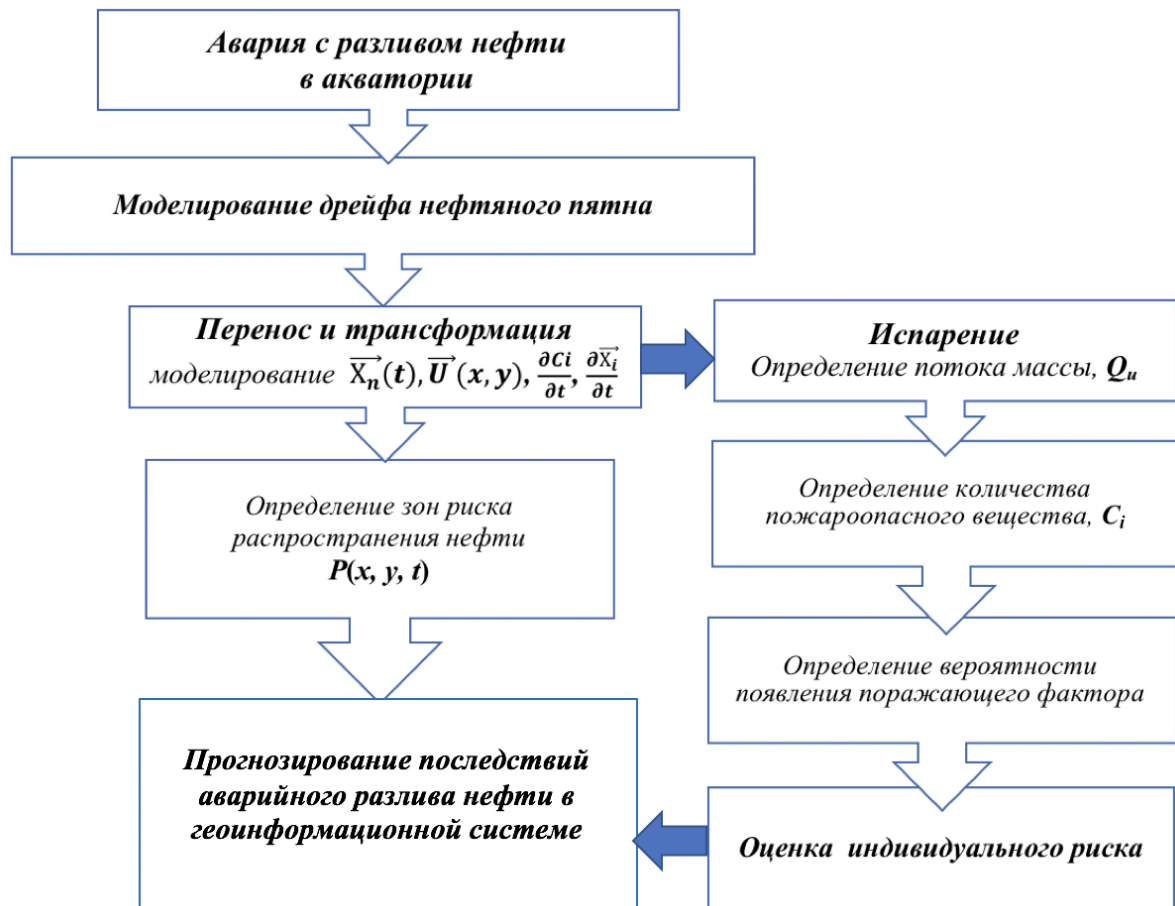


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма прогнозирования развития аварийного разлива в акватории морского шельфа в ГИС

Основой моделирования конфигурации и перемещения разлива взрывопожароопасных нефтепродуктов в ГИС, а также прогнозирования зон потенциального воздействия являются математические модели и информационная база.

Математическая модель эволюции нефтяного разлива в системе «атмосферный слой – нефтяное пятно – морская поверхность» содержит гидродинамическую модель, модель расчета траектории перемещения нефтяного пятна, модели, отвечающие за процессы, происходящие с нефтью при попадании в водную среду, – перенос, растекание, испарение, эмульгирование и диспергирование.

Информационная база моделирования состоит из топоосновы, организованной в виде слоев ГИС, ячеечной модели течений, содержащей результаты метеорологических условий в акватории разлива, и входных параметров моделирования. Топооснова служит базой визуализации результатов математического моделирования и пространственного анализа физико-химической трансформации углеводородов в акватории разлива.

В связи с тем, что недостаток сведений об изменении свойств нефти в воде приводит к тактическим ошибкам при ликвидации аварий, были проведены экспериментальные исследования по уточнению их влияния на масштабы разлива.

Исследованы параметры разлива дизельного топлива зимнего, керосина ТС-1 и нефтей различных марок (тюменская, туймазинская, арланская) по своему составу и свойствам, близким к нефти, добываемой на арктическом шельфе.

На основании сопоставления результатов исследований разлива рассматриваемых нефтепродуктов и модельных смесей получены поправочные коэффициенты для расчета площади углеводородов, разлитых по водной поверхности (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований разлива модельных смесей

Состав модельной смеси «нафтенy (H): парафины (П): ароматика (А)», % об.	Площадь разлива (модель), см <sup>2</sup>	Площадь разлива (расчет), см <sup>2</sup>	Коэффициент разлива, $f$	Поправочный коэффициент, $f_{\text{пол}}$
5 : 50 : 45	66,44	72,21	$f = \frac{0,902 \cdot H - 0,067 \cdot \text{П} + 0,179 \cdot \text{А}}{0,003}$	0,92
10 : 45 : 45	103,80	81,70	$f = \frac{2,267 \cdot H - 0,8782 \cdot \text{П} + 1,0208 \cdot \text{А}}{0,003}$	1,26
15 : 45 : 40	213,70	169,60		
20 : 40 : 40	268,70	213,25		
25 : 40 : 35	314,00	259,50	$f = \frac{1,2123 \cdot H - 0,5433 \cdot \text{П} + 0,1218 \cdot \text{А}}{0,003}$	1,20
30 : 35 : 35	340,00	280,99		
35 : 35 : 30	376,00	310,74		
40 : 30 : 30	392,00	323,96		
50 : 25 : 25	460,00	400,00	$f = \frac{1,155 \cdot H - 0,495 \cdot \text{П} + 0,495 \cdot \text{А}}{0,003}$	1,15
55 : 25 : 20	551,20	479,30		
60 : 20 : 20	572,20	497,56		

Полученные поправочные коэффициенты для расчета площади разлива нефтепродуктов с различным содержанием углеводородных фракций, а также предложенный подход к оценке их распространения по водной поверхности позволяют определить действительную площадь разлива и тем самым, с более высокой точностью, спрогнозировать зоны потенциального воздействия аварии на уязвимые объекты на основе ГИС-моделирования.

В **третьей главе** проведено математическое моделирование миграции нефтяного разлива с учетом влияния свойств углеводородов, гидродинамических параметров и условий окружающей среды.

При моделировании миграции аварийного разлива рассмотрены перенос и трансформация нефтяного пятна, которые происходят в результате протекания взаимосвязанных физико-химических процессов и зависят от свойств нефти, гидродинамических параметров и условий окружающей среды (рисунок 2). В расчетах учтено изменение фракционного состава, физико-химических свойств нефти, ее характеристик (плотности, содержания воды, вязкости), а также перемещение компонентов системы «атмосферный слой – нефтяное пятно – морская поверхность» между различными средами (морской водой и атмосферой).

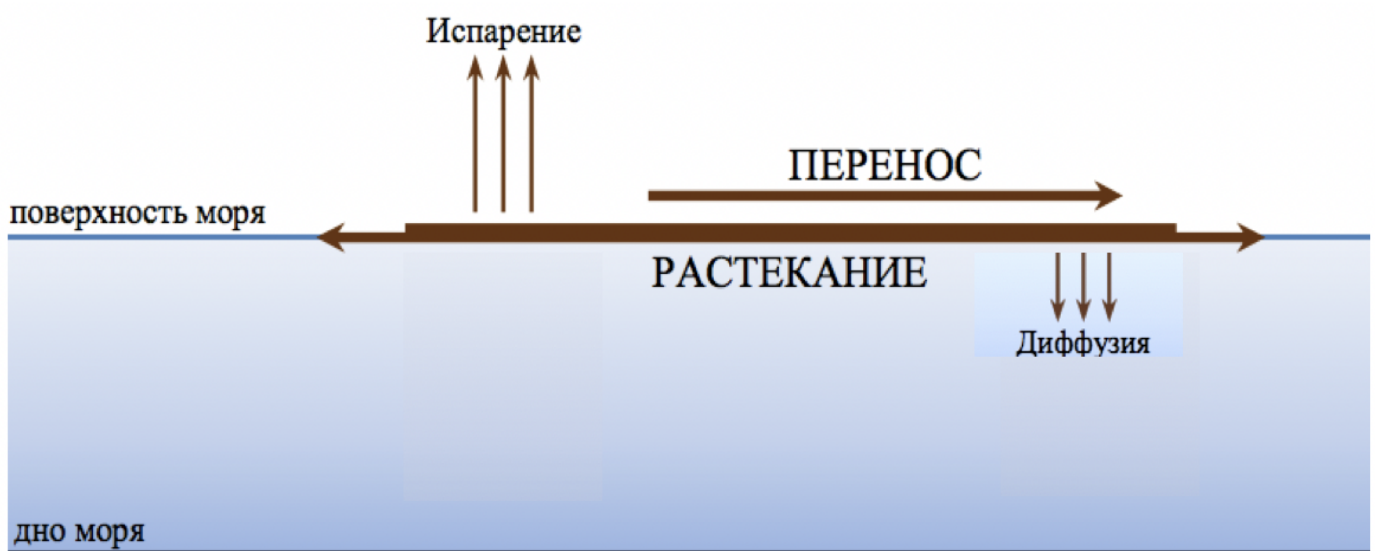


Рисунок 2 – Основные процессы при миграции нефтяного разлива в акватории МСП

Для определения положения и конфигурации нефтяного разлива использован лагранжево-эйлеровый метод, имитирующий миграцию пятна нефти или его отдельных фрагментов по поверхности моря под действием ветра, течений, волн и турбулентной диффузии, которая приводит к дальнейшему росту площади загрязнения после прекращения разлива. Турбулентная диффузия нефтяных загрязнений обусловлена испарением, растворением нефти и биодegradацией, в ходе нее происходит изменение химического состава пленки, ее диспергирование. В случае консервативной нефтяной пленки имеет место горизонтальная диффузия, а для нефти в диспергированном состоянии характерна трехмерная диффузия.

Метод заключается в дискретном представлении среды в виде набора лагранжевых элементов, использовании эйлеровых расчетных сеток для описания полей и расщеплении вычислительного цикла на процессы переноса и изменения состояния среды.

Рассмотрены  $i$ -ые фрагменты, каждый из которых имеет набор параметров: координаты, площадь, плотность и вязкость нефти, число фракций нефти на поверхности воды, количество испарившейся нефти и т.д. Все параметры зависят от времени нахождения фрагментов на поверхности воды. При этом учтено влияние пространственно-временной неоднородности гидрометеорологических полей на перенос и трансформацию фрагментов.

Конфигурацию фрагмента нефтяного разлива в произвольный момент времени и распределение толщины нефти в пятне определяли интегрированием по вертикальной координате уравнений гидродинамики в областях с произвольной геометрией контактных границ.

Для сценария аварийного разлива углеводородов в акватории МСП моделирование проводили в три этапа:

- рассчитываем траектории перемещения по поверхности моря одномоментных или залповых сбросов нефти в результате совокупного действия ветра и течений в соответствии с уравнениями (1) и (2) (таблица 2), пренебрегая эффектами, связанными с движением среды (на этом этапе все характеристики среды известны в эйлеровом представлении);

Таблица 2 – Этапы моделирования аварийного разлива углеводородов в акватории МСП

<b>Этап 1 - Подготовка исходных данных</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Картографическая и семантическая информация</li> <li>2. Дата, время, место и динамика разлива</li> <li>3. Тип углеводорода</li> <li>4. Метеорологическая ситуация на весь период</li> <li>5. Навигационно-гидрологические характеристики территории</li> <li>6. Положение средств локализации аварии</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пространственные координаты разлива <math>\{x_i, y_i\}</math></li> <li>2. Время <math>t</math>, скорость <math>\{u_i, v_i\}</math>, масса <math>\{m_i\}</math></li> <li>3. Объем разлившейся нефти <math>V</math></li> <li>4. Фракционный состав <math>\{c_i^k\}</math>, <math>c_i^k</math> - концентрация <math>k</math>-ой фракции, плотность нефти, кинематическая вязкость, температура застывания нефти <math>T_3</math>, температура вспышки <math>T_{вс}</math></li> </ol>
<b>Этап 2 - Моделирование конфигурации нефтяного разлива в акватории</b>	
<p style="text-align: center;"><b>ПЕРЕНОС</b></p> <p>Перенос <math>i</math>-того нефтяного пятна по поверхности</p> $\vec{X}_n(t) = \vec{X}_i + \Delta t \sum_{i=1}^n \vec{U}_i(\vec{X}_i, t_i), \quad t_i = i \cdot \Delta t \quad (1)$ <p>Скорость переноса <math>U</math> нефтяных пятен по поверхности</p> $U = U_w + U_c + U_s + U_{se}, \quad (2)$ $\partial \vec{X}_i / \partial t = 0,03 \cdot \vec{U}_{0i} + \vec{U}_{ci} + \vec{U}_{si} + \vec{U}_{sei}. \quad (3)$ <p>Скорость дрейфа пятна нефти <math>U_w</math>, задаваемая скоростью ветра <math>U_0</math></p> $U_w = (\rho_a / \rho_w)^{1/2} \cdot U_0 = 0,03 \cdot U_0. \quad (4)$ <p>Скорость волнового дрейфа</p> $U_s = a^2 \cdot k \cdot \omega.$ <p>Эмпирическая зависимость скорости волнового дрейфа</p> $\vec{U}_{se} = \vec{U}_s + 0,445 \cdot \zeta \cdot \vec{C}_w.$ <p><math>c_w</math> - фазовая скорость волны, <math>a</math> - амплитуда волны, <math>k</math> - волновое число, <math>\omega</math> - частота волны</p> <p>Средняя скорость переноса нефтяного пятна</p> $\vec{U}(x, y) = a_w \cdot \vec{U}_w(x, y) + a_c \cdot \vec{U}_c(x, y). \quad (5)$	<p style="text-align: center;"><b>ТРАНСФОРМАЦИЯ</b></p> <p>Траектория движения дискретных лагранжевых частиц <math>\vec{X}_i</math> разлива нефти</p> $\partial \vec{X}_i / \partial t = \vec{U}(X_i, Y_i) + \vec{U}_d(X_i, Y_i). \quad (6)$ <p>Положение <math>i</math>-той лагранжевой частицы в момент времени <math>t_{n+1} = t_n + \Delta t</math></p> $X^{n+1} = X^n + u^{n+1} \cdot \Delta t + r_h \cos \theta, \quad (7)$ $Y^{n+1} = Y^n + v^{n+1} \cdot \Delta t + r_h \sin \theta. \quad (8)$ <p>Полуэмпирическое уравнение переноса <math>\vec{U}</math> и турбулентной диффузии <math>\vec{U}_d</math> (динамика разлива нефти)</p> $\partial C_i / \partial t = -\nabla[(\vec{U} + \vec{U}_d)C_i] + \sum_q F_q(C, k_q) \pm \sum_p n_p, \quad (9)$ <p>где <math>F_q</math> - функции, описывающие трансформацию нефтяного пятна, испарение, диспергирование, растворение и т.д.</p> $DC_i/Dt = \partial C_i / \partial t + \nabla[(\vec{U} + \vec{U}_d)C_i] = (C_i^{n+1} - C_i^n) / \Delta t. \quad (10)$ <p>Поверхностная концентрация углеводородов <math>C_i^{n+1}</math> в момент времени <math>t_{n+1} = t_n + \Delta t</math>.</p> $C_i^{n+1} = C_i^n + [\sum_q F_q(C, k_q) \pm \sum_p n_p] \Delta t \quad (11)$



Таблица 2 – Этапы моделирования аварийного разлива углеводородов в акватории МСП (продолжение)

<p><b>Этап 3 - Моделирование процессов распространения углеводородов при аварийном разливе</b></p>
<p>Математическая модель переноса, деструкции и растворения углеводородов</p> <p>Распространение <math>i</math>-того фрагмента фракции нефти с концентрацией <math>C_i</math> под влиянием ветра, течений и турбулентной диффузии с учетом <math>j</math>-той физико-химической реакции <math>R_j</math></p> $\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} - K_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - K_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} - K_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + F(C_i, R_j) = 0 \quad (12)$ <ol style="list-style-type: none"> <li>Мгновенный выброс нефти в точке <math>(x_0, y_0, z_0)</math> средней поверхностной плотностью <math>i</math>-той фракции нефтяного пятна <math>Q_i</math> <math display="block">C_i(x, y, 0) = Q_i \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)</math> </li> <li>Поверхностная плотность <math>i</math>-той фракции нефтяного пятна на части водной поверхности <math>S_i</math> <math display="block">C_i(x, y) = \begin{cases} Q_i, &amp; (x, y) \in S_i \\ 0, &amp; (x, y) \notin S_i \end{cases}</math> </li> </ol> <p>При достижении границы <math>\Sigma_1</math> в зависимости от физико-химических свойств нефти <math>\left. \frac{\partial C_i}{\partial n} \right _{\Sigma_1} = p C_i</math>. Для свободной водной границы <math>C_i(x, y, z, t) \Big _{\Sigma_2} = 0</math>.</p> $\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - K_{1x} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_{1y} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_D^{(W)} X_i S_i M_i^{(m)} = 0, \quad i = 1, \quad i = 2;$ $\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} - K_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - K_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} = 0, \quad i = 3, \quad C_i \Big _{i=0, (x,y) \in S_0} = C_{0i}, \quad C_i \Big _{i=0, (x,y) \notin S_0} = 0.$ <p>где <math>\frac{K_x X_i P}{RT} M_i^{(m)}</math> описывает уменьшение нефти только за счет испарения; <math>X_i</math> – молярная доля компонента с номером <math>i</math>, равная <math>\frac{M_i}{\sum M_i}</math>; <math>K_E</math> – коэффициент массопереноса.</p> <p>Геометрические характеристики пятна нефти (толщина <math>h</math> и площадь <math>S(t)</math>)</p> $h_{i,j} = \frac{\rho_0}{\gamma \cdot \Delta x \Delta y} \sum_k^{N_{i,j}} m_k, \quad \frac{\partial S}{\partial t} = f_{\Pi} \cdot S(t)^{1/3} \cdot h_i. \quad (13)$ <p>Характеристики аварийного разлива нефти получают из уравнений (1) и (13) и интегрального баланса массы нефти <math>M</math> в разлив</p> $\frac{dM}{dt} = Q_{\Pi} + Q_d, \quad \text{где } Q_u - \text{поток массы при испарении, кг/с; } Q_d - \text{поток массы при диспергировании, кг/с.}$

- задаем параметры выветривания для каждого из элементарных разливов (3)–(5) в соответствии с гидрометеорологическими условиями, определенными по полям метеорологических параметров и траекториям распространения разливов (в конце данного этапа все характеристики среды полностью определены в лагранжевом представлении);

- проводим сборку сценария распространения продолжительного разлива из ансамбля траекторий перемещения элементарных разливов нефти с учетом соответствующих изменений ее физико-химических характеристик и определяем новые значения  $u_{ij}$  и  $h_{ij}$  из уравнений (6)–(8), (13) (в конце этого этапа характеристики объекта моделирования переносятся с лагранжевой сетки на эйлерову).

Полученные результаты представляются в ГИС на карте района аварии в виде последовательных конфигураций нефтяного пятна (рисунок 3), дрейфующего облака в графическом и текстовом видах. В рамках сценария миграции нефти рассчитывают последовательные положения разлива, обусловленные переносом нефти по поверхности моря; количество нефти, испарившейся в атмосферу и диспергировавшейся в воду; геометрические параметры (площадь, толщина, линейные размеры); изменение физико-химических характеристик нефти (плотность, вязкость), определяемых по уравнениям (12) и (13) (таблица 2).

Для определения площади нефтяного пятна используются полуэмпирические зависимости Дж. Фэя для инерционной, гравитационно-вязкой фазы и фазы поверхностного натяжения процесса растекания. С учетом поправочных коэффициентов (таблица 1) зависимость площади пленки нефти от времени для различных режимов растекания по водной поверхности имеет следующий вид (таблица 3).

Данные зависимости удобны в программировании и позволяют в кратчайшие сроки рассчитать конфигурацию, распределение толщин и последовательные положения нефтяного пятна в ГИС для областей со сложными географическими и навигационно-гидрологическими характеристиками территории. Итоговая траектория миграции нефтяного разлива в конкретном метеорологическом сценарии будет зависеть от настройки ветрового коэффициента и угла поворота скорости дрейфового течения для выбранной ГИС-модели гидротермодинамики океана и приводного слоя.

Таблица 3 – Параметризация нефтяного разлива

Режим	Длительность фазы	Радиус пятна	Параметры
Инерционный	$[0; t_1]$ $t_1 = 2.6173 \cdot V^{1/3} \cdot \left( \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_w} \right) \cdot g \right)^{1/3} \cdot \nu^{1/2}$	$R(t) = k_u \left( g \cdot V \left( \frac{\rho_w - \rho_n}{\rho_w} \right) \cdot t^2 \right)^{1/4}$ $k_u = 1,14$	$\frac{\partial S}{\partial t} = f_i \cdot S(t)^{1/3} \cdot h_1(t)^{4/3}$ $h_1 = \nu \cdot t^{0,5}$
Гравитационно-вязкий	$[t_1; t_2]$ $t_2 = \frac{1.02 \cdot V^{2/3} \cdot \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_w} \right)^{1/3} \cdot \nu^{1/3} \cdot \rho_w}{\sigma}$	$R(t) = k_v \left( g \cdot V^2 \left( \frac{\rho_w - \rho_n}{\rho_w} \right) \cdot t^2 \cdot \frac{1}{\nu^{1/2}} \right)^{1/4}$ $k_v = 1,45$	$\frac{\partial S}{\partial t} = f_{iv} \cdot S(t)^{1/3} \cdot h_2(t)^{4/3}$ $h_2 = \left( \frac{\sigma}{g \cdot \Delta \cdot \rho_w} \right)^{1/2}$
Поверхностного натяжения	$[t_3 = t_2]$ $t_2 = \frac{1.02 \cdot V^{2/3} \cdot \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_w} \right)^{1/3} \cdot \nu^{1/3} \cdot \rho_w}{\sigma}$	$R(t) = k_n \left( \sigma^2 \cdot t^2 \cdot \frac{1}{\rho \cdot \nu} \right)^{1/4}$ $k_n = 2,30$	$S_{\max} = \pi \cdot R_{\max}^2 = f_{in} \cdot 10^5 \cdot V^{0,75}$ $\sigma = \sigma_{ВВ} - \sigma_{ВН} - \sigma_{НВ}$

\*  $(\rho_w - \rho_n)/\rho_n$  – относительная разность плотностей воды и нефти, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $V$  – объем нефти, м<sup>3</sup>;  $t$  – время с момента разлива нефти, с;  $t_1$  – момент перехода от инерционного до гравитационно-вязкого режима, с;  $t_2$  – момент перехода от гравитационно-вязкого до режима поверхностного натяжения, с;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воды, м<sup>2</sup>/с;  $k_u, k_v, k_n$  – константы для инерционного, гравитационно-вязкого и режима поверхностного натяжения.

В четвертой главе представлен пример возможной реализации методологии оценки пожарных рисков на конкретном нефтяном объекте.

Интегральная оценка риска воздействия аварийного разлива углеводородов в морской акватории включает определение зон риска их распространения, вероятности появления поражающего фактора пожара, оценку индивидуального риска.

В результате расчета миграции нефти для ансамбля метеорологических сценариев определяются частоты достижения участков морской акватории разливом. При попадании разлива средней толщины выше некоторой заданной величины на участок акватории (в ячейку сетки с индексами  $i, j$ ) регистрируется время достижения  $T_{ij}^k$ , где  $k$  – номер метеорологического сценария.

Поле минимального времени достижения точек акватории, соответствующее контурам областей, за пределы которых разлив не выйдет в заданные промежутки времени после аварии, определяется выражением

$$T_a(x, y) = \min \{T_{ij}^k\}.$$

Оценку вероятности воздействия разлива нефти в области акватории с координатами центра  $\{x, y\}$  определяем как

$$P_{xy} = n/N,$$

где  $N$  – число рассмотренных метеорологических сценариев;  $n$  – общее число регистрируемых событий в ячейке.

Экстремальные зоны риска определяются совокупностью областей акватории  $\delta S(t_m)$ ,  $m = \{1, 2, 3, \dots\}$ , для которых выполняется условие

$$P(x, y, t_m) > t_0.$$

Одним из важных этапов оценки риска аварий на подобных объектах является определение количества опасного вещества, способного участвовать в образовании взрывоопасной смеси. Решение данной задачи опирается на значения количественных характеристик процесса испарения со свободной поверхности, полученные в результате моделирования распространения нефти, в результате которого для отдельно взятого метеорологического сценария определяется внутриводная концентрация диспергированной или растворенной нефти  $C^k(x, y, z)$  ( $k$  – номер метеорологического сценария).

Для проведения анализа риска территория вокруг МСП разбивается на элементарные площадки и для каждой из них подготавливаются исходные данные – характеристики площадки и размещения людей. Каждая ячейка матрицы представляется в виде площадки с размерами  $(5 \times 5)$  м. При оценке вероятностей и интенсивностей поражающих факторов шаг по дрейфу облака принимают равным 25 м. Далее проводится расчет потенциального территориального риска – интегрального показателя, включающего вероятность наступления нежелательного события, и комплексного индивидуального риска  $R_e$ .

Таким образом, оценка индивидуального риска на нефтедобывающей платформе определяется как

$$R_e = \frac{H}{N_0} \iint_S \int_0^{2\pi} \int_0^{L_{\max}} P[\Delta P(x, y)] \Psi(x, y) f(L) \varphi(V) dL dV dx dy,$$

где  $H$  – частота взрывного горения за год;  $N_0$  – количество людей в зоне риска;  $S$  – площадь территории,  $m^2$ ;  $L_{\max}$  – максимальное расстояние дрейфа облака, м;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $P(x, y)$  – вероятность летального исхода в точке  $(x, y)$ ;  $\Psi(x, y)$  – плотность распределения людей на площадке с координатами  $(x, y)$ ;  $f(L)$  и  $\varphi(V)$  – функции плотности распределения дрейфа облака и повторяемости направлений ветра за год соответственно.

Конкретный пример возможной реализации аварийного разлива нефти объемом 500 т в акватории МЛСП «Приразломная» в ГИС представлен на рисунке 3.

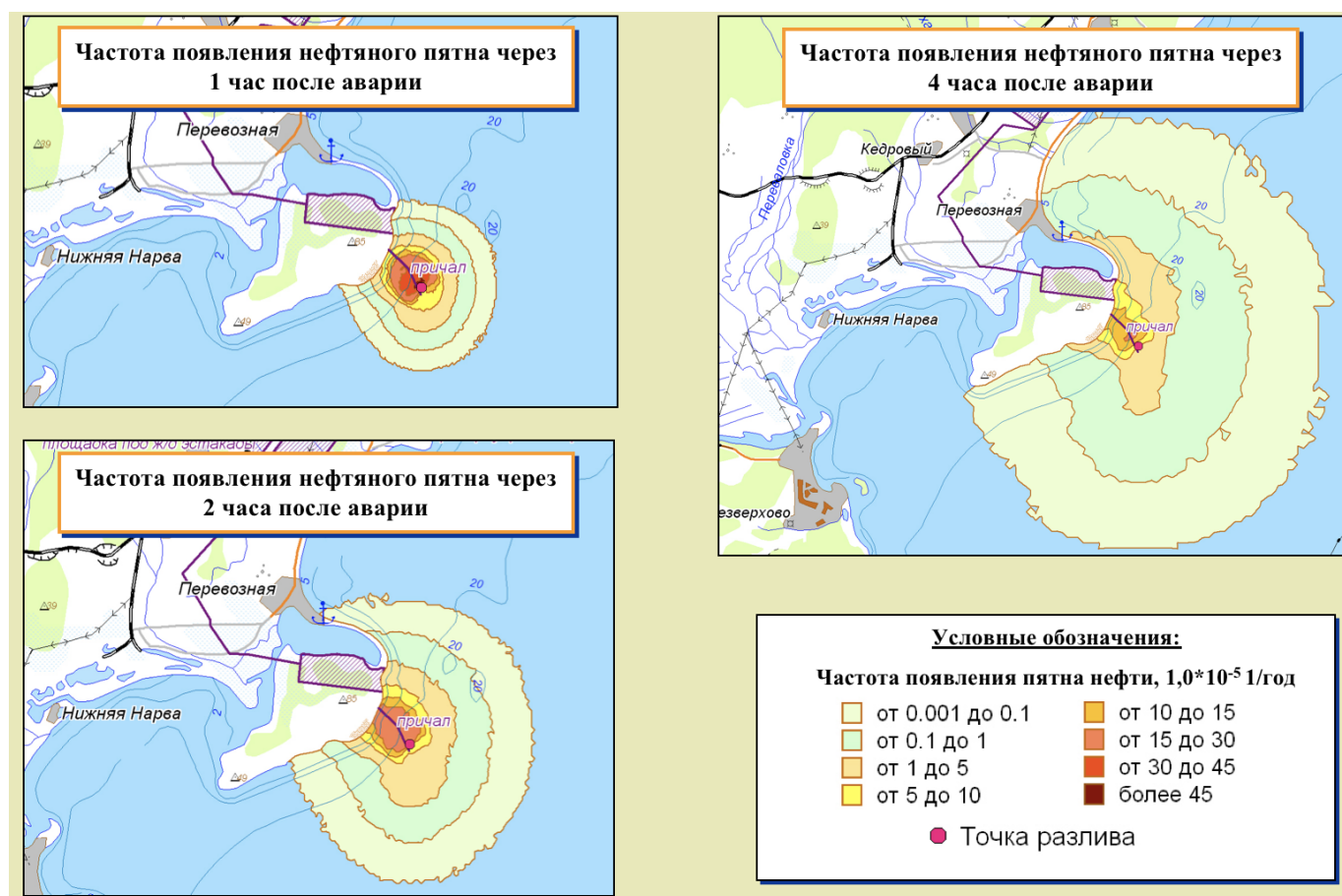


Рисунок 3 – Реализация аварийного разлива нефти объемом 500 т в акватории МЛСП «Приразломная» в ГИС

Обобщенные результаты расчета последствий и средств локализации данного возможного аварийного разлива следующие:

1 Площадь разлива с учетом поправочного коэффициента ( $f_{\text{поп}} = 1,2$ ) составляет  $65338 \text{ м}^2$ .

2 Параметры основных поражающих факторов в случае пожара на месте разлива:

- средняя поверхностная плотность теплового излучения пламени –  $25 \text{ кВт/м}^2$ ;
- безопасное расстояние для человека при воздействии теплового излучения ( $1,4 \text{ кВт/м}^2$ ) – 506 м от геометрического центра разлива.

3 Параметры основных поражающих факторов в случае дефлаграционного горения (взрыва):

- расстояние от геометрического центра облака топливовоздушной смеси, на котором проявляется нижний порог повреждения человека ударной волной при ее избыточном давлении  $\Delta P > 5 \text{ кПа}$ , составляет 480 м;

- расстояние от геометрического центра облака топливовоздушной смеси, на котором проявляются малые повреждения платформы при избыточном давлении ударной волны  $\Delta P > 3 \text{ кПа}$ , составляет 750 м.

4 Параметры основных поражающих факторов в случае «огненного шара»:

- диаметр «огненного шара» – 48 м;
- средняя поверхностная плотность теплового излучения пламени –  $450 \text{ кВт/м}^2$ ;
- безопасная дистанция человека от геометрического центра «огненного шара» при тепловом воздействии  $1,4 \text{ кВт/м}^2$  – 192 м.

5 Для локализации нефтяного пятна, образовавшегося при неблагоприятных погодных условиях в течение 0,5 ч, требуются боновые заграждения протяженностью 937 м, в течение 1 ч – 1125 м, в течение 1,5 ч – 1253 м.

6 Индивидуальный риск составил  $1,2 \cdot 10^{-8}$ , 1/год.

Таким образом, предложенные методология и алгоритм ее реализации обеспечивают достижение цели, поставленной в работе, а именно – достоверное прогнозирование последствий аварийного разлива углеводородов в акватории морского шельфа с привлечением соответствующих ГИС-технологий и осуществление эффективных мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий возможных разливов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1 На основании анализа современных подходов к оценке рисков аварий на морских нефтедобывающих объектах обоснована перспективность привлечения геоинформационных технологий для совершенствования методов определения таких по-

казателей разливов как их площадь, объем и направления миграции нефти в пределах акватории загрязнения.

2 В ходе экспериментальных исследований влияния фракционного состава разлившихся углеводородов на процесс их миграции в пределах пятна и на его размеры получены значения поправочного коэффициента к уравнению Дж. Фэя, позволяющего повысить точность расчета площади аварийного разлива. Так, для нефти с содержанием нафтеновой фракции 1–9 % поправочный коэффициент равен 0,92, при наличии нафтенов в количестве 10–20 % – 1,267. Показано, что расчет параметров нефтяного пятна с использованием данных коэффициентов снижает относительную ошибку определения его площади на 28 %.

3 Применение в рамках геоинформационных технологий предложенной математической модели процесса миграции компонентов системы «атмосферный слой – нефтяное пятно – морская поверхность» в акватории аварийного разлива нефти, основанной на учете складывающегося баланса сил гравитации и вязкого трения на границе «нефть – вода» и реализуемой с использованием модифицированного уравнения Дж. Фэя, обеспечивает более достоверное и точное прогнозирование значений как технологических параметров потоков, так и площади формирующегося углеводородного пятна.

4 Существенным преимуществом моделирования аварийных разливов в рамках геоинформационных технологий является учет географических и навигационно-гидрологических характеристик территории аварии, что обеспечивает повышение точности определения границ потенциально опасных зон растекания углеводородов и направления дрейфа облака топливно-воздушной смеси, имеющего критические значения параметров возгорания. Например, при массе испарившегося вещества в газозоудном облаке 841 кг средняя поверхностная плотность теплового излучения пламени составит 450 кВт/м<sup>2</sup>, а эффективный диаметр «огненного шара» – 48 м.

5 В целях оперативной реализации предлагаемой методологии на конкретном нефтяном объекте разработан программный продукт, позволяющий определять показатели рисков возгорания как самого объекта, так и элементов прилегающей инфраструктуры в районе его географического расположения.

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 научных трудах, в том числе:**

**- в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:**

1 Хафизов, Ф. Ш. Разработка зависимости по определению площади пролива для горючих и легковоспламеняющихся жидкостей / Ф. Ш. Хафизов, Д. Ю. Пережогин, А. В. Краснов, И. Ф. Хафизов, Э. Ф. Рахматуллина // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – Уфа, 2016. – Вып. 4 (106). – С. 183–192.

2 Хафизов, Ф. Ш. Исследование влияния углеводородного состава на диаметр пролива нефтепродуктов на водной поверхности / Ф. Ш. Хафизов, Д. Ю. Пережогин, А. В. Краснов, И. Ф. Хафизов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – Уфа, 2017. – Вып. 4 (110). – С. 202–209.

3 Хафизов, Ф. Ш. Частота возникновения пожаровзрывоопасных ситуаций на морских буровых платформах / Ф. Ш. Хафизов, Д. Ю. Пережогин, А. В. Краснов, Р. М. Султанов, В. И. Бутович // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2017. – № 5. – С. 171–190. – URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5\\_2017/ogbus\\_5\\_2017\\_p171-190\\_KhafizovFSh\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5_2017/ogbus_5_2017_p171-190_KhafizovFSh_ru.pdf).

4 Пережогин, Д. Ю. Разработка алгоритма прогнозирования аварийных разливов нефти в ГИС-системе методами математического моделирования / Д. Ю. Пережогин // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2019. – № 1. – С. 6–12. [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1\\_2019/ogbus\\_1\\_2019\\_p6-12.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2019/ogbus_1_2019_p6-12.pdf).

**- в материалах различных конференций и семинаров:**

5 Пережогин, Д. Ю. Разработка функции по определению площади пролива для разлива пожароопасных жидкостей / Д. Ю. Пережогин, А. В. Краснов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – Воронеж, 2016. – Т. 1. – № 1 (7). – С. 170–172.

6 Рахматуллина, Э. Ф. Экспериментальное исследование коэффициента пролива на наклонные поверхности / Э. Ф. Рахматуллина, Д. Ю. Пережогин, Г. Х. Кашапова // Актуальные проблемы науки и техники – 2016 : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. 16–18 ноября 2016 г. – Уфа, 2016. – С. 220–221.

7 Пережогин, Д. Ю. Экспериментальное исследование параметров площади пролива / Д. Ю. Пережогин, А. В. Краснов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – Воронеж, 2016. – Т. 1. – № 1 (7). – С. 173–174.

8 Пережогин, Д. Ю. Определение коэффициента разлития дизельного топлива на водную поверхность / Д. Ю. Пережогин, И. Ф. Хафизов // Актуальные проблемы и современные технологии обеспечения пожарной, экологической и промышленной безопасности: сб. матер. Всеросс. науч.-практ. конф. – Стерлитамак, 2017. – С. 77–79.

9 Пережогин, Д. Ю. Оценка пожарной опасности морских платформ / Д. Ю. Пережогин, В. И. Бутович // Актуальные проблемы и современные технологии обеспечения пожарной, экологической и промышленной безопасности : сб. матер. Всеросс. науч.-практ. конф. – Стерлитамак, 2017. – С. 73–75.