

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)

На правах рукописи



Чернышев Леонид Олегович

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ХИМИЧЕСКИ
ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Научная специальность - 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика (технические науки)»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Матвеев Юрий Николаевич

ТВЕРЬ 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ АВАРИЙНОГО РЕАГИРОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Аварийные ситуации и опасности химических производств	12
1.1.1 Статистика аварийных ситуаций на ОПО	13
1.1.2 Опасности химических производств	17
1.2 Оперативное реагирование на последствия выбросов	19
1.2.1 Уровни реагирования и оценка химической обстановки на ХОО	19
1.2.2 Информационная поддержка в задачах оперативного управления ..	23
1.3 Анализ подходов к прогнозированию оперативной обстановки	29
1.3.1 Обзор существующих подходов к проблеме прогнозирования	29
1.3.2 Подходы к прогнозированию на основе данных мониторинга	33
1.3.3 Прогнозирование с использованием клеточных автоматов	36
1.4 Проблемное поле и постановка задачи исследования	38
1.4.1 Ограничения прикладной области исследования	38
1.4.2 Постановка задачи исследования	40
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕСТНОСТИ	43
2.1 Особенности предлагаемого подхода	43
2.1.1 Известные подходы к оценке характеристик источника	43
2.1.2 Метод прогнозирования последствий аварии	46
2.2 Анализ алгоритмов рассеивания загрязняющих веществ	48
2.2.1 Классификация алгоритмов рассеивания	48
2.2.2 Свойства клеточных автоматов	52
2.3 Разработка алгоритмов внутреннего контура	53
2.3.1 Формирование алгоритма расчета на основе уравнения Гаусса	54
2.3.2 Разработка вероятностного клеточно-автоматного алгоритма	57
2.3.3 Модификация фронтального клеточно-автоматного алгоритма	64

2.3.4	Разработка эмпирического клеточно-автоматного алгоритма	68
2.3.5	Выбор алгоритмов прогноза и примеры визуализации	70
2.4	Обоснование алгоритмов внешнего контура системы	73
2.4.1	Параметризация прогнозных расчетов	73
2.4.2	Определение показателей критериальной оценки	74
2.4.3	Обоснование и выбор методов параметрической настройки	77
2.5	Методика визуализации и анализа аварийных выбросов	80
ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ		83
3.1	Реализация алгоритмического обеспечения	83
3.1.1	Определение признака пассивности выброса	83
3.1.2	Реализация алгоритмов внутреннего контура	85
3.2	Программная реализация комплексной системы	96
3.2.1	Разработка архитектуры программных модулей системы	96
3.2.2	Разработка макета преград	99
3.3	Контрольное испытание системы	102
3.4	Обсуждение результатов исследования	106
3.4.1	Оценка эффективности прогноза	106
3.4.2	Характеристики программного средства	109
3.4.3	Рекомендации и предложения	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		114
ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕСТОВЫХ ДАННЫХ		132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВЕДЕНИЯ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ		143
ПРИЛОЖЕНИЕ В СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ		145

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АС	- аварийная ситуация
АСДНР	- аварийно-спасательные и другие неотложные работы
АСППР	- автоматизированная система поддержки принятия решений
АСФ	- аварийно-спасательные службы и формирования
АХОВ	- аварийные химически опасные вещества
ГИС	- геоинформационная система
ЗВ	- загрязняющее вещество
ИИ	- искусственный интеллект
ИХЗ	- источник химического загрязнения
КА	- клеточный автомат
ЛПР	- лицо, принимающее решение
ОЗЗ	- опасная зона загрязнения
ОПО	- опасный производственный объект
ОДЗ	- область допустимых значений
ПМЛА	- план мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварии
СДЯВ	- сильнодействующее ядовитое вещество
СЗЗ	- санитарная защитная зона
СППР	- система поддержки принятия решений
ТКА	- теория клеточных автоматов
ТХВ	- токсическое химическое вещество
ХО	- химическая обстановка
ХОО	- химически опасный объект
ХТП	- химико-технологический процесс
ЧС	- чрезвычайная ситуация
ЦФ	- целевая функция

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Значительные усилия научного сообщества направлены на обеспечение безопасности современных химических производств. Такие производства составляют основу промышленного потенциала страны и неразрывно связаны с использованием опасных веществ, выбросы которых способны привести к негативным последствиям, большому ущербу и загрязнению окружающей среды. Опасные химические вещества необходимы для производства многих полезных продуктов и значительные запасы таких веществ расположены не только в зоне промышленного производства, но и на территории объектов социальной инфраструктуры. Существуют постоянно-действующие угрозы и опасности техногенного воздействия на окружающую среду.

Эффективность реагирования на чрезвычайные ситуации с химическим загрязнением местности зависит от оперативности и обоснованности принимаемых решений. Для информационной поддержки таких решений применяют специализированные системы и комплексы, позволяющие сформировать и отобразить на карте местности очаги аварийного загрязнения и оценить варианты развития оперативной обстановки. Однако многие методики и алгоритмы автоматизированного расчета последствий химической аварии ориентированы на квалифицированных пользователей и обладают ограничениями, связанными с идеализированным характером описания процессов диффузии и переноса химических веществ. Такие особенности и ограничения способны негативно влиять на адекватность и оперативность реагирования, особенно в случае дефицита или неопределенности исходной информации.

Экстремальные условия принятия решений, возникающие в результате аварийной ситуации, диктуют требования к мобильности, автономности и быстродействию системы прогнозирования и визуализации, которая позволит на основе данных мониторинга рассчитать и отобразить зону загрязнения на карте местности. Одним из перспективных направлений для разработки алгоритмов такой системы является клеточно-автоматный подход к моделированию газовой

динамики, позволяющий учитывать эффекты рассеивания облака загрязняющего вещества при локальном масштабе аварии.

Обеспечение безопасности населения и окружающей природной среды является сложной научно-технической проблемой, разрешение которой невозможно без применения методов системного анализа, разработки новых, более совершенных, чем существующие на сегодняшний день, методов и алгоритмов прогнозирования и визуализации процессов возникновения и протекания аварийных ситуаций. Решению части этих задач и посвящена данная диссертационная работа.

Степень научной разработанности темы исследования

Теоретические основы управления технологической безопасностью химических производств заложены и развиты в научных трудах В.В. Кафарова и В.П. Мешалкина, а также исследованиях А.Ф. Егорова, Т.В. Савицкой. Математическому моделированию в задачах окружающей среды посвящены исследования Марчука Г.И., Шокина Ю.И., Белолипецкого В.М., Чубарова Л.Б. Математические модели загрязнения атмосферы представлены в работах: А.С. Мони́на, С.А. Солодкова, М.Е. Берлянда, Е.Л. Гениховича, Р.И. Оникула, А.Е. Алояна и др. Развитие подходов к мониторингу экологических систем получили в исследованиях: Ю.А. Израэля, И.П. Герасимова, В.А. Снытко, В.М. Панарина и др. Прикладные аспекты аварийных выбросов в атмосферу обобщены в работах: В.И. Романова, И.В. Антонова, В.В. Меньшикова, В.Ю. Радоуцкого. Методы системного анализа в сложных системах отражены в научных статьях: Р. Шеннона, В.В. Емельянова, Ю.Н. Павловского, М.В. Аржакова, Ю.Н. Матвеева и др. Клеточно-автоматный подход к моделированию представлен в работах: О.Л. Бандман, В.К. Ванаг, И.В. Матюшкина, М.А. Заплатиной, Ю.Г. Медведева; С.Е. Рубцова, А. В. Павловой, А. С. Олейникова, С.В. Губарева, Д.Б. Берга, А.П. Сергеева. Обзоры моделей и алгоритмов для расчета распределения примесей приведены в работах: Н.В. Мензелинцевой; И. Г. Григорьевой, Ю. А. Тунаковой, Р. А. Шагидуллиной; Е.В. Сысоевой, М.О. Гельмановой; Х. Г. Асадова, Р. Ш. Маммадли. В исследованиях зарубежных авторов: S.R. Hanna, J. Chang, P.

Goodwin, D. Thevenin, L.C. Thomson, C.T. Allen, G.S. Haupt, E. Yee, A. Keats активно развиваются методы прогнозирования последствий аварии, основанные на оценке параметров источника выброса. Для такой оценки в работах: P. Kumar, A.A. Feiz, S.K. Singh, P. Ngae, G. Turbelin использованы различные классы гауссовых и вычислительных моделей атмосферной диффузии.

Анализ научных разработок показал, что в существующих системах поддержки оперативных решений недостаточно широко используется механизм обратной связи с возможностью корректировки параметров прогноза. Предлагаемый подход к визуализации и анализу аварийных выбросов химически опасных веществ на промышленных предприятиях определил цель и задачи диссертационного исследования.

Цель работы заключается в разработке метода и алгоритмов анализа, прогнозирования и визуализации опасной зоны загрязнения при аварийных выбросах химически опасных веществ в условиях неопределенности исходной информации.

Для достижения цели диссертационного исследования поставлены следующие взаимосвязанные задачи:

1. Осуществить анализ проблемы оперативного реагирования на последствия аварийного загрязнения при выбросах токсических веществ на химически опасном производстве.
2. Проанализировать существующие подходы к прогнозированию и визуализации аварийного загрязнения местности.
3. Разработать метод прогнозирования и визуализации оперативной обстановки с возможностью корректировки параметров прогноза по данным химической разведки местности.
4. Исследовать особенности алгоритмов прогнозирования и разработать подходы к реализации таких алгоритмов на основе теории клеточных автоматов.
5. Разработать и программно реализовать алгоритмы комплексной системы. Осуществить контрольное испытание системы на наборе тестовых примеров.

6. Оценить эффективность предложенных решений и разработать рекомендации по дальнейшему развитию комплексной системы.

Объект исследования. Последствия выбросов химически опасных веществ в атмосферу, приводящие к аварийному загрязнению местности.

Предмет исследования. Методы и алгоритмы прогнозирования и визуализации образования опасной зоны загрязнения для информационной поддержки ликвидации последствий аварии.

Методы исследования. В работе использовались методы системного анализа и теории принятия решений, методы вероятностного моделирования, экспериментального анализа и статистической обработки данных, методы клеточных автоматов, эвристические процедуры и вычислительные методы поиска решений, алгоритмы интеллектуальной обработки и визуализации данных с использованием геоинформационных технологий.

Информационная база исследования. Нормативно-правовые документы, публикации периодических научных изданий, сборников конференций, монографическая литература, обзоры, диссертационные исследования, ресурсы сети Интернет, раскрывающие вопросы системного анализа выбросов химически опасных веществ на промышленных объектах и подходы к разработке систем оперативного реагирования, а также справочная литература и сборники статистических данных.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод прогнозирования последствий выброса опасных химических веществ с возможностью корректировки параметров прогноза, позволяющий на основе данных химической разведки местности оценить размеры и конфигурацию зоны аварийного загрязнения местности.

2. Алгоритмы клеточно-автоматной модели рассеяния примесей для визуализации и анализа аварийных выбросов химически опасных веществ с учетом эффектов рассеивания при локальном масштабе аварии

Положения соответствуют п. 4. «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия

решений, обработки информации и искусственного интеллекта» и п. 12. «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации» паспорта специальности 2.3.1. - Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Научная новизна:

1. Разработан метод прогнозирования последствий выброса опасных химических веществ, отличающийся от существующих способом расчета параметров прогнозных моделей на основе показателя геометрической дисперсии и доли прогнозов в пределах двукратного отклонения от наблюдений, что позволяет оценить размеры и конфигурацию зоны аварийного загрязнения.

2. Разработаны алгоритмы клеточно-автоматной модели распространения примеси, отличающиеся учетом правил заполнения эллипса рассеивания, а также эффектов взаимодействия с препятствиями при локальном масштабе аварии, что позволяет математически более точно описывать распространение загрязнений в сложных условиях выброса химически опасных веществ в атмосферу.

3. Предложен подход к развитию алгоритмических возможностей комплексной системы прогнозирования и визуализации на основе эмпирической модификации алгоритмов клеточно-автоматной модели, что позволяет в значительной степени ускорить модельные вычисления при сложной конфигурации рельефа и высокой детализации карты местности.

4. На основе модификации метода «бросания лучей» разработан алгоритм формирования цифрового макета местности, отличающийся от существующих способом формирования контуров объектов, распределенных за границами автономной карты.

Теоретическая значимость заключается в развитии основ системного анализа и прогнозирования последствий выбросов химически опасных веществ в атмосферу с учетом данных химической обстановки. Представленные в работе метод и алгоритмы могут быть использованы для визуализации и анализа оперативной обстановки, возникающей в результате продолжительных выбросов химических веществ при стационарном расположении точечного источника

загрязнения. Разработанные клеточно-автоматные алгоритмы рассеивания учитывают влияние сложных условий выброса при локальном масштабе аварии.

Практическая ценность. Результаты работы практически значимы для обоснования мероприятий при ликвидации последствий выбросов химически опасных веществ при локальном и мезомасштабном уровне загрязнений местности. Практическое применение разработанных алгоритмов позволит расширить возможности верифицированных программных средств, ускорить и упростить анализ аварийной ситуации в сложных условиях выброса. Представленная система прогнозирования и визуализации может быть использована для экспресс-оценки оперативной ситуации в первые часы после аварии, когда востребована любая возможная информация о границах выброса химически опасных веществ, размерах опасной зоны загрязнения и фактах ее выхода за пределы санитарной защитной зоны предприятия,

Ценность работы подтверждается соответствующими актами передачи результатов исследования в управление по обеспечению безопасности населения администрации г. Твери, а также актами испытаний и внедрения результатов исследования в проектно-конструкторском бюро автоматизации производств (ООО «ПКБ АП»). Сведения о внедрении результатов исследования приведены в приложении.

Достоверность и обоснованность результатов исследования.

Достоверность научных результатов обусловлена корректным применением методов системного анализа и моделирования сложных систем для решения задач диссертационного исследования, использованием апробированных методик в схеме обработки аварийной ситуации, сопоставлением результатов выполненных расчетов с экспериментальными данными, а также соответствующими актами испытаний и свидетельствами о регистрации программ №2021660993, №2021664783 и №2023669204.

Апробация работы. Результаты диссертационных исследований представлены на следующих научных конференциях: X, XI, XII, XIII и XIV Международной научно-практической конференции «Информационные ресурсы

и системы в экономике, науке и образовании» (Пенза, 2020, 2021, 2022, 2023 и 2024 годы); XI, XX и XXI Международной научно-технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» (Пенза, 2017, 2020 и 2021 годы); Международной научно-практической конференции «Железнодорожный транспорт и технологии (RTT-2021)» (Екатеринбург, 2021 год); IV и V Региональной выставке «Инновационные разработки в области защиты населения от ЧС» (Тверь, 2023 и 2024 годы).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, отражающих основные научные результаты исследования, в том числе: 4 - в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК по научной специальности - 2.3.1 (из них в журнале категории К1 - 2, в журнале категории К2 - 1); 1 - в сборнике статей, включенном в международную реферативную базу данных Scopus; 13 - в трудах и тезисах международных и всероссийских конференций, зарегистрированных в базе данных научного цитирования РИНЦ. По результатам получено 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Список публикаций и свидетельства приведены в приложении.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 151 наименование, и приложений. Полный объём работы составляет 147 страниц, включая 30 рисунков, 3 таблицы и 3 приложения.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ АВАРИЙНОГО РЕАГИРОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Аварийные ситуации и опасности химических производств

В настоящее время на территории РФ расположено множество промышленных объектов, функционирование которых способно привести к появлению опасных для здоровья населения и природной среды веществ. Примерами таких жизненно важных объектов социальной инфраструктуры являются предприятия пищевой и легкой промышленности, а также перерабатывающие комбинаты, которые основаны на химической технологии производства полезных продуктов. К опасным производствам, использующим взрывоопасные, вредные и радиоактивные материалы [1], на практике активно применяется термин «опасный производственный объект» (ОПО). Эти производства являются постоянно действующими источниками повышенной опасности загрязнения окружающей среды [2-3].

Современные химические производства, как сложные химико-технологические системы, использующие для производства, переработки, хранения или транспортировки опасные и вредные вещества, считаются объектами высшей категории опасности [4]. Нарушение регламента функционирования таких производств зачастую приводит к серьезным техногенным последствиям для человека и окружающей среды - выбросам аварийных химически опасных веществ (АХОВ) и химическому загрязнению производственных площадей и прилегающей территории.

Согласно документу COST ES1006 [5], инциденты с опасными веществами являются критичными из-за последствий случайных или умышленных выбросов на территориях с населением. Непреднамеренные, природные или террористические действия увеличивают риски крупномасштабных аварий с негативным воздействием на экосистему и инфраструктуру химических, биологических, радиационных или ядерных угроз безопасности.

Поэтому проблемы экологической безопасности и рационального управления природными ресурсами, а также задачи в области обеспечения химической и биологической безопасности находятся под контролем органов государственной власти нашей страны, что отражено в соответствующих указах Президента РФ [6, 7]. В этих документах дана оценка состояния экологической, химической и биологической безопасности и определены направления и основные задачи государственной политики в этой сфере деятельности. Задача по «разработке и внедрению программного обеспечения для прогнозирования, оперативной оценки ситуации...» для повышения обоснованности принятия управленческих решений отнесена к основным задачам политики государства [6].

1.1.1 Статистика аварийных ситуаций на ОПО

В различных отраслях промышленности находятся предприятия, которые работают с химически опасными материалами. В 2022 г. влиянию химических, биологических, физических факторов было подвержено более чем 86,8 млн. чел. в 51 субъекте Российской Федерации (59,3% населения). Показатели комплексной химической нагрузки на население продолжают занимать лидирующую позицию относительно показателей комплексной биологической нагрузки и нагрузки по физическим факторам [8].

Согласно статистическим данным 2023 г. [9], в выбросах предприятий возросло содержание опасных веществ, воздействующих на окружающую среду, том числе: бензпирена (1-й класс опасности; +81,1%), никеля и его соединений (2-й класс опасности; +23,6%), хлора (2-й класс опасности; +13,4%), свинца (1-й класс опасности; +13,2%), гидрохлорида (2-й класс опасности; +8,6%), оксида кальция (2-й класс опасности; +7,3%), формальдегида (2-й класс опасности; +5%), неорганической пыли (3-й класс опасности; +3,8%), мышьяка (2-й класс опасности; +1,3%) и толуола (3-й класс опасности; +0,8%).

По данным специалистов, на промышленных предприятиях хранятся значительные запасы химических опасных веществ, которые могут быть составить более 10 триллионов летальных доз опасных веществ. Если учесть

жилые зоны, расположенные рядом с такими объектами, то в условиях риска аварийного химического заражения проживает более половины населения нашей страны [10]. Возможные экономические последствия подобных аварий крайне высокие и могут составить от 600 до 700 миллиардов рублей [11].

В 2022 году, согласно официальным данным [12], на территории РФ функционировало около 3500 ОПО. Под надзором Ростехнадзора находились: химически опасные производственные объекты (965); хлорные объекты системы водоподготовки (332); объекты целлюлозно-бумажных производств (20); аммиачно-холодильные установки (56); объекты производства и потребления продуктов разделения воздуха, криогенно-вакуумную технику (432); спиртовые производства (138); маслоэкстрактные производства (49); склады, базы хранения и отгрузки химически опасных и взрывоопасных веществ (497); другие производства, связанные с обращением или хранением токсичных, взрывоопасных и других опасных веществ (553).

В таблице 1. приведено распределение аварий и несчастных случаев по классам опасности предприятий за период с 2018 по 2022 год [2, 13], где I класс ОПО соответствует уровню чрезвычайно высокой опасности, II – высокой опасности, III – средней опасности, IV – низкой опасности. Эти сводные данные (рисунки 1.1 и 1.2) свидетельствуют о значительном числе отечественных ОПО I и II классов опасности с высоким уровнем риска для окружающей среды и здоровья людей (среднегодовой уровень - 657 ОПО).

Значимым также является среднегодовой показатель аварийных ситуаций (6 событий) и несчастных случаев (3 события), что может указывать на существующие риски эксплуатации ОПО. Рост объемов производства химических веществ, в свою очередь, увеличивает вероятность аварий и чрезвычайных ситуаций в будущем времени.

Одной из самых известных аварий с выбросом АХОВ является катастрофа на заводе по производству пестицидов в индийском городе Бхопал в 1984 году. В результате утечки метилизоцианата погибло по разным оценкам от 3 до 18 тысяч человек, а пострадало более 500 тысяч.

Таблица 1.1 - Распределение аварий и несчастных случаев по классам опасности предприятий за период с 2018 по 2022 год

Класс опасности ОПО		Годы				
		2018	2019	2020	2021	2022
I		194	185	178	162	198
II		478	468	471	474	479
III		3466	3502	3585	3641	3617
IV		1300	1274	1360	1341	1350
Всего:	Аварий	7	2	8	8	5
	Несчастных случаев	3	3	2	5	0

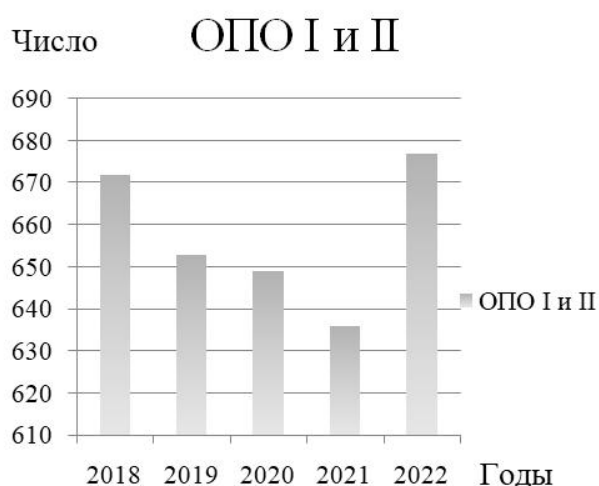


Рисунок 1.1 - Количество ОПО I и II за период с 2018 по 2022 год

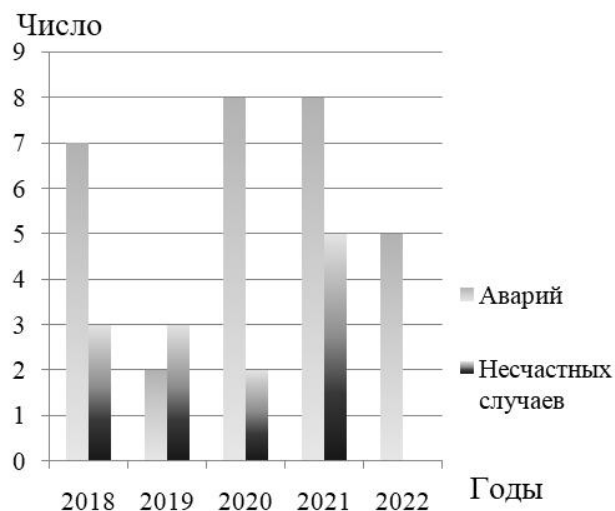


Рисунок 1.2 - Число аварий и несчастных случаев на ОПО

В 1976 году на химическом заводе в итальянском городе Севезо произошел выброс диоксина. Хотя непосредственных жертв не было, загрязнению подверглась обширная территория, что привело к долгосрочным последствиям для здоровья населения и окружающей среды.

17 мая 2012 года произошла утечка хлора на химическом заводе "Корунд", расположенном в городе Дзержинск Нижегородской области. Интоксикацию хлором получил один человек, который отправлен в стационар, семерым пострадавшим оказана помощь на месте.

По данным Ростехнадзора, в период с 2019 по 2022 год произошел ряд инцидентов, среди которых можно отметить следующие:

6 мая 2019 года в филиале АО «ОХК «УРАЛХИМ» на территории производства аммиака произошел инцидент. Ремонтные работы по установке ограждений на крышке емкости раствора метилдиэтанолamina, завершились взрывом. Крышка аппарата оторвалась и пролетела 85 метров, что повлекло за собой смертельные травмы для трех сотрудников производства.

19 марта 2020 года на территории Новомосковской акционерной компании «Азот» произошел залповый выброс жидкого аммиака через фланцевое соединение запорного вентиля, расположенного на линии подачи жидкого аммиака в подогреватель этого вещества.

2 апреля 2021 года на аммиачно-холодильной установке, эксплуатируемой ООО «Иркутский хладокомбинат», произошло разрушение штуцера манометра с выбросом аммиака. В результате происшествия пострадали два машиниста, один из которых впоследствии скончался.

9 июня 2022 года на объекте производства аммиака акционерного общества «Минудобрения» при проведении ремонтных работ, включая промывку и чистку четырех аппаратов с использованием установки высокого давления, произошел несчастный случай со слесарем-ремонтником. В результате было установлено нанесение тяжкого вреда здоровью.

24 июня 2022 года на объекте производства «Площадка цеха карбамида» ПАО «Акрон», произошла разгерметизация теплообменника установки захламленной воды. В результате выброса, находящегося под давлением жидкого аммиака в виде паровоздушной смеси, рабочий получил тяжелые повреждения в виде химического ожога.

Среди причин указанных аварий можно выделить недостаточные знания обслуживающего персонала о требованиях безопасного проведения технологических процессов, низкий уровень технологической и трудовой дисциплины, неправильное поведение сотрудников при аварийных ситуациях, проблемы в организации производственного цикла и производственного

контроля, недостаточная ответственность и влияние руководства на безопасность процессов.

Таким образом, сохраняется высокая вероятность аварий на ОПО, которые не ориентированы на внедрение новых высокоэффективных и безопасных технологий. Что особенно актуально для промышленных объектов с высоким уровнем износа оборудования, к которым, по данным Ростехнадзора, может быть отнесена основная часть (более 75 %) всех поднадзорных ОПО [13]. Продление сроков эксплуатации таких объектов без принятия соответствующих мер существенно увеличивает риски аварий.

1.1.2 Опасности химических производств

Анализ публикаций [14-16] показывает, что современные опасные химические производства (или химически-опасные объекты (ХОО)) характеризуются рядом специфических свойств, которые определяют их потенциальную опасность для человека и окружающей среды.

Во-первых, в современном химическом производстве используются опасные (токсичные, пожаро- и взрывоопасные, а также агрессивные) вещества, способные нанести вред или ущерб окружающей среде и здоровью персонала предприятия и населению на прилегающей к ОПО территории [17]. Эти вещества являются основными компонентами или целевыми продуктами синтеза, сопутствующими реагентами или промежуточными соединениями, а также побочными продуктами производства разнообразных веществ. Полностью исключить использование таких веществ не представляется возможным, что требует строгого контроля и соблюдения мер безопасности для предотвращения аварийных ситуаций [18].

Во-вторых, на химических предприятиях осуществляются сложные многостадийные технологические процессы, протекающие при высоких температурах и давлениях, а также с большими затратами энергии. Создаются предпосылки для разрушения оборудования и высвобождения больших количеств опасных веществ.

Многие технологические процессы реализованы с использованием разнообразного оборудования, такого как реакторы, колонны синтеза, теплообменники и др. Это оборудование должно быть устойчивым к воздействию агрессивных сред и работать в экстремальных условиях.

На предприятиях химической, нефтехимической и других отраслей промышленности перерабатываются значительные объемы токсичных и взрывоопасных веществ. Поэтому многие химические производства функционируют в непрерывном режиме и, следовательно, несут повышенную потенциальную опасность воздействия на окружающую среду при аварийных выбросах опасных веществ. Безопасность таких предприятий требует разработки эффективной системы мониторинга и управления, позволяющей своевременно обнаруживать и устранять любые отклонения технологических параметров от нормального режима работы [2, 5].

В-третьих, многие химические производства характеризуются высокой плотностью размещения технологического оборудования на ограниченных площадях. В случае аварии, это способствует быстрому распространению поражающих факторов, возникновению так называемого "эффекта домино" [17] и развитию синергетических процессов непредсказуемого характера, что значительно затрудняет локализацию и ликвидацию последствий аварии.

Химические производства оказывают значительное воздействие на окружающую среду. Выбросы токсичных веществ в атмосферу, сбросы загрязненных сточных вод и образование опасных отходов требуют внедрения современных технологий очистки и утилизации, а также соблюдения строгих экологических норм и стандартов [16].

Следует отметить, что не все АХОВ относятся к особо опасным химическим веществам [19]. Среди особо опасных веществ выделяют сильнодействующие токсические химические соединения (СДЯВ), которые обладают высокой летучестью и токсичностью, а также потенциально могут привести к массовому отравлению в условиях техногенных аварий [1].

Из всех известных сейчас в промышленности опасных химических веществ, только некоторое количество (не более 100) относится к этому классу АХОВ. Основные физико-химические свойства этих веществ - агрегатное состояние, растворимость, плотность, летучесть, температура кипения, вязкость и другие - определяют их способность быстро попадать в окружающую среду и создавать зоны негативного воздействия на живую природу и объекты инфраструктуры [20].

Указанные факторы обуславливают высокий потенциал опасности химических производств и необходимость обеспечения их надежной и безаварийной работы. Это требует применения комплекса мер - разработки безопасного технологического регламента, внедрения современных систем управления технологическими процессами, использования надежного оборудования, подготовки квалифицированного персонала, разработки эффективных планов локализации и ликвидации аварий, что отражено в Федеральных нормах и правилах промышленной безопасности [18].

1.2 Оперативное реагирование на последствия выбросов

1.2.1 Уровни реагирования и оценка химической обстановки на ХОО

Правовая основа оперативного реагирования на последствия выбросов составлена федеральными законами и нормативно-правовыми актами РФ, в соответствии с которыми органы управления и силы территориальной подсистемы Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ТП РСЧС) функционируют в режимах: повседневной работы; повышенной готовности (при угрозе возникновения ЧС); чрезвычайной ситуации (при возникновении и ликвидации ЧС) [21]. При введении режима ЧС в зависимости от последствий аварии устанавливаются объектовый, местный, региональный, федеральный или особый уровни реагирования. Рассмотрим особенности объектового и местного уровней реагирования [22].

Если авария произошла в пределах территории организации, то объектовый уровень реагирования устанавливается решением руководителя данной

организации. Ликвидация аварии, как правило, осуществляется силами и средствами, прикрепленными к ОПО. Если последствия аварии определены за пределами территории объекта, то для их ликвидации также привлекаются силы и средства местного (муниципального) уровня реагирования.

Основу сил оперативного реагирования на объектовом и местном уровнях реагирования составляют аварийно-спасательные службы и формирования (АСФ) [23]. Координацию и управление деятельностью АСФ осуществляют соответствующие органы: на муниципальном уровне - единая дежурная диспетчерская служба (ЕДДС); на объектовом уровне - дежурно-диспетчерские службы (ДДС) организаций [24].

Национальный стандарт ГОСТ Р 2.8.01-2021 регламентирует аварийно-спасательные работы (АСДНР), осуществляемые на объектовом уровне управления силами и средствами приданных подразделений в случае чрезвычайных ситуаций как природного, так и техногенного характера.

Оценка химической обстановки (ХО) осуществляется в три этапа.

1. Заблаговременное выявление и оценка ХО с учётом среднегодовых метеоусловий. Планирование мероприятий по защите персонала и населения.

2. Выявление и оценка ХО после аварии на химически опасном объекте с учетом реальных метеоданных. Уточнение задач органам разведки и проведения неотложных мероприятий по защите.

3. Выявление и оценка фактической ХО на основании данных от органов разведки, наблюдения и контроля о концентрациях АХОВ в отдельных точках местности на определённое время. Уточнение принятых решений по защите населения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

В результате оценки ХО выявляется следующая информация: место, время и характер ЧС; фактические данные о пострадавших; приблизительные границы зоны бедствия, в пределах которого требуется осуществление мероприятий по защите и спасению населения; ориентировочный объем АСДНР и пути выдвижения сил и средств ликвидации ЧС.

Специфика оперативного реагирования на ХОО учитывает сценарии

возникновения и фазы развития аварии. Среди сценариев возникновения и развития химической аварии [25] выделяют три группы опасностей - внутренние события, внешние воздействия и ошибочные действия персонала. Источником внутренних событий служат технологические операции и технологическое оборудование (например, отказы оборудования, разрыв трубопровода, разрушение емкостей и т.д.). Причины внешних воздействий, находятся вне рабочей зоны ХТП. Сценарии характеризуют ряд возможных событий, ведущих к утечке и выбросу токсичных веществ [26].

В зависимости от сценариев возникновения аварийной ситуации (АС) различают «проектные» и «запроектные» варианты аварии. Причинами проектных аварий являются известные события (отказы оборудования), которые учтены в проектной и технологической документации (регламента) ХТП. Алгоритмы оперативного реагирования строго определены планами мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на производственном объекте (ПМЛА).

К «запроектным» авариям приводят внешние или непредсказуемые заранее события, например, природные стихийные воздействия (ураганы, наводнения, землетрясение и пр.) или опасные техногенные воздействия (пожары, взрывы, обрушения и т.д.). Такие воздействия не находят своего отражения в проектной документации и способны привести к ЧС. В этом случае необходимо учитывать уровень аварийной опасности происшествия, результаты оценки ХО, а также фазы развития аварийной ситуации.

В соответствии с положениями [27] различают следующие уровни аварийной опасности: чрезвычайно высокая аварийная опасность; высокая аварийная опасность; средняя аварийная опасность.

Первый уровень опасности характеризует аварии с неконтролируемым взрывом и выбросом опасных веществ, приводящие к остановке эксплуатации ОПО. Возникает ранее не предусмотренное технологическим регламентом воздействие поражающих факторов и поступление в окружающую среду опасных веществ с нарушением условий жизнедеятельности.

В случае высокой опасности инцидента наблюдается критическое отклонение технологических параметров регламента производства. В результате срабатывания систем автоматической защиты происходит остановка технологической линии, входящей в состав ОПО. При средней опасности происшествия (предпосылке к инциденту) возникают отказы и сбои оборудования ОПО, которые способны привести к аварии. Существует возможность переключения неисправного оборудования на резервное без остановки ХТП. Варианты оперативного реагирования в данных случаях учтены в ПМЛА.

Процесс развития аварийной ситуации на ОПО принято рассматривать в виде трех взаимосвязанных фаз, каждая из которых характеризуется специфическими особенностями и масштабами последствий.

Первоначальная фаза аварийной ситуации (фаза А) ограничивается пределами технологического блока или участка. На данном этапе могут возникать предпосылки к инциденту, потенциально приводящие к локальным нарушениям герметичности оборудования или незначительным взрывным процессам в аппаратуре. Отсутствует угроза распространения аварии за пределы изолированного участка. Оперативное реагирование осуществляется персоналом ОПО согласно инструкциям, соответствующим требованиям [28].

В последующей фазе высокой опасности инцидента (фазе Б), возникает потенциал для цепного развития аварии с вероятностью вовлечения в аварийный процесс всего ОПО. Данный этап сопровождается значительным нарушением целостности технологической системы. Для локализации последствий аварии привлекаются силы и средства реагирования ОПО.

Критическая фаза инцидента (фаза В) представляет собой наиболее опасный этап развития аварийной ситуации, характеризующийся цепным распространением аварии с возможным выходом за пределы территории предприятия. Для ликвидации последствий аварии такого масштаба привлекаются все доступные силы и средства реагирования объекта, а в случае угрозы жилым районам - службы местного уровня реагирования.

В конечном итоге, облако зараженного облака выседает на поверхность

земли, и тем самым, создает опасную зону загрязнения (ОЗЗ), конфигурация и размеры которой представляют объект исследования в данной диссертации.

Наиболее критичными являются случаи непроектного варианта аварии, при оперативном реагировании на которые необходима оценочная информация о границах выброса АХОВ, размерах опасной зоны загрязнения и фактах ее выхода за пределы санитарной защитной зоны предприятия, поскольку от её полноты зависит адекватность принимаемых решений, в том числе по объявлению режима чрезвычайной ситуации.

Такая информация может быть получена на основе обработки данных химической разведки в системе прогнозирования последствий аварийных выбросов, позволяющей отображать на карте местности зоны возможного химического загрязнения.

1.2.2 Информационная поддержка в задачах оперативного управления

Существующие в настоящее время подходы [29] к количественному обоснованию решений, принимаемых при ликвидации последствий ЧС, связаны с разработкой систем поддержки принятия решений, которые предоставляют лицу, принимающему решение (ЛПР), прогнозные оценки масштаба и степени заражения прилегающей территории из-за выбросов или проливов АХОВ.

Наиболее известные [30] методики прогнозирования последствий и анализа риска аварий обеспечивают расчет глубины и площади возможного химического заражения (СП 165.1325800.2014, МУ 2000/218), а также пространственно-временное распределение концентрации АХОВ («Токси» редакция 2.2, «Токси» редакция 3.1). Методики «Токси» позволяют оценить время подхода облака АХОВ к заданному рубежу и длительность воздействия поражающих факторов. Особое внимание уделено прогнозам численности населения в зоне возможного заражения, а также распределению пострадавших по степени тяжести. Прогнозные оценки учитывают различные сценарии развития АС, включая наиболее вероятный и наиболее опасный.

Сравнительный анализ методик приведен, в частности, в обзоре [31]. Результаты расчёта зоны химического поражения (глубина, угловые размеры и площадь зоны опасного заражения $S_{\text{ОЗЗ}}$, а также «поле концентраций» и «поле токсодоз») отображаются на топографической карте местности.

Наглядное воспроизведение последствий аварии, служит основой для обоснования исходного решения, направленного на ликвидацию последствий ЧС, которое уточняется по мере накопления оперативной информации [101].

Представленная на рисунке 1.2 схема иллюстрирует комплексную систему оперативного реагирования на аварийные ситуации с учетом компонента прогнозирования и визуализации данных. С точки зрения теории управления и принятия решений в условиях ЧС [32], данная система является многоуровневой иерархической системой с обратной связью.

На верхнем уровне системы находится последовательность элементов, в которой ХОО можно рассматривать в качестве объекта управления. За ним следуют элементы «Разведка ХОО» и «Оценка и визуализация последствий АС», выполняющие функции сбора и обработки информации о состоянии объекта. Завершает последовательность блок «АСДНР», который реализует функции основного регулятора системы.

Нижний уровень схемы представляет собой набор подсистем, каждая из которых отвечает за определенный аспект управления в чрезвычайной ситуации. Каждая подсистема имеет свои управляющие воздействия, обозначенные как $\bar{U}_1$, $\bar{U}_2$, $\bar{U}_3$ и $\bar{U}_4$.

Первая подсистема «Первичное реагирование» включает в себя анализ опасности АС, оповещение и регламентные операции. Вторая подсистема «Локализация и ликвидация ИХЗ» фокусируется на мерах по снижению площади загрязнения и общей площади пролива.

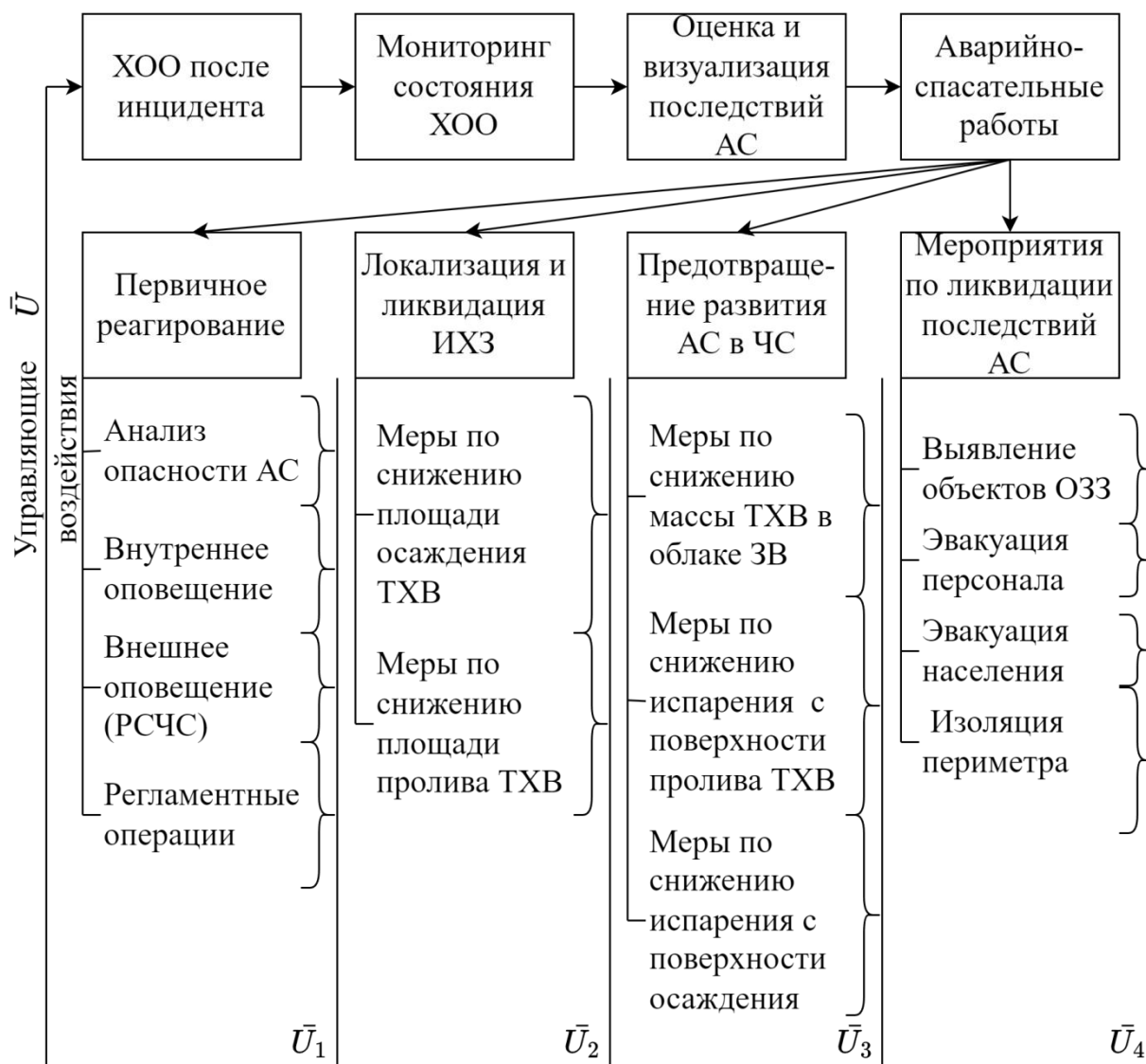


Рисунок 1.2 - Общая схема оперативного реагирования на ХОО с учетом блока «Оценка и визуализация последствий АС»

Мероприятия третьей подсистема «Предотвращение развития АС в ЧС» направлены на снижение массы и испарения токсичных и химически опасных веществ (ТХВ). Четвертая подсистема «Мероприятия по ликвидации последствий АС» формирует эвакуационные мероприятия и изоляцию зоны ЧС.

С точки зрения теории управления, данная система демонстрирует принципы адаптивного управления в зависимости от текущей ситуации и информации, поступающей от верхнего уровня управления. Обратные связи между подсистемами обеспечивают возможность корректировки управляющих воздействий с учетом результатов нижнего уровня управления.

Компоненты блока оценки и визуализации последствий АС применяются

для решения задач [33]:

1. Визуализации уровней концентрации АХОВ на цифровой карте местности и выявления очагов химического загрязнения, что необходимо для обоснования приоритетных направлений АСДНР.
2. Прогнозирования оперативной обстановки с учетом метеорологических условий, как основы для разработки планов эвакуации и безопасных маршрутов передвижения сил и средств АСФ.
3. Оценки вариантов развития оперативной обстановки, которая позволит оперативно корректировать планы оперативного реагирования.
4. Информационной поддержки подразделений химической разведки с более эффективными маршрутами и схемами отбора проб.
5. Оценки результативности мероприятий по нейтрализации и осаждению паров АХОВ.

Таким образом, подсистема прогноза и визуализации последствий выброса АХОВ является важным инструментом поддержки принятия решений на всех этапах ликвидации АС, от момента обнаружения выброса до завершения ликвидационных мероприятий.

В соответствии с терминологической базой [34], автоматизированные системы поддержки принятия решения (АСППР) в ЧС обеспечивают решение задач: прогнозирования, оценки и контроля обстановки; подготовки данных для планирования и принятия решения. Разработка ситуационного плана ликвидации ЧС, устойчивого к возможным отклонениям оперативной обстановки, должна учитывать оценку последствий загрязнения территории и прогноз развития аварийной ситуации.

В АСППР используются различные методы обработки и анализа данных, включая информационный поиск, интеллектуальный анализ данных, рассуждение на основе прецедентов, имитационное прогнозирование, нейронные сети, ситуационный анализ и когнитивное моделирование.

Такие системы интегрируют специализированные функции управления и реагирования на экстренные события и обрабатывают как статическую

информацию (например, дорожные карты и планы этажей зданий), так и динамическую информацию в режиме реального времени, включая события стихийных бедствий и текущее местоположение персонала и ресурсов.

Отечественные АСППР, которые активно применяются в деятельности МЧС России, основаны на технологиях геоинформационных систем (ГИС). В том числе: автоматизированная информационно-управляющая система РСЧС (АИУС РСЧС-2030); автоматизированная система Национального центра управления в кризисных ситуациях (АС НЦУКС); геопортал «Экстремум», используемый для моделирования природных и техногенных чрезвычайных ситуаций; система космического мониторинга МЧС России (СКМ МЧС) [35].

Алгоритмы в таких системах используются как проактивно (для оценки рисков и уязвимости) [36], так и реактивно (для управления чрезвычайными ситуациями и принятия решений). Можно выделить три основные области применения АСППР:

1. Планирование (до инцидента) - для прогнозирования возможных сценариев и анализа уязвимости различных систем и структур. АСППР используется для разработки планов реагирования на чрезвычайные ситуации и организации мер предварительной защиты.

2. Реагирование (в ходе инцидента) - для оценки фактического распределения опасных веществ и прогнозирования их распространения, что обеспечивает основу мероприятий по смягчению последствий аварии.

3. Анализ (после инцидента) - для анализа эффективности мер оперативного реагирования.

Треугольник осуществимости (рисунок 1.3) является концептуальной моделью, которая иллюстрирует три основные характеристики системы реагирования на ЧС: скорость вычислений, точность и стоимость.

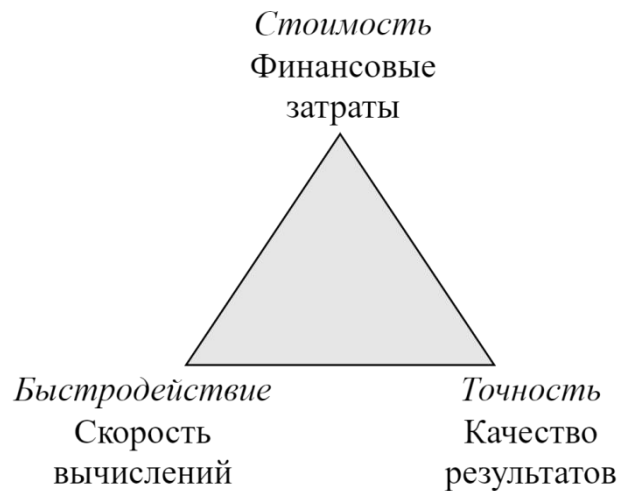


Рисунок 1.3 - «Треугольник осуществимости» при реагировании на ЧС [151]

Идеальная АСППР для реагирования на ЧС должна быть «быстрой, дешевой и точной». Однако практически выполнимыми являются только два из этих трех требований, что приводит к проблеме оптимального баланса между ними в альтернативных вариантах проектного решения:

- Быстрые и точные варианты связаны со значительными затратами вычислительных ресурсов, что приводит к увеличению их стоимости;
- Быстрые и дешевые варианты обладают ограниченной точностью из-за упрощений и приближений, используемых для ускорения расчетов;
- Точные и дешевые варианты, как правило, не обладают высоким быстродействием из-за ограниченности вычислительных ресурсов.

Баланс требований «быстроты-точности-стоимости» требует рассмотрения возможных походов к разработке проектных решений, в том числе: подхода с упрощениями и приближениями вычислительной схемы без потери точности расчетов; подхода с инвестициями в вычислительные ресурсы, которые способны увеличить быстродействие и точность расчетов. Требования быстродействия и универсальности приводят к упрощению алгоритмов, однако такие алгоритмы сложно использовать в реальных условиях.

Точные алгоритмы расчета обладают высокой сложностью и приводят к значительным временным затратам на расчет последствий выброса. Они не эффективны в условиях ЧС, когда время реагирования имеет определяющее значение, но практически значимы для долгосрочного планирования и

прогнозирования при большом бюджете времени. Более простые алгоритмы позволяют принимать решения в условиях дефицита времени, но они не учитывают все значимые факторы рассеивания примеси.

Используемые в АСППР [37, 38] алгоритмы прогнозирования последствий выброса АХОВ обладают ограничениями, связанными с идеализированным характером описания процессов диффузии и атмосферного переноса химических веществ.

Другим важным фактором, влияющим на адекватность прогноза, является «дефицит» информации. Неполные или неточные данные о параметрах выброса АХОВ, метеорологических условиях или особенностях рельефа местности способны привести к ошибкам прогноза.

Для преодоления указанных ограничений и повышения точности прогнозов научное сообщество предлагает ряд подходов, связанных с разработкой более сложных и детализированных алгоритмов, учитывающих большее количество факторов и их взаимосвязей. Активно развивается направление интеграции данных мониторинга с моделями оперативного прогнозирования [38], что позволяет корректировать прогнозы в режиме реального времени.

1.3 Анализ подходов к прогнозированию оперативной обстановки

1.3.1 Обзор существующих подходов к проблеме прогнозирования

Интерес к научным исследованиям, связанным с изучением последствий применения химического оружия, впервые возник в период Первой мировой войны. Во всех промышленно развитых странах организовали военно-химические полигоны, где проходили полевые исследования выбросов опасных химических веществ [39].

За рубежом история исследования рассеивания загрязнителей в атмосфере начинается с работ Г.И. Тейлора (1915), который изучал перераспределение тепла в течении над холодным морем. В 1921 году Тейлор

предложил теорию турбулентной диффузии, а в 1927 году он провел первые прямые измерения горизонтальной турбулентной скорости.

В 1930-х годах появились первые уравнения рассеяния примесей в атмосфере, но они еще не предполагали гауссово распределение [40]. В 1947 году Г. Саттон вывел уравнение рассеяния примесей, которое уже включало предположение о гауссовом распределении для вертикального и поперечного рассеяния шлейфа. Данный подход популярен во многих странах мира.

С тех пор вопросам рассеивания и переноса примесей в атмосфере было посвящено множество исследований. Работы Паскуилла (1961, 1974) посвящены атмосферной диффузии. В последующие годы появился ряд значимых публикаций по данной тематике, таких как оценка формул рассеяния Андерсоном (1969), сборник оценок атмосферной дисперсии Тернера (1970), турбулентной диффузии в окружающей среде Чанади (1973), справочник по атмосферной диффузии Ханна (1982), атмосферная диффузия Паскуилла и Смита (1983), и прогнозирование качества воздуха Заннетти (2010).

В СССР отечественные фундаментальные исследования начали активно развиваться начиная с 1960-х гг., когда возникла необходимость в увеличении мощностей тепловых электростанций (ТЭС). Существовавшие методы расчета минимальной высоты дымовых труб, приводили к чрезвычайно большим величинам для мощных ТЭС. Появились исследования академика А.С. Монины, связанные с моделированием приземной аэродинамики, которые далее были развиты в работах профессора М.Е. Берлянда. Модель, разработанная группой М.Е. Берлянда, стала основой нормативных документов, включая методику ОНД-86 [41]. Последующие исследования отражены, в том числе, в работах академика Г.И. Марчука [42] и академика Ю.И. Шокина [43].

История становления экологического мониторинга в СССР тесно связана с трудами академика Ю. А. Израэля, который в 1974 году предложил рассматривать систему мониторинга как «комплексную систему наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния биосферы или ее отдельных элементов под влиянием антропогенных воздействий» [44]. Ю. А. Израэль совместно с

академиками Герасимовым И. П. и Соколовым В.Е. разработал принципы экологического мониторинга.

На сегодняшний день в области физики распространения атмосферных примесей достигнуты значительные успехи благодаря работе таких учреждений, как Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Центральная аэрологическая обсерватория, Гидрометцентр России, НПО «Тайфун», Гидрохимический институт и многих других организаций. Эти достижения охватывают широкий спектр научных исследований, включая теоретическое изучение процессов распространения примесей в атмосфере, моделирование загрязнения воздуха и практическое применение научных разработок для мониторинга и контроля чистоты атмосферного воздуха [45].

Согласно [46,125], существующие специализированные методики могут быть обобщены в виде следующих групп:

1. Первая группа включает методики количественной оценки опасности хранения большого объема пожароопасных, взрывоопасных и токсичных химических веществ. Они являются основой для разработки планов мероприятий по снижению и устранению опасности АХОВ в случае ЧС.

2. Вторая группа - методики прогнозирования химической опасности и оценки последствий аварий на промышленных и транспортных объектах. Эти методики формируют прогнозы с учетом вероятности возникновения ЧС.

3. В третью группу входят вычислительные методы определения и распространения концентрации АХОВ на основании моделей (численных и аналитических), рассчитывающих рассеивание и распространение вредных веществ в атмосфере. Они ориентированы на приблизительные экспресс-оценки последствий выбросов в условиях дефицита времени и информации.

Однако, по оценкам специалистов многие методики рассеивания основаны на многочисленных исходных параметрах, ориентированы на квалифицированных пользователей и «учитывают наихудшие условия для рассеивания загрязняющего вещества» [47]. Такой подход способен негативно влиять на адекватность реагирования при скоротечности инициирующих событий.

Анализ исследований [48,49] показал, что все существующие подходы к прогнозированию оперативной обстановки могут быть условно разделены на следующие категории:

теоретические (априорные) подходы, основанные на известных представлениях о процессе распространения примесей с использованием, в частности, решений уравнения турбулентной диффузии,

статистические (апостериорные) подходы, позволяющие анализировать области атмосферных загрязнений с использованием метеоданных и результатов полевых наблюдений.

Приведенный в обзоре [50] анализ методик расчета рассеивания показал, что статистические модели (например, регрессионные картографические модели), в настоящее время находят широкое применение для описания пространственного распределения примесей в городской атмосфере. Вместе с тем, в публикации [51] отмечено, что сложность задачи анализа и прогнозирования последствий загрязнения обусловлена проблемами «в понимании реальных физических процессов», сопутствующих выбросу АХОВ.

Разработка достоверного прогноза невозможна без учета основных условий распространения выброса и факторов образования зоны загрязнения (эмиссии, ветрового массопереноса, турбулентной диффузии, седиментации) [102]. Поэтому, в расчетные модели прогноза [47] включены многочисленные параметры, которые разделены на основные типы:

параметры источника выброса (химический состав и физические свойства загрязняющих веществ, количественная оценка выброса, сценарии аварии) [52];

параметры метеоусловий выброса (направление и скорость ветра, температура воздуха и т.д.);

параметры конфигурации местности (схемы застройки, характеристики ландшафта и шероховатости окружающей среды) [53].

Но каждая конкретная ЧС характеризуется специфическими условиями и уникальными особенностями, которые невозможно воспроизвести с помощью предварительных натурных экспериментов.

Особенности рельефа местности, нестационарность и вероятностный характер условий выброса ограничивают возможности использования аналитических методов для расчета опасной зоны загрязнения при локальном масштабе аварии. Априорная неопределенность, недостаточность или неточность исходных данных может привести к ошибкам прогноза. В этих условиях схема обработки аварийной ситуации должна учитывать фактическую оценку последствий загрязнения территории и формировать прогноз развития аварийной ситуации на основе сравнения результатов прогнозирования последствий ЧС с данными мониторинга местности [54]. Минимизация отклонений между прогнозируемыми и реальными данными является основой для настройки параметров прогноза [55].

Развиваемые за рубежом подходы к обработке данных мониторинга обычно соотносят с так называемыми *методами оценки параметров источника* STE (Source term estimation) [38]. Такая оценка основана на алгоритмах градиентного поиска, имитации отжига (S. Kirkpatrick, L.C. Thomson) и генетического отбора (C.T. Allen, G.S. Haupt).

Байесовские подходы к STE основаны на методах Монте-Карло по схеме марковских цепей MCMC (E. Yee, A. Keats) и последовательном методе Монте-Карло SMC (A. Gunatilaka, B. Ristic). Для решения задачи STE применяются различные классы моделей атмосферной дисперсии - от простых гауссовых моделей до сложных вычислительных моделей (P. Kumar, A.A. Feiz, S.K. Singh, P. Ngae, G. Turbelin).

1.3.2 Подходы к прогнозированию на основе данных мониторинга

Данные наблюдений, используемые при апостериорном подходе к разработке прогноза обычно ограничены с точки зрения типа и частоты наблюдений, поэтому возникает задача количественной оценки «близости прогноза к фактической обстановке» при существующих неопределенностях прогноза, ошибках дискретизации и измерений [56].

Следует учесть, что результаты наблюдений могут быть представлены в виде массива многократных точечных измерений концентрации [57] или в виде ряда «интегрированных во времени» замеров (например, при измерениях дозы облучения [58-59] или степени осаждения вещества [60-61]).

Методы оценки параметров источника условно разделены на две категории: методы, основанные на оптимизации, и вероятностные методы.

Методы первой категории позволяют определить местоположение источника выброса на основе поиска минимального отклонения между наблюдаемыми и прогнозными значениями концентрации веществ [62-64].

В методах второй категории для идентификации источника используется байесовский вывод, позволяющий оценить распределение вероятностей параметров выброса АХОВ на основе данных полевых наблюдений. Для нахождения апостериорного распределения используются методы получения выборки, такие как Марковские цепи по схеме Монте-Карло или последовательный метод Монте-Карло. Время вычислений в этом случае может существенно возрасти, что является одним из недостатков вероятностных методов. Развернутый обзор методов представлен в публикации.

Геостатистические методы позволяют предсказывать значения переменных в неизвестных точках на основе измеренных данных в известных точках [65]. К детерминированным методам пространственной интерполяции относятся метод ближайшего соседа, линейной интерполяции, триангуляции Делоне, полигонов Вороновского и обратных расстояний из-за их простоты и вычислительной эффективности. Для оценки зоны химического загрязнения целесообразно использовать *метод кригинга*, используемый для предсказания значений случайного поля на основе наблюдений в других местах. Результаты клиринга представлены вариограммой, которая отображает вариацию между парами замеров в зависимости от расстояния между ними.

Байесовский подход для оценки неопределенностей, связанных с описанием сложных атмосферных процессов, оперирует как априорными данными, так и данными полевых наблюдений. Этот подход обеспечивает

обновление априорных предположений о параметрах распределения загрязнения с учетом наблюдаемых данных.

Для оценки соответствия измеренных и прогнозируемых наблюдений применяется функция правдоподобия. Информация о параметрах и их неопределенности извлекается из апостериорной статистики, которая характеризуется средним значением и стандартным отклонением величин.

Для разрешения проблемы «проклятья размерности» используются различные алгоритмы выборки, такие как: Марковские цепи Монте-Карло (MCMC) и методы Монте-Карло с последующим обновлением (SMC). Суть метода MCMC заключается в построении цепи Маркова, которая эволюционирует к апостериорному распределению [66, 67]. Для генерации новых состояний цепи Маркова и определения их приемлемости предложено множество алгоритмов, например, алгоритм Метрополитса-Гастинга. Алгоритмы представленного выше STE - подхода к оценке характеристик ИХЗ также позволяют сформировать апостериорные представления о метеорологических условиях инцидента [68] и параметрах стохастической диффузии [69].

Как указано в [70], основная проблема «дефицита» данных, влияющих на надежность и достоверность прогноза, является общей проблемой статистического анализа. Уменьшение объема измерений повышает чувствительность алгоритма к случайным шумам и выбросам данных, что может привести к некорректным выводам и ошибкам в оценке параметров [71].

Байесовские методы имеют преимущество в отображении оценок источника с соответствующими уровнями достоверности, но требуют повышенных затрат вычислительных ресурсов [72], что особенно актуально при использовании сложных алгоритмов компьютерной гидроаэродинамики.

Основное преимущество *подхода нейронных сетей* заключается в возможности аппроксимации сложных нелинейных функций в задаче обратного моделирования последствий выброса АХОВ, которая содержит множество переменных и потенциально нелинейные взаимодействия.

Однако, существует ряд проблем, ограничивающих возможности практического применения алгоритмов нейронной сети. К ним относятся, прежде всего, проблемы теоретического обоснования алгоритмов сети, а также проблемы обучения сети на доступных данных.

При небольшом объеме обучающей выборки алгоритм сети способен «переобучиться» и некорректно обобщать новые данные. В задачах обратного моделирования такой алгоритм эффективен только для вариантов аварии, по фактическим данным которых он был обучен. В отличие от других алгоритмов, таких как «решающие деревья», алгоритмы нейронных сетей фактически являются «черными ящиками». Отсутствие интерпретируемости таких алгоритмов способно негативным образом влиять на ситуационный анализ аварии. Использование нейронных сетей и других алгоритмов машинного обучения требует больших объемов данных для обучения и валидации моделей, что проблематично в условиях ограниченности или отсутствия фактических данных при оперативном реагировании на ЧС. В этих условиях целесообразно использовать синтетические данные моделей прогноза.

Таким образом, хотя некоторые алгоритмы нейронной сети уже существуют и демонстрируют обнадеживающие результаты [73], этот подход все еще активно развивается. Многие аспекты работы с такими алгоритмами, такие как сбор и обработка данных, выбор подходящей архитектуры сети, обучение и валидация модели, требуют дальнейшего изучения и развития.

1.3.3 Прогнозирование с использованием клеточных автоматов

Временные затраты на поиск опорного решения напрямую связаны с числом итераций в имитационном эксперименте, а скорость вычислений является основным показателем АСППР, даже в случае некоторого снижения точности прогноза. Поэтому дальнейшие исследования были связаны с разработкой простых и универсальных алгоритмов прогнозирования, обеспечивающих быстроедействие и точность расчетов.

Клеточно-автоматный подход [74-75] является одним из наиболее эффективных подходов к разработке таких алгоритмов. В данном подходе вся пространственно-временная область выброса представлена в виде массива ячеек расчетной сетки, и каждая ячейка такой области может находиться в одном из нескольких состояний [76-77].

Алгоритмы клеточных автоматов основаны на концепции локальности [78]. Клетка КА обновляется на основе состояний близлежащих клеток в соответствии с набором решающих правил. Эти правила просты и неизменны во времени, но могут варьироваться в пространстве. При функционировании КА проявляется синергетический эффект, который не характерен для поведения отдельной частицы. КА-алгоритмы могут быть применены для прогнозирования различных процессов, включая физические, химические и биологические, что делает этот подход удобным для оценки оперативной обстановки.

Клеточные автоматы являются универсальными и гибкими, что позволяет моделировать множество различных сценариев, но они часто сфокусированы на определенных аспектах процесса или явления. Клеточный автомат не учитывает сложные химические реакции или метеорологические эффекты без дополнительной модификации или дополнения другими моделями [79].

В [45] отмечается, что изменение концентраций примесей зачастую имеет квазистационарный характер. В таких случаях временной фактор исключают из уравнений, описывающих процесс распространения ЗВ. Следует также отметить работу [80], в которой описывается концепция пространственных динамических процессов, которые происходят на поверхности Земли.

Клеточные автоматы представляют собой класс моделей, которые могут быть использованы для моделирования распространения некоторого процесса в пространстве и времени, поскольку они хорошо подходят для представления таких явлений, как бегущие волны или распространение фронта пожара. Детальные обзоры КА-алгоритмов приведены в публикациях [81-82].

1.4 Проблемное поле и постановка задачи исследования

1.4.1 Ограничения прикладной области исследования

Для определения ограничений прикладной области исследования использована классификация выбросов АХОВ, предложенная В.И. Романовым [83], которая детализирует ключевые факторы рассеивания АХОВ и характеризует ситуации при авариях с выбросом опасных веществ (рисунок 1.4).

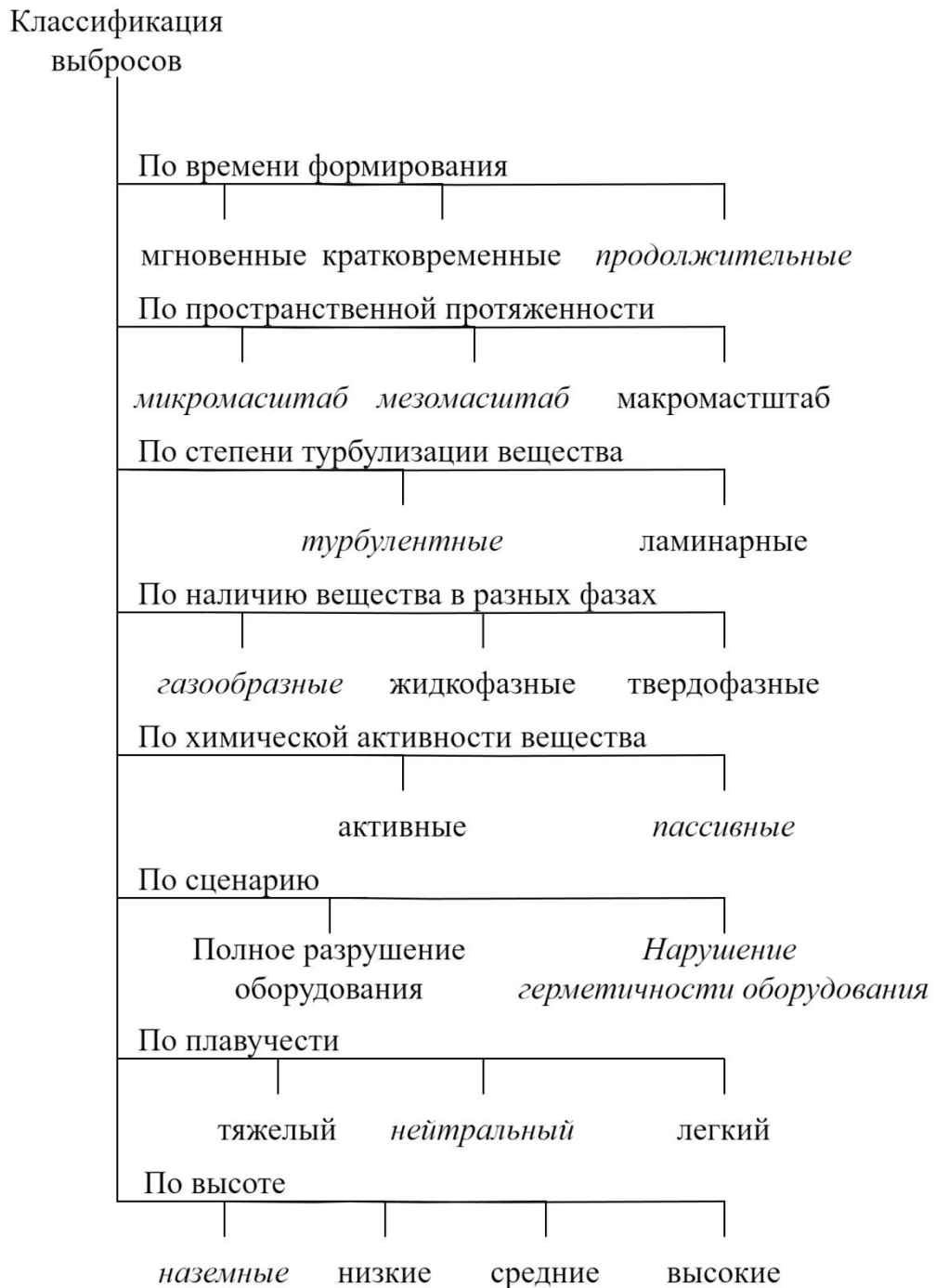


Рисунок 1.4 - Классификация выбросов АХОВ [83]

Основаниями для представленной на рисунке 1.4 классификации являются: длительность; пространственная протяженность; степень турбулизации вещества; фазы состояния и химическая активность загрязнителя.

Область исследования ограничена вариантами турбулентных, пассивных выбросов в атмосферу при микро- и мезо- уровне масштаба аварий. Рассматриваются примеры продолжительных выбросов АХОВ для случая стационарного расположения источника загрязнения.

В работе [84] проанализировано три масштаба представления атмосферного потока: *микромасштаб* (<1 км) описывает сложный поток, зависящий от характеристик поверхности; при *мезомасштабе* (1-1000 км) в потоке учитываются гидродинамические эффекты и неоднородности энергетического баланса; на *макромасштабе* (>1000 км) - поток связан с синоптическими явлениями и распределением барических систем.

В условиях оперативного реагирования на ЧС зачастую не представляется возможным обосновать точную схему размещением датчиков. Однако, как показано в [29], наиболее существенными являются наблюдения и измерения, выполненные непосредственно на оси выброса.

Возможности оперативного реагирования при выбросах АХОВ определили требования к максимальному радиусу визуализации, величина которого составила 10 км (уровни микро- и мезо- масштабов). При таком радиусе существуют возможности сбора, обработки и передачи данных мониторинга, в том числе, по беспроводным каналам связи. Радио-модем с мощностью 0,5-3 Вт функционирует на дальности до 10 км в условиях прямой видимости [85]. Новые технологии LPWAN (Low Power Wide Area Network) покрывают зоны на расстоянии до 10 километров с минимальным потреблением энергии и способны обеспечить функционирование систем мониторинга при удаленном расположении датчиков [86].

В представленном далее исследовании воспроизводился турбулентный режим течения газа. Турбулентность является наиболее распространенным видом движения сплошных сред и присутствует во многих явлениях [87]. С

удалением от источника выброса влияние эффектов, обусловленных гравитационным рассеиванием, постепенно ослабевает. Доминирующей силой в процессе распространения примеси становится атмосферная турбулентность, которая вызвана ветровыми потоками, конвекцией и шероховатостью поверхности. На больших расстояниях от источника выброс разбавляется, и его плотность приближается к плотности воздуха.

При прогнозировании последствий аварии в условиях оперативной обстановки зачастую приходится упрощать расчеты [88]. Реализация сложных алгоритмов рассеивания, учитывающих реакционную способность вещества, приводит к существенным временным затратам на расчет последствий выброса и снижает эффективность мер оперативного реагирования на ЧС.

В случае, если выброшенное вещество не влияет на атмосферный поток [89], то оно считается «пассивным», и его рассеивание осуществляется окружающим потоком. Поэтому расчеты атмосферного потока и дисперсии загрязняющих веществ могут быть разделены, что позволяет использовать разные типы алгоритмов для каждого из этих процессов. Таким образом, для расчета карты загрязнений необходимы данные метеорологической модели, а также результаты прогноза рассеивания примеси.

При разработке комплексной системы были учтены особенности выбора алгоритма прогнозирования в зависимости от свойств загрязняющего вещества. Например, в системе ALOHA [90] для воспроизведения последствий выброса хлора обычно выбирается алгоритм дисперсии плотного (тяжелого) газа DEGADIS. При переносе и рассеивании примеси содержание ТХВ в облаке выброса постепенно снижается и выброс становится «менее плотным». Поэтому, при достижении определенной плотности выброса в данной системе реализован переход на алгоритм Гаусса.

1.4.2 Постановка задачи исследования

Системный анализ подходов к прогнозированию последствий выброса загрязняющих веществ позволяет рассматривать алгоритмическое обеспечение

разрабатываемой системы в виде комплекса взаимосвязанных алгоритмов обработки информации. Во внутреннем контуре такого комплекса формируется результат прогноза, во внешнем контуре - по данным химической разведки местности рассчитываются параметры прогнозной модели (прогноза).

В качестве каркаса для разработки системы прогнозирования и визуализации последствий аварий на химически опасном производстве выбрана методология функционального моделирования *IDEF0*, которая позволила структурировать все этапы исследования (рисунок 1.4):



Рисунок 1.5 - Двухконтурная обработка информации в системе прогнозирования и визуализации согласно методологии *IDEF0*

1. Формирование алгоритмов для внутреннего контура системы, позволяющих прогнозировать последствия турбулентных выбросов АХОВ в атмосферу при микро- и мезо-уровневом масштабе аварий.
2. Выявление параметров прогноза, обрабатываемых во внешнем контуре системы. Определение области допустимых значений этих параметров.
3. Выбор и обоснование критериальных показателей, формирующих целевую функцию оценки эффективности прогноза.

4. Выбор и обоснование алгоритмов параметрической настройки прогнозных моделей.
5. Практическая реализация и внедрение разработанных алгоритмов с учетом возможностей визуализации явлений локального масштаба.
6. Экспериментальное исследование алгоритмов комплексной системы с использованием фактических данных полевых замеров.

Формализация задачи. Подход основан на поиске параметров прогноза, которые обеспечивают минимальное отклонение результатов прогнозирования последствий ЧС от данных мониторинга местности. Для количественной оценки близости или отклонения концентрации ТХВ в каждой паре наблюдение $C_i^d(x,y,z,t)$ - прогноз $C_i^m(x,y,z,t)$ использовано выражение (1.1):

$$\Delta = F(C_i^m(x,y,z,t), C_i^d(x,y,z,t)), \quad (1.1)$$

где $F(*,*)$ - критериальная оценка прогноза, $i = \overline{1, M}$ - номер пары, M - число пар.

Задача поиска параметров прогноза представлена следующим образом: на основе данных мониторинга $C_i^d(x,y,z,t)$ и априорно заданных параметров P_{const} оценки оперативной ситуации определить значения варьируемых параметров P_{var} прогноза $C_i^m(x,y,z,t)$, которые доставляют минимум целевой функции (1.2):

$$\Delta = F(C_i^m(x,y,z,t), C_i^d(x,y,z,t)) \rightarrow \min \quad (1.2)$$

при ограничениях: $(P_{\text{var}})_{\text{н}} \leq P_{\text{var}} \leq (P_{\text{var}})_{\text{в}}$, индексами «н» и «в» обозначены нижние и верхние пределы изменения параметров.

Таким образом, при оперативном реагировании на последствия выброса ЗВ наиболее важной является информация о размерах и конфигурации зоны химического загрязнения местности. Для визуализации и анализа такой информации обычно используют АСППР, в которых недостаточно широко распространен механизм обратной связи с корректировкой параметров прогнозной модели. Результаты проведенного анализа показали, что для разработки алгоритмического обеспечения такой системы могут быть применены методы оценки параметров источника, а также алгоритмы клеточных автоматов.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕСТНОСТИ

2.1 Особенности предлагаемого подхода

2.1.1 Известные подходы к оценке характеристик источника

Согласно [72], ATD (Atmospheric Transport and Dispersion) модели атмосферного переноса и рассеивания, будь то «модели быстрого реагирования» или вычислительные модели гидроаэродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics) [91], активно применяются при разработке планов реагирования и управления качеством воздуха, а также в ходе расследования причин аварии [92]. ATD модели позволяют воспроизвести последствия аварии с учетом известных атмосферных условий, мощности выброса и места расположения ИХЗ.

Показания очевидцев, фото- видеоматериалы или спутниковые снимки места ЧС также могут характеризовать выброс, но такая информация ограничена с точки зрения пространственного и временного разрешения. Подобные сведения не всегда доступны в условиях облачности или сложного рельефа местности.

Представленные в разделе 1.3.1 методы оценки параметров источника STE (Source term estimation) обеспечивают расчет параметров ATD моделей на основе данных мониторинга. Процедура обратного моделирования, используемая в алгоритмах STE [38], связана с обработкой зашумленных и разреженных входных данных (обусловленных неустойчивыми атмосферными условиями и «шумами» датчиков). Некоторые алгоритмы STE основаны на подходе сопряженного отношения «источник-рецептор» [94], при котором датчики представлены источниками выброса, а направление ветра - инвертируется.

В обзоре [38] показано, что алгоритмы STE обеспечивают высокую производительность в сценариях с небольшим или отсутствующим шумом, простой плоской средой, большим количеством датчиков и одним источником. В реальных сценариях эти условия не выполняются. В частности, застройка местности приводит к зоне рециркуляции поля потока и расщеплению шлейфа

вокруг зданий и сооружений ОПО. Для таких явлений наиболее точным решением является прогнозирование на основе CFD.

Китс [94] продемонстрировал работу «решателя STE» на основе CFD в условиях городской застройки, используя набор данных эксперимента Joint Urban 2003 [95]. Кумар и др. [96] успешно использовали алгоритмы STE для прогнозирования выбросов в городской застройке на основе испытаний Mock Urban Setting Test [97]. Однако такие решения являются «затратными в вычислительном отношении» [72].

В соответствии с работами Я. З. Цыпкина, Б. Уидроу и С. Стирнза задача адаптации сложной системы, к которой может быть отнесена система с «решателем STE», сводится к задаче поиска экстремального значения некоторой целевой функции в условиях недостаточной априорной информации [93]. В [98] отмечено, что подобные системы оценивания неизвестных выбросов в атмосфере состоят из трех компонентов:

1. Первый компонент - сеть рецепторов (датчиков) для обнаружения ЗВ, измеряющих их концентрации в различных точках.
2. Второй компонент представляет собой модель атмосферной дисперсии для прогнозирования концентраций ЗВ в пространстве и времени.
3. Третий компонент - алгоритмы интеграции (или ассимиляции) для объединения измеренных концентраций с моделями атмосферной дисперсии с целью определения параметров неизвестных выбросов.

Эти компоненты позволяют оценивать характеристики источника выбросов ЗВ в атмосферу на основе ограниченного набора измерений концентрации. В системе с «решателем STE» формируются прогнозные оценки координат расположения, мощности и других параметров ИХЗ.

Схема обработки информации в подходе STE (рисунок 2.1) содержит внутренний и внешний контуры обработки информации.



Рисунок 2.1 - Схема обработки информации в подходе STE [38]

Вопросам сбора и обработки информации *во внешнем контуре* системы посвящено множество исследований [99]. При выборе алгоритмов *внутреннего контура* обычно прибегают к классическим моделям рассеивания примеси. В трудах Т.О. Spicer, and J. A. Havens, приведено сравнение гауссовых моделей и моделей тяжелых газов. Подходы к формированию целевой функции при валидации моделей рассеивания примесей отражены в трудах S.R. Hanna и J. Chang. Вопросы свертки многоцелевой функции также подробно изложены в исследованиях Р. Goodwin и D. Thevenin.

Метод скользящего окна [100] позволяет обобщить данные полевых наблюдений и сформировать обучающую выборку для построения модели прогноза. Размеру окна соответствует заранее определенный временной интервал обработки информации. При выборе размера скользящего окна учитывается возможность обработки данных в реальном времени. Большой размер окна

приводит к ошибкам прогноза для быстро меняющихся условий. Возникают пропуски значений и выбросы величин в массиве накопленной информации. В таких случаях на практике используют алгоритмы восстановления данных с последующей оценкой достоверности результатов.

2.1.2 Метод прогнозирования последствий аварии

В отличие от рассмотренного выше STE подхода, когда на основе данных полевых замеров концентрации оцениваются неизвестные характеристики ИХЗ, в предлагаемом методе формируется оценочная информация о размерах и конфигурации зоны химического загрязнения местности при аварийных выбросах химически опасных веществ на опасных производственных объектах.

Основой [29] для реализации данного метода является обобщенная схема обработки аварийной ситуации, которая представлена на рисунке 2.2. Схема обработки охватывает процедуры мониторинга состояния объекта (блок 1) и прогнозного моделирования (блок 2).

На стадии мониторинга, после топологической привязки датчиков наблюдения (блок 1.1), осуществляется комплекс мероприятий, связанный с расчетом периода опроса датчиков (блок 1.2) и разрешением вопросов организации программно-аппаратного интерфейса между датчиками и платформой СППР. Если такой интерфейс отсутствует, то концентрации ТХВ в местах наблюдений $C_i^d(x,y,z,t)$ (блок 1.2) и координаты расположения датчиков (x, y, z) поступают в СППР в ручном режиме.

На стадии моделирования, априорные данные по аварии (блок 2.1) используются при расчете параметров модели (блок 2.2), которые служат основой для построения полей концентраций и вычисления площади поражения ТХВ (блок 2.3). С учетом координат расположения датчиков наблюдений осуществляется расчет концентрации ТХВ в местах наблюдений $C_i^m(x,y,z,t)$ (блок 2.4).

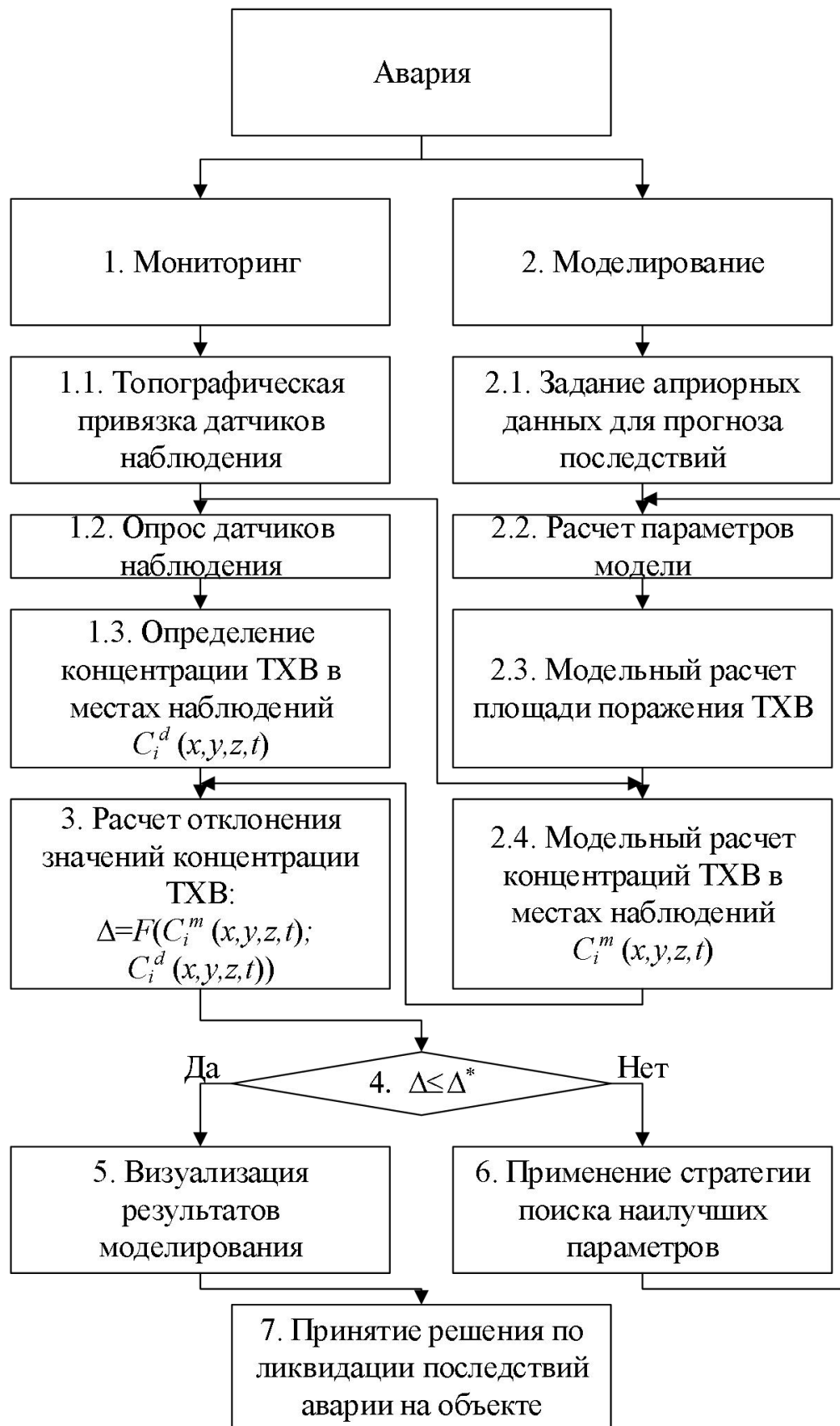
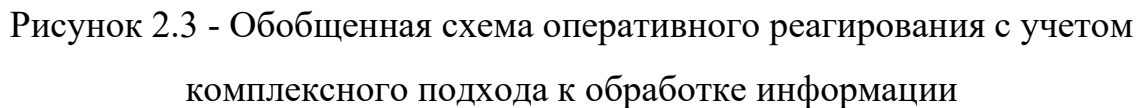


Рисунок 2.2 - Схема обработки аварийной ситуации

Поиск наилучших параметров в блоке 6 основан на решении задачи минимизации отклонения Δ на множестве возможных параметров прогноза P_{var} .



2.2.1 Классификация алгоритмов рассеивания

Современные подходы к разработке алгоритмов модельного расчета распределения примесей представлены в публикациях: Н.В. Мензелинцевой, С.А. Богомолова, С.Б. Дьякова (альтернативные подходы) [48]; И. Г. Григорьевой, Ю. А. Тунаковой, Р. А. Шагидуллиной (в приземном слое) [103];

Е.В. Сысоевой, М.О. Гельмановой (в городской атмосфере) [50]; Х. Г. Асадова, Р. Ш. Маммадли (пространственный анализ данных) [104].

К основным моделям прогнозирования относятся [105]: box-модели, модели Гаусса, Лагранжа, Эйлера, вычислительные гидродинамические модели. Детальные обзоры таких моделей, а также программных средств и систем моделирования качества воздуха (air quality modelling) приведены в монографии В.М. Панарина [54] и в исследовании [106].

Наиболее удачная классификации моделей рассеивания примесей была составлена Э. Вебером в 1982 году [107-108]. В классификации представлены детерминированные, статистические и физические модели.

Детерминированные модели предсказывают поведение примесей в атмосфере на основе установленных законов физики. Стационарные модели, которые предполагают, что условия в окружающей среде остаются постоянными во времени. Стационарная Гауссова модель является наиболее известным примером такого подхода. Гауссовы модели обеспечивают быстрые и эффективные расчеты зоны загрязнения. Однако они разработаны для идеальных условий выброса [108].

В детерминированной категории также есть модели с зависимостью от времени, которые учитывают временные изменения условий выброса. Среди таких моделей наиболее популярными являются Эйлеравы модели и Лагранжевы модели [109].

Эйлеравы модели обеспечивают высокую точность прогнозирования, учитывают сложные атмосферные условия и взаимодействие с рельефом местности. Высокая сложность таких моделей приводит к значительным затратам вычислительных ресурсов, что критично на этапе ликвидации ЧС.

Лагранжевы модели реализованы на основе более простых подходов, но при моделировании сложных атмосферных условий и при «больших» выбросах они приводят к менее точному прогнозу. Они эффективнее Эйлеравых моделей в вычислительном плане, но имеют ограничения в точности предсказаний.

Наконец, box-модели являются самыми простыми из всех классов моделей, но они не учитывают многие важные факторы выброса. Они целесообразны для экспресс-анализа ситуации, но приводят к значимым ошибкам при детальном моделировании.

Статистические модели формируются на основе универсальных методов статистической обработки результатов. К этой категории относятся, например, регрессионные модели, определяющие зависимости между концентрациями примеси и другими переменными. Эмпирические модели, основанные на полевых наблюдениях, разрабатываются с использованием различных эмпирических и статистических методов обработки информации.

При выбросе плотных загрязняющих веществ наблюдается изменение атмосферных потоков в области выброса. По этой причине существует два популярных подхода к моделированию дисперсии загрязняющих веществ: пассивная дисперсия гауссовского типа и плотная газовая дисперсия. Главное отличие между ними - форма профиля концентрации: «колокол» для подхода Гаусса и прилегающий к земле плоский профиль для плотного газа [110].

Первый подход применяется для имитации последствий выбросов с параметрами, близкими к параметрам окружающей среды [5].

Второй подход используется для описания больших выбросов холодного или тяжелого газа, при которых выделившееся вещество влияет на атмосферный поток.

Рассмотрим примеры практически используемых алгоритмов.

Аналитические алгоритмы. К аналитическим интегральным моделям относят модель DEGADIS (DEnse GAs DISpersion) [90], которая применяется для оценки краткосрочной концентрации ЗВ в окружающей среде и анализа ожидаемой области загрязнения при превышении пороговых значений такой концентрации. Она актуальна в случаях выброса плотного (тяжелого) газа, когда замеры превышают опасные уровни концентрации.

В РФ активно используются методики расчета последствий аварий и количественной оценки риска и программные продукты линейки TOXI+ [111].

Методика ТОКСИ-2 была основана на Гауссовой модели рассеивания газов для расчета пассивного рассеивания веществ, которая могла привести к искажениям при работе с «тяжелыми» газами. Поэтому в методике ТОКСИ-3 введены расчеты для плотного газа. В 2006 г. вышла версия 3.0 ПС ТОХИ+, которая включает новые элементы интерфейса, управляющую оболочку, графическую подложку, расширяемый набор модулей и базу свойств ОВ, что привело к ее широкому распространению.

Аналитические модели, предоставляют значительные преимущества при обратном моделировании выброса атмосферных загрязнителей, особенно в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС). Такие модели обеспечивают высокую скорость расчетов по сравнению с более сложными численными моделями, и могут быть эффективно использованы персоналом в ЧС без глубоких знаний в области аэродинамики или численного моделирования. Они способны адекватно прогнозировать распространение тяжелых газов в атмосфере, что критически важно для оценки угрозы и ликвидации последствий ЧС.

Тем не менее, в аналитических моделях обычно учитывается значительное количество исходных переменных, что усложняет процесс их настройки. В этом случае проблемой является не скорость расчета, поскольку такие модели являются наиболее эффективными, а выбор предпочтительного варианта решения среди множества возможных.

Компьютерная гидроаэродинамика (CFD) использует численные методы для совместного решения уравнений атмосферного потока и процесса рассеивания. CFD - модели учитывают взаимодействие между потоком воздуха и рассеиванием загрязнителей, а также сложные факторы, такие как рельеф местности, препятствия и химические реакции. Они работоспособны в случаях сложного поведения потока воздуха и рассеивания непассивных примесей.

Достоинствами использования CFD-моделей является возможность обеспечения более точных прогнозов распространения вещества по сравнению с моделями Гаусса, поскольку они учитывают большинство актуальных факторов, сопутствующих выбросу АХОВ. Существенной проблемой являются

затраты вычислительных ресурсов, необходимые для этого класса моделей, особенно в задачах обратного моделирования.

Адекватный прогноз с использованием CFD-моделей основан на большом объеме исходных данных, которые могут быть недоступны, особенно во время ЧС. Как и в аналитических моделях, процедура настройки параметров таких моделей может привести к «Парето-фронту» возможных решений с привлечением экспертов для выбора более предпочтительного варианта [135].

Модель вычислительной гидродинамики (CFD) использована для оценки влияния сложной конфигурации местности на рассеивание веществ в масштабе городского квартала [150]. Методы реконструкции событий ER (Event Reconstruction) на основе Гауссовской модели применены для прогноза рассеивания примеси на плоской местности в масштабе нескольких километров [68-69]. Модель Лагранжа использована для определения местоположения радиоактивного выброса в Альхесирасе (Испания) при континентальном масштабе выброса с переменными метеорологическими условиями [112].

2.2.2 Свойства клеточных автоматов

Выбор алгоритмов КА обусловлен следующими причинами [113, 79, 114, 115]:

1. Правила синхронного или асинхронного обновления в КА достаточно просты и могут быть интерпретированы в терминах физических процессов, таких как перенос, диффузия, химические реакции.

2. КА имеет элементарную структуру данных (обычно двухмерный или трехмерный массив ячеек) и эффективен с точки зрения использования памяти и процессорного времени.

3. Алгоритм КА может быть распараллелен, что обуславливает возможности его реализации на основе многоядерных и распределенных вычислительных системах.

4. Область моделирования выбросов на основе КА учитывает поле ветра и поле преград. Поле ветра вводится в модель как внешний фактор, который

влияет на движение вещества. Поле преград формирует статическую характеристику пространства.

5. КА - алгоритмы обладают быстроедействием, ограниченным числом входных параметров и упрощенными процедурами параметрической настройки.

Фронтальные клеточные автоматы (FCA - frontal cellular automata) представляют собой класс моделей, которые могут быть использованы для моделирования распространения некоторого процесса в пространстве и времени, поскольку они адекватно воспроизводят представления таких явлений, как бегущие волны или распространение фронта пожара [116].

В результате функционирования FCA формируется область выброса, которая фронтально расширяется с ростом числа итераций. Традиционные правила фронтального КА: ветровой перенос и диффузионное смещение частиц; осреднение полученного массива состояний по ближайшим соседним клеткам; добавление потока с заменой значений концентрации в клетках массива; дискретизация массива состояний для формирования булева массива расширенного фронта.

2.3 Разработка алгоритмов внутреннего контура

Для прогноза последствий выброса при мезо-уровневом масштабе аварий во внутреннем контуре системы в работе предлагается использовать алгоритм Гаусса, при локальном масштабе аварии (микромасштабе до 1 км) - алгоритмы клеточных автоматов.

Среди алгоритмов внутреннего контура распространены алгоритмы стационарных моделей, в которых рассчитывается только пространственное распределение примеси [38]. Небольшая сложность таких алгоритмов существенно упрощает процедуру моделирования, увеличивает скорость вычислений и снижает требования к реализации алгоритмического обеспечения.

Стационарные гауссовы модели обладают преимуществами: они хорошо изучены, учитывают факторы, влияющие на процесс распространения ЗВ (например, скорость ветра и стабильность атмосферы) и не требуют значительных

затрат вычислительных ресурсов. При масштабах ОЗЗ свыше 1 км эффекты от препятствий не сказываются в той степени, в которой меняется картина заражения при локальном масштабе аварии [84].

Приведенные особенности обуславливают возможности выбора алгоритмов модели Гаусса для прогноза последствий АС, но они разработаны для идеальных условий выброса - стационарных и однородных потоков ЗВ, нормального распределения поля концентраций, что не всегда соответствует реальной ситуации. Для похода Гаусса характерны и другие ограничения, такие как: низкая результативность при слабом и изменчивом ветре, недостаточная точность в сложных условиях рассеивания примеси.

При локальном масштабе аварии преобладают специфические факторы рассеивания [84], в число которых входит конфигурация полевых потоков и преград. В данном случае для прогнозирования и визуализации процессов возникновения и развития аварийных ситуаций целесообразно использовать алгоритмы численных моделей.

Существует большое количество таких моделей, которые можно оценить по затратам ресурсов, быстродействию и точности предсказаний, причем данные критерии тесно связаны между собой. Как отмечено ранее, при локальных масштабах аварии в условиях застройки местности для прогноза выбросов АХОВ в работе использованы быстродействующие КА алгоритмы.

2.3.1 Формирование алгоритма расчета на основе уравнения Гаусса

Во время фазы оперативного реагирования для расчета площади поражения (блок 2.3 рисунок 2.2) в работе использовано наиболее известное уравнение Гаусса [5, 117], которое при непрерывном точечном выбросе АХОВ и постоянной скорости ветра, описывается выражением (2.1):

$$C(x, y, z, p, z_0) = \frac{Q^*}{2\pi\sigma_y(x, p, z_0)\sigma_z(x, z_0)U} \exp - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2(x, p, z_0)} \exp - \frac{(z - h)^2}{2\sigma_z^2(x, z_0)} + \exp - \frac{(z + h)^2}{2\sigma_z^2(x, z_0)} \quad (2.1)$$

где $C(x,y,z,p,z_0)$ - концентрация АХОВ [г/м³], Q - интенсивность выброса [г/с], y_0 - координата источника выброса, x, y, z - координаты замеров концентрации; U - средняя скорость ветра [м/с], h - высота источника АХОВ [м], p - категория устойчивости атмосферы, z_0 - коэффициент шероховатости, σ_z и σ_y - параметры вертикальной и горизонтальной дисперсии, величина $Q^*=Qf_Ff_W$ учитывает поправки на обеднение облака, f_F и f_W - коэффициенты сухого и влажного осаждения примеси.

Из уравнения (2.1) следует, что концентрация примеси $C(x,y,z,p,z_0)$ существенно зависит от параметров вертикальной σ_z и горизонтальной σ_y дисперсии, способы оценки которых учитывают классификацию погодных условий и характеристики подстилающей поверхности.

Для расчета параметров вертикальной σ_z и горизонтальной σ_y дисперсии струи примеси в работе использованы распространенные в инженерной практике дисперсионные кривые Смита-Хоскера и формулы Бригса [118].

Дисперсионные кривые Смита-Хоскера определены формулами (2.2-2.4):

$$\sigma_z(x) = \begin{cases} F(z_0, x) \cdot g(x) & \text{если } F(z_0, x) < \sigma_z^{\max}(x), \\ \sigma_z^{\max}(x) & \text{если } F(z_0, x) \geq \sigma_z^{\max}(x), \end{cases} \quad (2.2)$$

$$F(z_0, x) = \begin{cases} \ln[c_1 x^{d_1} (1 + (c_2 x^{d_2})^{-1})], & \text{при } z_0 > 0,1 \text{ м} \\ \ln[c_1 x^{d_1} (1 + c_2 x^{d_2})^{-1}], & \text{при } z_0 \leq 0,1 \text{ м} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$g(x) = \frac{a_1 x^{b_1}}{1 + a_2 x^{b_2}} \quad (2.4)$$

В формулах (2.2)-(2.4) табличным способом заданы: зависимости параметров a_1, a_2, b_1, b_2 от категории устойчивости атмосферы p ; зависимости параметров c_1, d_1, c_2, d_2 от коэффициента шероховатости z_0 ; значения верхней границы $\sigma_z^{\max}(x)$ для различных категорий устойчивости атмосферы. Для определения указанных параметров в работе использован метод кусочно-квадратичной интерполяции табличных данных.

Формулы Бригса представлены соотношениями (2.5)-(2.8):

$$\sigma_y(x) = \frac{c_3(p, z_0) x}{\sqrt{1 + c_4(z_0) 10^{-4} x}}, \quad (2.5)$$

$$c_3 = 10^{a(p) + 3,8 \cdot 10^{-2} (\lg z_0 + 2,816)^2}, \quad (2.6)$$

$$c_4 = (10 - z_0)^{0,21 + 0,13 \lg(10 - z_0)}, \quad (2.7)$$

$$a(p) = 7,536 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,1757 p - 0,7, \quad (2.8)$$

где p - параметр устойчивости атмосферы.

Анализ источников [5, 117, 118] показал, что к варьируемым параметрам прогноза на основе уравнения Гаусса (2.1) следует отнести: величину выброса Q^* , коэффициент шероховатости z_0 и параметр устойчивости атмосферы p . На рисунке 2.4 представлена разработанная схема расчета концентрации ЗВ с постоянными и варьируемыми параметрами прогноза.

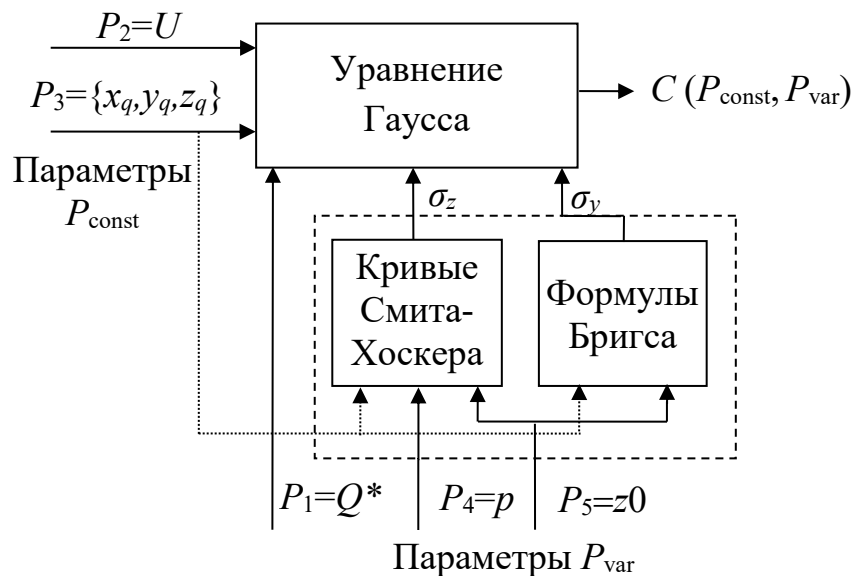


Рисунок 2.4 - Схема расчета концентрации ЗВ на основе уравнения Гаусса с постоянными P_{const} и варьируемыми P_{var} параметрами прогноза

Определены *неизменяемые* параметры прогноза P_{const} : $P_2=U$ - средняя скорость ветра вдоль оси выброса [м/с]; $P_3=\{x_q, y_q, z_q\}$ - координаты источника выброса q , а также *варьируемые* параметры P_{var} : $P_1=Q^*$ - величина выброса АХОВ [г/с]; $P_4=p$ - устойчивость атмосферы; $P_5=z_0$ - коэффициент шероховатости.

2.3.2 Разработка вероятностного клеточно-автоматного алгоритма

Клеточно-автоматный (КА) подход [74] к моделированию газовой динамики, основанный на эмпирических допущениях, простых алгоритмах и решающих правилах, способен не только качественно описать пространственно-временную форму выброса, но и количественно оценить его статистические характеристики. В частности, в работах [75-76] представлены модели асинхронной наивной диффузии Т. Тоффоли и блочно-синхронной диффузии (ТМ-диффузии) с окрестностью Н. Марголуса.

Интерес представляет алгоритм клеточной модели диффузии с окрестностью фон Неймана при следующих предположениях [119]:

1. Плоского случая представления области выброса в виде массива клеток регулярной двумерной решетки, горизонтальные размеры которых соответствуют масштабу отображения данных на карте. Концентрация примеси в окрестности ячейки имеет усредненное относительно высоты z значение, которое может быть использовано для оценки изоплант концентрации.

2. Комплексного подхода к задаче моделирования процессов, сопутствующих выбросу (процессов эмиссии, ветрового массопереноса, диффузии и седиментации) и требующего учета множества факторов, связанных с метеорологическим состоянием атмосферы, условиями выброса и рассеивания примеси на прилегающей местности.

3. Вероятностного характера модели клеточного автомата, обусловленный уникальностью и спецификой условий выброса токсичных веществ. Функции распределения параметров являются случайными, с заранее неизвестными вероятностными свойствами. При гипотезе о нормальности закона распределения функций, существует возможность расчета изоплант концентрации по данным измерений, а также интервальной оценки площади зоны заражения с заданной по «правилу трёх сигм» доверительной вероятностью [120, 126].

Для описания последствий выброса опасных химических веществ применена модель черного ящика, преобразующего конечное множество P

входных параметров в ограниченный массив Y выходной информации с учетом массива V внутреннего состояния объекта. Кортеж $\langle P, Y, V, \Psi_1, \Psi_2 \rangle$ определяет функцию преобразования $\Psi: P \rightarrow Y$, $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2\}$, компонентами которой является функция переходов $\Psi_1: P \times V \rightarrow V$, формирующая внутреннее состояние автомата и функция выходов $\Psi_2: V \times Y \rightarrow Y$, отображающая результаты моделирования.

Разработанный алгоритм [119] модифицирует традиционные правила КА (FCA) на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло), при котором облако примеси моделируется в виде ансамбля пробных частиц, заполняющих ячейки поверхности с учетом эффектов взаимодействия с препятствиями. Алгоритм содержит процедуры инициализации, генерации и переноса частицы, формирования карты концентрации.

На рисунке 2.5 представлена разработанная схема расчета концентрации ЗВ на основе вероятностного КА с постоянными и варьируемыми параметрами прогноза. Основные параметры прогноза: $P = \{m^*, \sigma^*, B, K, Q^*, U^*, x_0, y_0, c_{SPZ}\}$ разделены на *неизменяемые* параметры P_{const} : m^* - математическое ожидание полярного угла выброса (или направления ветра) [градусы $^\circ$]; B - массив преград; K - величина конфигурации застройки; U^* - скорость ветра [м/с], c_{SPZ} - минимальная концентрация загрязнителя [г/м³]; x_0, y_0 - координаты источника (индекс сектора), а также *варьируемые* параметры P_{var} : Q^* - интенсивность выброса [кг/с]; σ^* - среднеквадратическое отклонение полярного угла выброса [градусы $^\circ$]. Выходная информация прогноза Y представляет собой поле концентрации вещества.

Рассмотрим схему работы вероятностного КА алгоритма.

Инициализация алгоритма. Вся область выброса представлена в виде множества Ω равных по площади клеток поверхности, структура которого делится на четыре составляющие: Ω_1 - внутренние клетки среды; Ω_2 - клетки границ, Ω_3 - клетки источника, Ω_4 - клетки препятствий, составляющие массив преград, Ω_5 - клетки присутствия примеси, Ω_6 - клетки выполненных замеров: $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_4 \cup \Omega_5$. Клетка характеризуется именем (адресом) $x \in M$, расположенным на множестве имен $M = \{(i, j): i, j = 1, \dots, N_{fs}\}$, N_{fs} - число узлов расчетной сетки

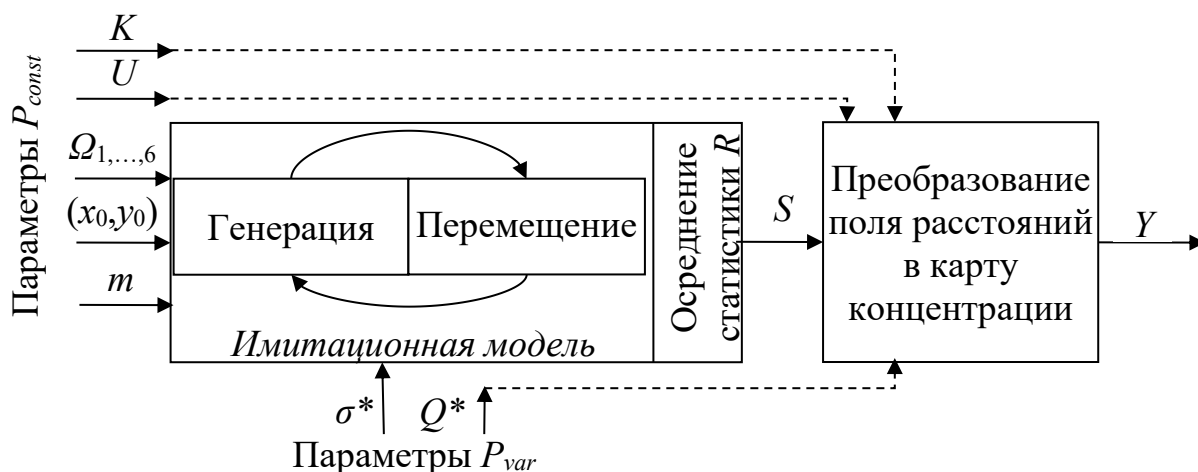


Рисунок 2.5 - Схема расчета концентрации ЗВ на основе вероятностного КА с постоянными P_{const} и варьируемыми P_{var} параметрами прогноза

Центральная клетка с окрестностью фон Неймана имеет шаблон соседства $T(i, j) = \{(i, j), (i, j+1), (i+1, j), (i, j-1), (i-1, j)\}$, который для каждого имени клетки $x \in M$ (кроме клеток на границах расчетной области Ω_2) формирует локальную конфигурацию (T_x окрестность) пяти соседних ячеек.

Генерация и перемещение частицы. При расчете состояния центральной клетки с адресом x шаблона T учитывают два вида взаимодействия соседних клеток: обратное и прямое. На обратном взаимодействии основано моделирование «наивной диффузии», при котором центральная клетка с заданной вероятностью обменивается своим состоянием с одной из клеток шаблона, что характеризует диффузионные свойства «блуждания» частиц с учетом закона сохранения масс.

Рассматриваемый подход основан на прямом взаимодействии, при котором клетка источника на основе некоторого закона распределения генерирует подвижную частицу (фрагмент облака), которая завершает «случайное блуждание» при обнаружении имени первой свободной ячейки. Ячейка изменяет свое состояние и заполняется примесью. В области Ω существует только одна подвижная частица, что исключает коллизии между претендентами и снижает объем вычислений на каждой итерации алгоритма.

В разработанном алгоритме реализован асинхронный режим функционирования КА, при котором правила перехода в цикле «генерация

частицы - заполнение площади» последовательно применяются к ячейке источника $x \in \Omega_3$. После генерации частицы, правила перехода в шаблоне $T(x)$ задаются вероятностной контекстной подстановкой $\Theta_k(x)$, а условия заполнения площади формируются пространственной контекстной подстановкой $\Theta_q(x)$.

Таким образом, функция переходов $\Psi_1: P \times V \rightarrow V$ представлена системой подстановок $\Psi_1(x) = \Phi(\Theta_k(x), \Theta_q(x))$ и имеет следующий вид (2.9-2.11):

$$\psi_1: \{v_0(i, j), v_1(i, j + 1), v_2(i + 1, j), v_3(i, j - 1), v_4(i - 1, j)\} \cdot \{(v_k, x), ((v, x_q))\} \rightarrow \{v_k(i_q, j_q)\}, \quad (2.9)$$

$$\Theta_k: (v_0, x) \rightarrow (v_k, x), k = \begin{cases} 1, \text{если } 0 < rand_{nd} \leq 0,25 \\ 2, \text{если } 0,25 < rand_{nd} \leq 0,5 \\ 3, \text{если } 0,5 < rand_{nd} \leq 0,75 \\ 4, \text{если } 0,75 < rand_{nd} \leq 1 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\Theta_q: (v_k, x) \rightarrow (v, x_q), v = \begin{cases} 0, (i_q, j_q) \in M_1 \\ 1, (i_q, j_q) \in M_2 \end{cases} \quad (2.11)$$

где $rand_{nd}(m^*, \sigma^*)$ - случайное число нормального закона распределения, задающего угловое направление полета частицы с оценкой математического ожидания $m^* = m/360^\circ + 0,125$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma^* = \sigma/360^\circ$.

Расчет траектории частицы с учетом препятствий. Отношение порядка в упорядоченном множестве L_{path} задается правилами полета частицы с адресом $x \in L_{path}$ в T_x окрестности соседних ячеек:

1. Имеется путь L_{path} , состоящий из адресов ячеек X , которые представляют последовательность «шагов» частицы.

2. Отношение порядка на элементах пути L_{path} основано на порядке «шагов» частицы. Последующий шаг определяется таким образом: каждый последующий элемент $(L_{path})_{i+1}$ пути L формируется на основе правил полета частицы в T_x окрестности ячеек, соответствующей текущему элементу $(L_{path})_i$.

3. Порядок элементов в пути L_{path} может быть установлен на основе возрастающего порядка «шагов» частицы.

Основные правила перемещения частицы:

1. Соседняя ячейка свободна и принадлежит множеству внутренних клеток среды $x \in \Omega_1$. Процедура формирования пути L_{path} завершается заполнением конечной ячейки.
2. Соседняя ячейка принадлежит множеству клеток присутствия примеси $x \in \Omega_5$. Процедура формирования пути L_{path} возобновляется.
3. Соседняя ячейка принадлежит к области препятствий $x \in \Omega_4$, запрещенной для прохода клетки. Новое направление пути L_{path} корректируется.
4. Соседняя ячейка принадлежит к границам $x \in \Omega_4$, ограничивающим движение частиц. Частица завершает свой путь и уничтожается.
5. Частица ранее пребывала в соседней ячейке. В новое направление пути L_{path} вводятся коррективы.

Приведенные правила обусловлены эффектами взаимодействия с препятствиями, проблемами «зависания» частиц в пустотах, а также значительными временными затратами при разбросе направлений полета или движении частиц против ветра. Следует отметить, что часть таких проблем может быть разрешена при использовании данных метеорологической модели.

В схему расчета траектории частицы введены: массив имен частиц L_{pn} и целочисленный массив L_{pv} , фиксирующий число заходов блуждающей частицы в текущую ячейку. Формируется запись о пути движения частицы, необходимая для контроля повторных заходов в соседнюю ячейку.

Если на пути частицы окажется преграда (или ячейка имеет максимальное число проходов среди прочих соседей), то она выпадает из претендентов. Если ячейки в рамках шаблона T имеют одинаковое число проходов, то приоритет задается в соответствии с минимальным отклонением Δ_L между случайной величиной θ_{xn} , и направлением на центр ячейки - претендента (2.12):

$$\Delta_L = \min(|t_k - 0,5|, |t_k - 4,5|, |t_k + 3,5|), \quad (2.12)$$

где $t_k = \theta_{xn} - k$, величина k соответствует контекстной подстановке $\Theta_k(x)$ (2.10).

При выборе последующего шага пути L_{path} приоритетным является количество заходов частицы в соседние ячейки. Таким образом, правила перемещения частицы являются основой для расчета пути «осевшей» частицы.

Обработка массива статистики. Конфигурация пятна загрязнения при фронтальном расширении области выброса характеризует только факт наличия или отсутствия примеси в исследуемой области выброса, поэтому для получения концентрации используется информация о номере «осевшей» частицы, которая накапливается в массиве статистики R .

Одним из подходов к моделированию явлений с большим количеством неизвестных является метод Монте-Карло. Проведение серии экспериментов с осреднением результатов R позволяет повысить устойчивость результатов вероятностного моделирования.

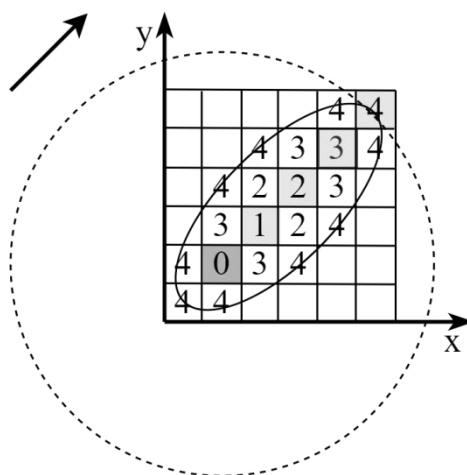
По результатам серии экспериментов рассчитывается усредненное поле расстояний S_x (2.13):

$$S_x = \frac{\sum_{i_{exp}=1}^{N_{exp}} R_{x,i_{exp}}}{N_{exp}}, \quad (2.13)$$

где i_{exp} – номер эксперимента, N_{exp} – размерность серии экспериментов.

Получение карты концентрации. Поле расстояний иллюстрирует рисунок 2.6, на котором изолиния концентрации в виде окружности рассчитана по упрощенной формуле, а изолиния в виде эллипса вычислена на основе обработки экспериментальных данных. Концентрации на оси выброса в обоих случаях совпадают.

В статье [121] сравниваются три модели, используемые для предсказания концентрации загрязнителя в городской среде. Эмпирическая модель SUDC (The Simple Urban Dispersion correlation), формируемая на основе экспериментальных данных и подтвержденная аэродинамическими испытаниями, оказалась наиболее подходящей для описания верхнего предела концентрации и далее была выбрана в качестве основной модели расчета карты концентрации.

Рисунок 2.6 - Поле расстояний S

Две другие модели (BUDM и ASUDM), основанные на моделях Гаусса, также демонстрируют приемлемые результаты, но они недооценивают концентрацию загрязнителя в условиях ветрового канала.

Функция преобразования $\Psi_2: V \times Y \rightarrow Y$ представлена формулой SUDC:

$$Y_x = \frac{QK(S_x c_{size})^{-2}}{U}, \quad (2.14)$$

где Y_x - концентрация загрязнителя в ячейке на уровне земли [кг/м³]; S_x - результирующее расстояние от источника выброса [м]; Q - интенсивность источника выброса [кг/с]; U - средняя скорость ветра [м/с]; c_{size} - размер ячейки [м]; K - коэффициент застройки ($K=3$ в соответствии с [122]).

Проблема численной диффузии. Дискретная природа автоматов, в отличие от лагранжевых моделей, не позволяет за один такт перемещать частицу в произвольном направлении, кроме направлений, ведущих к соседним ячейкам.

Проблема численной диффузии наиболее ярко выражена при малом среднеквадратическом отклонении и различных направлениях полета частицы, не ведущих к соседним ячейкам окрестности. В данных условиях формируются различные конфигурации облака загрязнения (рисунок 2.7 а,б).

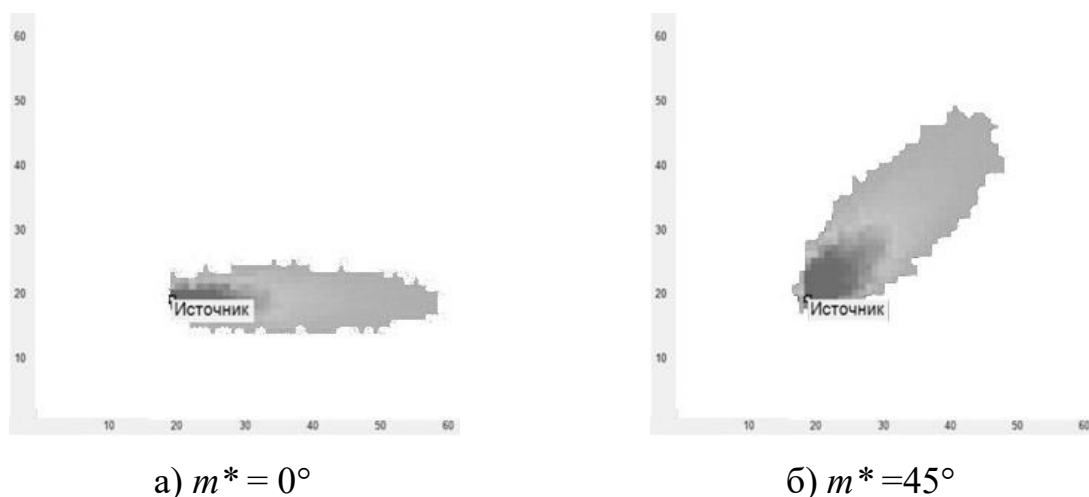


Рисунок 2.7 - Демонстрация эффекта численной диффузии при различном направлении ветра

Таким образом, результаты имитационного эксперимента преобразуются в поле расстояний. Итоговые данные далее используются в качестве аргументов для упрощенного расчета поля концентрации АХОВ.

2.3.3 Модификация фронтального клеточно-автоматного алгоритма

Для воспроизведения фронта облака ЗВ на основе прямого перебора всех ячеек двумерной сетки необходимы значительные вычислительные мощности, поэтому предложен альтернативный способ вычислений [123], основанный на обработке множества возможных направлений перехода частиц в рамках представленной на рисунке 2.5 схемы расчета концентрации ЗВ. Область выброса представлена множеством Ω квадратных клеток поверхности, которое охватывает внутренние клетки среды, а также клетки: источника; границ и препятствий. Каждая клетка характеризуется индексом имени $x \in X$, задающим расположение клетки на множестве имен $X = \{(i, j): i, j = 1, \dots, N_{fs}\}$. Множества Ω , Ω_1 , Ω_2 , Ω_4 , Ω_5 соответствуют ранее представленному в п.2.3.2 описанию.

Центральная клетка с окрестностью фон Неймана охватывает пять соседних ячеек и формирует четыре направления углового перехода частицы для каждого имени $x \in M$. Таким образом, мощность nm множества направлений перехода $PL = \{p_1, p_2, \dots, p_{nm}\}$ зависит от количества ячеек, взаимодействующих в шаблоне соседства центральной клетки. Для формирования списка

направлений $P = (X, \theta_{xn})$ использован «указатель» θ_{xn} , задающий угловое направление перехода: $\theta_{xn} = l/nm$, l - индекс перехода.

Фронтальный алгоритм основан на КА подходе, поэтому величина nm зависит от шаблона соседства центральной ячейки. Например, окрестности фон-Неймана соответствует число $nm = 4$, в окрестности Мура $nm = 8$. Анализ показал, что при малых величинах дисперсии рассеивания фронтальные алгоритмы на основе окрестности фон-Неймана приводят к искажению формы облака. В алгоритмах с окрестностью Мура необходимо разрешить проблему неравных расстояний в шаблоне соседства. Поэтому, в дальнейших расчетах использован гексагональный шаблон двумерной сетки с числом $nm = 6$ и угловым интервалом $\Delta\varphi = 60^\circ$ (рисунок 2.8).

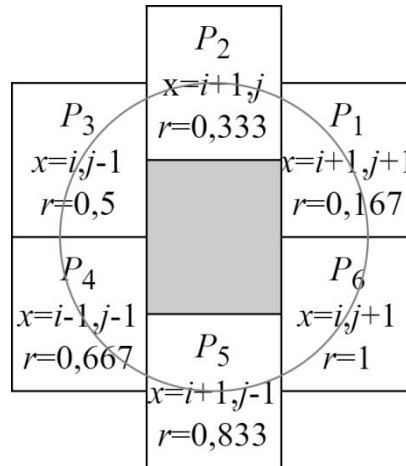


Рисунок 2.8 - Списки направлений PL в гексагональном шаблоне ($nm = 6$)

Рассмотрим схему работы модифицированного алгоритма (рисунок 2.9):

1. Формирование списка направлений (переходов) PS . Для построения исходного списка использовано расчетное соотношение (2.15):

$$PS = \{(w_n, r) \mid PL \mid r = \frac{(w_n \cdot nm) + 1}{nm}\}, \quad (2.15)$$

где: w_n - случайное число нормального закона распределения, задающее угловое направление перехода.

2. Выбор элемента исходного списка PS . Процедура поиска индекса (ссылки) заполняемой ячейки реализована на основе генератора случайных чисел, равномерно распределенных в единичном интервале.

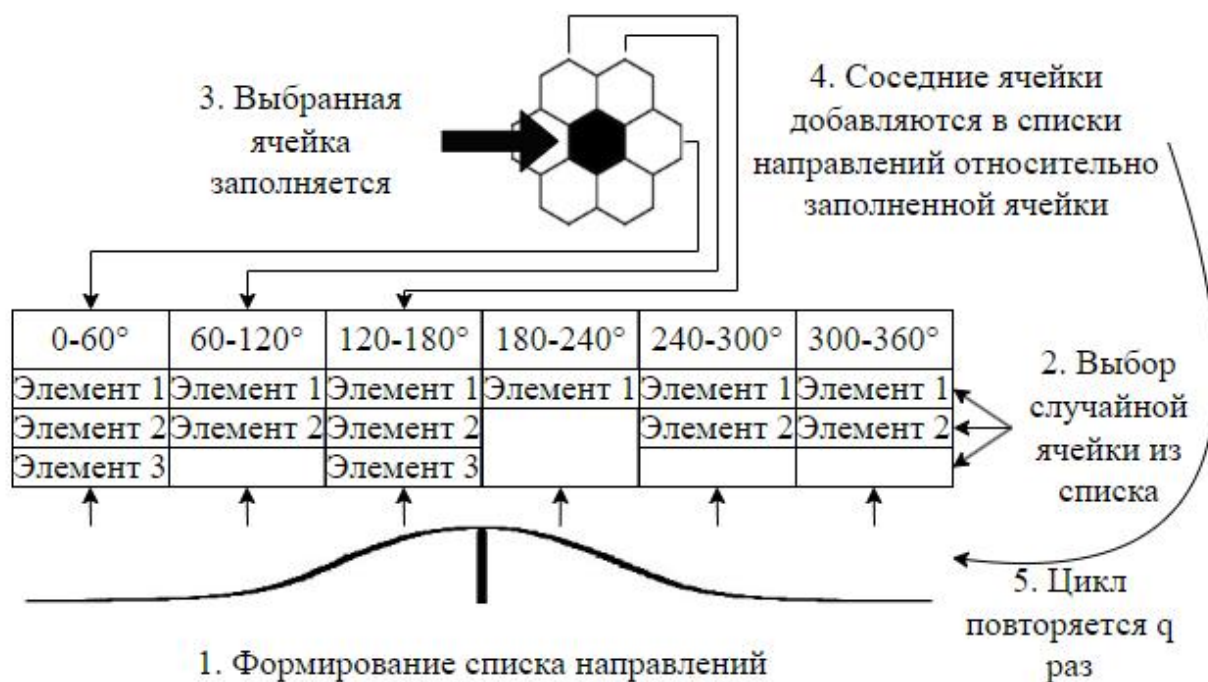


Рисунок 2.9 - Обобщенная схема фронтального алгоритма

3. Заполнение ячейки. Изменение состояния результирующей ячейки с последующим расширением области выброса.

4. Расширение и корректировка списка направлений. После заполнения ячейки в список направлений гексагонального шаблона добавляются новые ссылки на соседние ячейки. Исключение составляют ячейки, которые были ранее заполнены или соответствуют преградам.

Для обеспечения работоспособности алгоритма необходима регулярная «очистка» списка направлений от ссылок на заполненные ячейки, которая реализована на основе счетчика «подряд сделанных промахов». При обнаружении двух и более промахов перехода происходит вызов процедур поиска и удаления таких ссылок из массива элементов списка.

Расчет изолинии основан на последовательной обработке специального массива значений, формируемого для каждого уровня концентрации. На предварительном этапе инициализации модели начальные индексы (или адреса элементов) во всех массивах совпадают. На этапе формирования эллипса рассеивания, после генерации и обработки переходов n частиц примеси, из массива значений концентрации, соответствующих некоторой величине C^* ,

исключаются элементы с меньшим уровнем $C < C^*$. Результирующий массив характеризует границу зоны опасного загрязнения, воспроизводимую в виде изолинии концентрации C^* .

На рисунке 2.10 приведены примеры воспроизведения изолиний концентрации на основе фронтального подхода (для 1000 имитационных экспериментов). Представленные результаты демонстрируют работоспособность разработанного алгоритма при больших разбросах углового направления частиц.

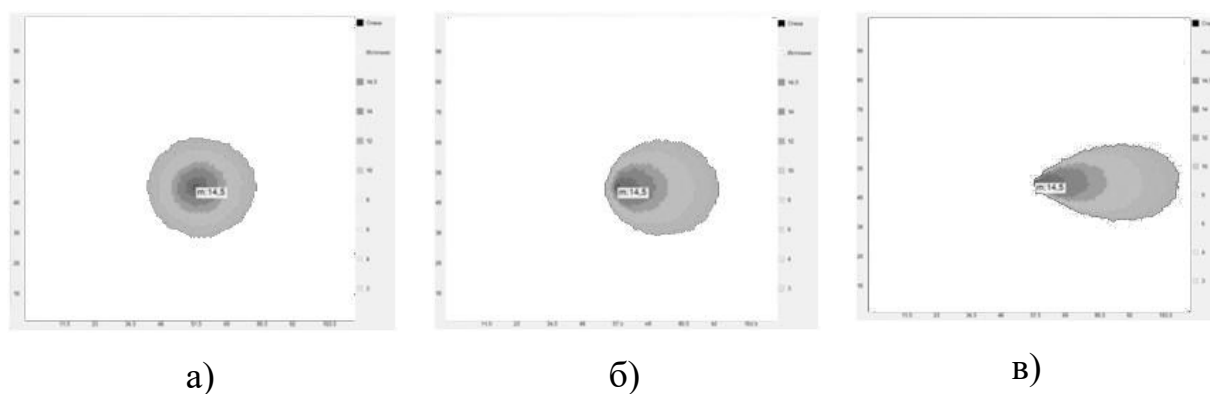


Рисунок 2.10 - Результаты фронтального алгоритма при нормальном угловом распределении частиц: а) $\sigma^* = 130^\circ$; б) $\sigma^* = 60^\circ$; в) $\sigma^* = 30^\circ$

Результаты моделирования показали, что фронтальный алгоритм может быть использован для расчета параметров и визуализации опасной зоны загрязнения при локальном масштабе аварии. В дальнейшем необходимо усовершенствовать процесс отбора ячеек из очереди PS , поскольку подход на основе генерации равномерно распределенных случайных чисел снижает стабильность прогноза и усложняет процедуру параметрического оценивания.

Для повышения стабильности результатов фронтального моделирования могут быть использованы следующие решения:

1. Увеличение размерности серии экспериментов, составляющих одну глобальную итерацию;
2. Представление результатов моделирования в виде «семейства» изолиний, основанного на обработке ограниченного массива расчетных ячеек (число ячеек, формирующих каждую изолинию концентрации, зависит от выраженной в секторах площади опасной зоны загрязнения);

3. Увеличение уровня детализации (разрешения) карты.

2.3.4 Разработка эмпирического клеточно-автоматного алгоритма

Ранее в п. 2.3.2 отмечено, что основной проблемой КА подхода к моделированию последствий выброса ЗВ является проблема численной диффузии. Количество возможных направлений перехода в алгоритмах с одноранговыми шаблонами соседства ограничено, что приводит к искажению формы облака в ходе имитационных экспериментов [37]. Поэтому предложен альтернативный вариант КА-алгоритма с 16-ти точечным шаблоном соседства, в котором учтены особенности расчетной схемы поиска кратчайшего пути.

Для разрешения проблемы численной диффузии использованы результаты работы [124], в которой раскрыты особенности формирования статического поля расстояний S до ближайшего выхода (карты местности), позволившие учесть «геометрию» моделируемой области в клеточно-автоматной модели движения людей. Вид результирующего поля S , формируемого на основе графа видимости, в сильной мере зависит от конфигурации используемого шаблона. Показано, что эффект сглаживания от ошибок численной диффузии может быть достигнут в расчетных схемах с 16-ти точечным шаблоном соседства, который составил основу представленного далее эмпирического КА алгоритма.

Ячейки 16-ти точечного шаблона соседства (рисунок 2.11) расположены на разных расстояниях S_x от источника выброса: ячейки (1-го уровня, 1-го ранга) окрестности фон-Неймана - на расстоянии $S_x=1$; ячейки (1-го уровня, 2 ранга) окрестности Мура - на расстоянии $S_x=2^{1/2}$; для дополняющих ячеек (2-го уровня, 2-го ранга) - $S_x = 5^{1/2}$. Дополняющие ячейки сформированы на основе правил построения графа видимости (хода «конем»).

В соответствии с приведенным в п. 2.3.2 описанием область выброса представлена в виде множества Ω равных по площади клеток поверхности квадратной формы, структура которого делится на четыре составляющие: Ω_1 - внутренние клетки среды; Ω_2 - клетки границ, Ω_3 - клетки источника, Ω_4 -

клетки препятствий. Центральная ячейка в схеме шаблона принадлежит множеству источников Ω_3 ($S_x = 0$).

	5, (2, -1), 113°, $\sqrt{5}$		3, (2, 1), 68°, $\sqrt{5}$	i, T_1 T_2, T_3
7, (1, -2), 158°, $\sqrt{5}$	6, (1, -1), 135°, $\sqrt{2}$	4, (1, 0), 90°, 1	2, (1, 1), 45°, $\sqrt{2}$	1, (1, 2), 23°, $\sqrt{5}$
	8, (0, -1), 180°, 1	$S_x = 0$ $x \in \Omega_3$	0, (0, 1), 0°, 1	
9, (-1, -2), 203°, $\sqrt{5}$	10, (-1, -1), 225°, $\sqrt{2}$	12, (-1, 0), 270°, 1	14, (-1, 1), 316°, $\sqrt{2}$	15, (-1, 2), 338°, $\sqrt{5}$
	11, (-2, -1), 248°, $\sqrt{5}$		13, (-2, 1), 293°, $\sqrt{5}$	

Рисунок 2.11 - Схема 16-точечного шаблона соседства (T_x -окрестности)

Схема представленного на рисунке 2.11 шаблона содержит следующие данные: i - порядковый номер клетки; $T_{1,i}$ - смещение координат i -той клетки относительно источника Ω_3 ; $T_{2,i}$ - угловое направление расположения i -той клетки; $T_{3,i}$ - координатное расстояние (вес ребра) i -той клетки. Порядок расположения данных определен в верхней правой ячейке схемы.

При разработке алгоритма применен эмпирико-статистический подход к задаче имитационного моделирования диффузии, основанный на модификации поля расстояний S_x с учетом углового направления ветрового массопереноса. Карта расстояний от источника загрязнения, формируемая на основе метеорологических данных о скорости и направлении ветра, составляет основу расчета ОЗЗ с использованием существующих алгоритмов преобразования поля S_x в поле концентраций Y_x . Для оценки верхних пределов концентраций АХОВ выбран рассмотренный ранее алгоритм SUDC.

Для учета изменений поля расстояний $S_x(T_{3,i})$ в зависимости от углового направления переноса $x_c = T_{2,i}$ использована эмпирическая модифицирующая функция g^* (2.16), основанная на гипотезе о нормальности закона ветрового распределения (функции Гаусса):

$$g^* = k_1 \cdot \sigma^* \cdot (\sin(k_2 \cdot (x_c - m^*)) + 1) + 1, \quad (2.16)$$

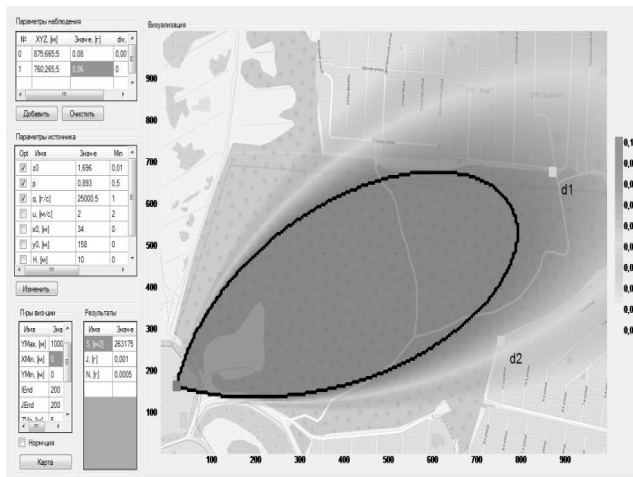
где m^* - математическое ожидание полярного угла оси выброса или основного направления ветра [градусы °], σ^* - среднеквадратическое отклонение, характеризующее устойчивость ветра и турбулентную диффузию АХОВ [рад], k_1 - коэффициент согласования, $k_2 = \pi/180^\circ$ - коэффициент перевода в радианную меру. График функции g^* приведен в описании алгоритма (п.3.1.2).

2.3.5 Выбор алгоритмов прогноза и примеры визуализации

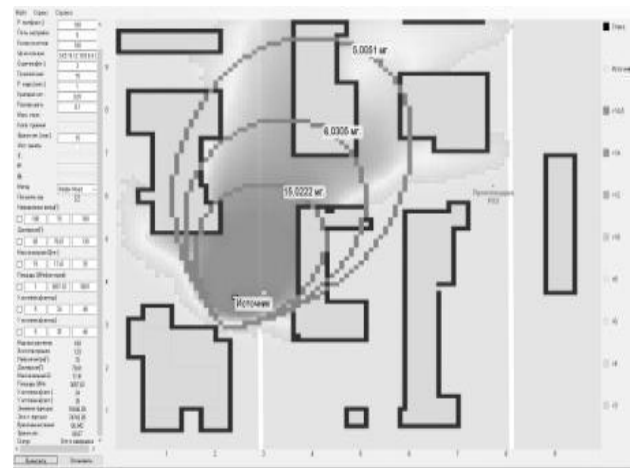
На рисунке 2.12 представлены демонстрационные примеры визуализации зоны загрязнения с использованием разработанных алгоритмов. Выявлены следующие особенности алгоритмов:

1. Алгоритм гауссовой модели (рисунок 2.12а): учитывает основные факторы распространения примеси, включен в стандарты и апробирован, обеспечивает эффективные затраты процессорного времени. Ограничения: алгоритм разработан для идеальных условий выброса и демонстрирует низкую результативность в сложных условиях рассеивания примеси.

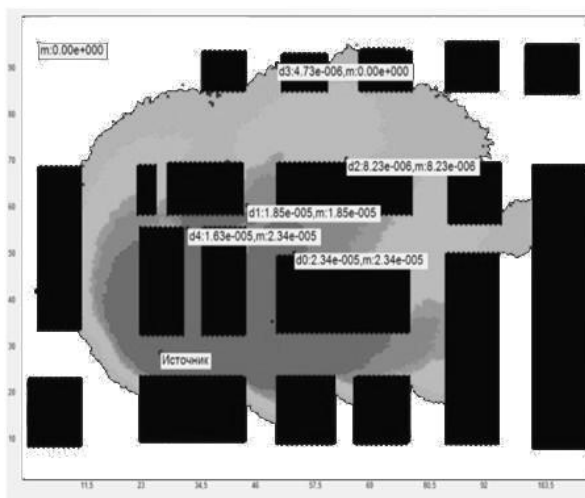
2. КА - алгоритм с имитацией полета частицы (рисунок 2.12б): учитывает эффекты застройки местности; обеспечивает устойчивость решений, а также низкий уровень ошибок численной диффузии. Недостатки: снижение быстродействия, обусловленное имитацией полета частицы; при малых величинах дисперсии рассеивания алгоритмы с окрестностью фон-Неймана приводят к искажению формы облака.



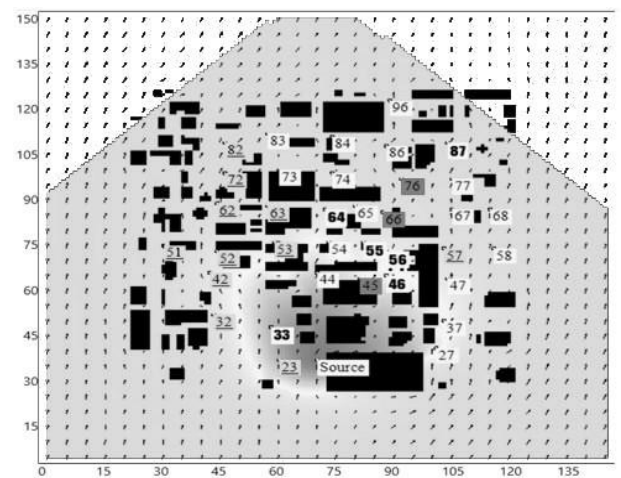
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.12 - Демонстрационные примеры визуализации зоны загрязнения

3. Модифицированный фронтальный КА-алгоритм (рисунок 2.12в): увеличивает скорость обработки информации при расчете зоны загрязнения в случае сложной конфигурации преград. Недостатки: некоторое снижение стабильности результатов моделирования и ограничение возможности симуляции пристеночного ветра.

4. Эмпирический КА-алгоритм (рисунок 2.12г): обеспечивает высокую скорость вычислений и отсутствие «шумов» в результатах моделирования, устойчивость границ моделируемой области, а также возможности учета поля ветра. Недостатки: снижение информативности прогноза.

В итоге была разработана представленная на рисунке 2.13 схема выбора алгоритмов прогнозирования. Входными данными для выбора являются опорные замеры концентрации АХОВ и требования к прогнозу.

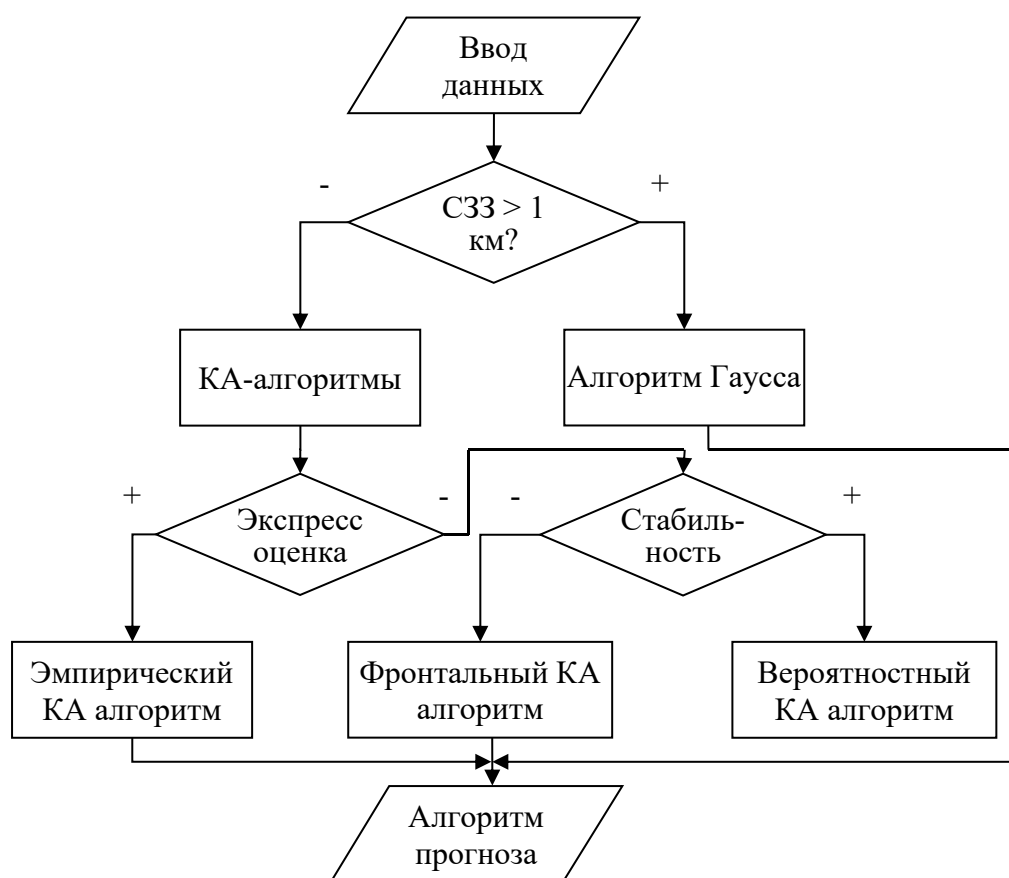


Рисунок 2.12 Схема выбора алгоритмов прогнозирования

Выбор конкретного алгоритма зависит от масштаба последствий аварийного выброса, требований к скорости расчета и информативности прогноза, а также возможности учета специфических факторов рассеивания:

алгоритм на основе уравнения Гаусса применяется для прогноза оперативной обстановки при мезо-масштабном уровне аварии;

эмпирический КА-алгоритм используется для экспресс-оценки оперативной обстановки при локальном масштабе аварии;

вероятностный КА-алгоритм выбирается для получения более информативных и стабильных прогнозов при локальном масштабе аварии;

фронтальный КА-алгоритм применяется для формирования промежуточного варианта прогноза при локальном масштабе аварии.

2.4 Обоснование алгоритмов внешнего контура системы

2.4.1 Параметризация прогнозных расчетов

Ранее были определены (п. 2.3.1) неизменяемые P_{const} и варьируемые P_{var} параметры прогноза на основе уравнения Гаусса. В данном случае задача поиска параметров прогноза представлена следующим образом: на основе результатов мониторинга $C_i^d(x,y,z,t)$ и задании априорных и неизменяемых в ходе прогноза $C_i^m(x,y,z,t)$ параметров $P_{\text{const}}=\{P_2, P_3\}$, определить параметры $P_{\text{var}}=\{P_1, P_4, P_5\}$ уравнения Гаусса, которые доставляют минимум отклонения Δ (1.1).

Ограничения задачи: $C_i^m(x,y,z,t) \geq C_{\text{к}}^*$; $x_{1\text{н}} \leq x \leq x_{1\text{к}}$; $y_{\text{н}} \leq y \leq y_{\text{к}}$; $0 \leq z \leq H^{\text{max}}$; $t_{\text{н}} \leq t \leq t_{\text{к}}$; $P_m^{\text{min}} \leq P_m \leq P_m^{\text{max}}$, $m = \overline{1,5}$, где $P_1=Q^*$ - интенсивность выброса ТХВ, $P_2=U$ - скорость ветра вдоль оси выброса, $P_3=\{x_q, y_q, z_q\}$ - координаты и высота расположения источника выброса q , $P_4=p$ - устойчивость атмосферы, $P_5=z_0$ - коэффициент шероховатости, $C_{\text{БК}}^*$ - порог безопасной концентрации ТХВ, $H^{\text{max}}=2$ м - граница опасной зоны загрязнения по оси Oz , величины $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{к}}$ задают интервал скользящего окна, индексы «н» и «к» обозначают начало и окончание процедуры расчета площади $S_{\text{ОЗЗ}}$ опасной зоны загрязнения.

Диапазоны изменения двух основных параметров уравнения Гаусса - устойчивости атмосферы p и коэффициента шероховатости z_0 , определены в соответствии с рекомендациями [118]: $0,5 \leq p \leq 6,5$; $0,01 \leq z_0 \leq 4$. Интенсивность выброса Q^* устанавливается на основе экспертной оценки оперативной ситуации с использованием данных полевых наблюдений. Начальное приближение для параметра Q^* может быть получено на основе STE-подхода к обработке данных полевых наблюдений [38]. Для получения более точного приближения рекомендуется производить замеры вдоль оси выброса.

Среднеквадратическое отклонение направления выброса σ^* и интенсивность выброса Q^* отнесены к варьируемым параметрам КА-алгоритмов. Следует отметить, что среднеквадратическое отклонение σ^* является основным параметром для определения контура выброса загрязнений.

В разделе 19.4.3 "Standard Deviation – Sigma" [126] показано, что с удалением от оси выброса наблюдается «постепенное приближение кривой гауссового распределения к нулевой концентрации», что затрудняет усредненное оценивание границ шлейфа. В качестве меры распространения шлейфа целесообразно использовать отклонение σ^* , которое характеризует степень рассеяния выброса относительно центра шлейфа с максимальной концентрацией загрязнения. Контур выброса формируют на основе стандартных интервалов отклонения σ^* .

Границы допустимых значений параметра σ^* : $60^\circ \leq \sigma^* \leq 130^\circ$, при которых обеспечивается работоспособность вероятностного КА-алгоритма, определены экспериментальным путем. С увеличением параметра σ^* также возрастает общая дисперсия моделируемого выброса. При значении $\sigma^* > 130^\circ$ форма эллипса рассеивания перестает в значимой степени изменяться, а затраты процессорного времени на имитацию полета частицы резко возрастают. При значении $\sigma^* < 60^\circ$ в результатах моделирования проявляются эффекты численной диффузии.

2.4.2 Определение показателей критериальной оценки

Вид отклонения Δ в задаче (1.2) зависит от варианта реализации процедуры мониторинга [29]. В случае единичных наблюдений для приблизительной оценки площади опасного загрязнения может быть использована критериальная оценка Δ_0 следующего вида (2.17):

$$\Delta_0 = \left(a_x \mid F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, x) - c_x^d \mid \right), \quad (2.17)$$

где Ω_6 - множество ячеек с замерах концентрации, x - адрес датчика относительно источника выброса q , F - модель прогноза с параметрами p_j ($j = \overline{1, n}$), c_x^d - результаты замера концентрации по адресу x , a_x - весовой коэффициент, характеризующий погрешность измерения устройства по координатам x . Датчику c_x^d с высокой погрешностью соответствует низкий уровень коэффициента a_x , сумма всех коэффициентов равна единице.

Критериальная оценка (2.17) представлена аддитивной сверткой абсолютных отклонений концентрации в каждой паре наблюдение-прогноз с возможностью задания коэффициентов приоритета (важности) каждого наблюдения. Однако, в ряде случаев, такая оценка способна отдавать предпочтение одним замерам в ущерб другим.

При выборе показателей эффективности прогноза частично учтены особенности распределения полей концентрации загрязнителя в зависимости от высоты расположения источника выброса. В случае высотных источников наблюдается логнормальное распределение [127] полей концентрации (для алгоритма на основе уравнения Гаусса), случаю приземистых - соответствует экспоненциальное распределение (для алгоритмов КА-модели).

В обзоре [127] приведены критериальные показатели, которые активно используются для оценки качества прогнозных моделей, в том числе: FB - дробное смещение (2.18); MG - геометрическое среднее смещение (2.19); $NMSE$ - нормализованная среднеквадратичная ошибка (2.20); VG - геометрическая дисперсия (2.21); R - коэффициент корреляции (2.22); $FAC2$ - доля прогнозов в пределах двукратного отклонения от наблюдений (2.23):

$$FB = \frac{\overline{c_o} - \overline{c_p}}{0,5(\overline{c_o} + \overline{c_p})}, \quad (2.18)$$

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p}), \quad (2.19)$$

$$NMSE = \frac{\overline{(c_o - c_p)^2}}{c_o c_p}, \quad (2.20)$$

$$VG = \exp\left[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2}\right], \quad (2.21)$$

$$R = \frac{\overline{(c_o - \overline{c_o})(c_p - \overline{c_p})}}{\sigma_{c_p} \sigma_{c_o}}, \quad (2.22)$$

$$0,5 \leq \frac{c_p}{c_o} \leq 2,0, \quad (2.23)$$

где $c_o = c_x^d$ - наблюдение (замер концентрации), $c_p = c_x^p$ - модельное предсказание, $\overline{c}$ - среднее значение по набору данных, σ - стандартное отклонение по набору данных, горизонтальная черта над формулами - усреднение вычислений.

Для поиска параметров прогноза, обрабатываемых во внешнем контуре системы, использован показатель геометрической дисперсии VG . В случае прогноза без учета полей ветра работоспособность вероятностного и фронтального КА-алгоритма оценивались с использованием показателя $FAC2$.

Выбор целевого показателя VG обоснован несколькими причинами [127]:

1. Показатели VG и MG основаны на логарифмическом масштабе обработки данных и обеспечивают более сбалансированную оценку алгоритмов при больших ошибках предсказания. Они менее чувствительны к выбросам и экстремальным значениям по сравнению с показателями FB и $NMSE$, которые в таких условиях не эффективны.

2. По сравнению с показателями FB и MG , которые характеризуют только систематическое смещение, показатель VG учитывает как систематические, так и случайные ошибки предсказания. Систематическая ошибка непосредственно связана со средним отклонением результата прогноза. Случайная ошибка обычно возникает при взаимной компенсации ошибок расчета по всем данным.

3. Показатель VG предоставляет более информативную по сравнению с показателем $FAC2$ оценку результатов прогноза. В сопоставлении с показателем R , оценивающим только общий коэффициент корреляции, показатель VG учитывает ошибки предсказания по всему набору данных.

Критериальная оценка (2.17) на основе показателя VG (2.21) представлена следующим расчетным соотношением:

$$\Delta_{VG} = \exp \left[\overline{(\ln(c_x^d) - \ln(F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, x)))^2} \right], \quad (2.24)$$

где горизонтальной чертой обозначена процедура усредненной обработки информации по данным полевых замеров.

Ранее отмечено, что для оценки эффективности вероятностного и фронтального КА-алгоритма в прогнозах без учета полей ветра использован робастный показатель $FAC2$. Для таких алгоритмов также характерна ограниченная область расчета и визуализации зоны загрязнения местности. В

случае, если координаты датчика находятся за пределами расчетной области, возникает проблема неопределенности обработки результатов наблюдения.

Для разрешения такой проблемы в алгоритм вычисления показателя $FAC2$ введен штрафной коэффициент, исключающий варианты решения, которые содержат хоть один необработанный замер. Составленная с учетом такого коэффициента критериальная оценка (2.17) на основе показателя $FAC2$ (2.21) представлена в следующем виде (2.25-2.26):

$$c_x^p = \begin{cases} 1, & \text{если } 0,5 \leq \frac{F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, x)}{c_x^d} \leq 2 \\ 0, & \text{в ином случае} \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\Delta_{FAC2} = \begin{cases} \frac{c_x^p}{|\Omega_6|}, & \text{если } \forall x \in \Omega_6 \quad \forall x \in \Omega_5 \\ s, & \text{в ином случае} \end{cases} \quad (2.26)$$

где x - адрес датчика относительно источника выброса, c_x^p - бинарное значение показателя $FAC2$, Ω_5 - множество заполненных ячеек, Ω_6 - множество ячеек с замерами, $|\Omega_6|$ - общее количество замеров концентрации, s - штрафной коэффициент.

2.4.3 Обоснование и выбор методов параметрической настройки

В современной науке и инженерии параметрическая настройка является ключевым аспектом для решения многих задач. В задаче обработки данных аварийной ситуации с возможностью корректировки параметров прогнозной модели важным становится выбор метода настройки, который позволит найти наилучшую комбинацию параметров прогнозной модели с использованием данных химической разведки местности.

Классические градиентные методы, такие как метод наискорейшего спуска и метод сопряжённых градиентов, основаны на использовании информации о градиентах целевой функции. Такие методы обеспечивают высокую скорость сходимости и просты в реализации, но они работоспособны

только в условиях гладкой целевой функции и требуют приемлемого начального приближения.

Эвристические методы [128-130], включая метод поиска по образцу (PSM), имитацию отжига (SA) и генетический алгоритм (GA), полезны в случаях, когда градиенты целевой функции трудно или невозможно вычислить.

Метод PSM является наиболее эффективным методом локального поиска, но его производительность зависит от выбора начальных условий.

Более сложные глобальные SA и GA алгоритмы сохраняют работоспособность при поиске минимумов многомодальных целевых функций, однако приводят к значительным затратам вычислительных ресурсов. В условиях ЧС, когда время реагирования имеет определяющее значение, использование таких сложных алгоритмов может оказаться проблемным.

С другой стороны, упрощенные алгоритмы формируют оперативный, хотя и менее точный прогноз. При чрезвычайных обстоятельствах такие прогнозы значимы и актуальны, поскольку они позволяют принимать решения в условиях дефицита времени. Однако в таких алгоритмах не учитываются некоторые существенные факторы и условия выброса АХОВ, которые способны привести к ошибкам предсказания.

Ограниченность или высокая неопределенность исходной информации снижает эффективность применения методов настройки, основанных на поиске локального минимума ошибки. В этом случае рекомендованы алгоритмы поиска глобальных экстремумов (равномерный поиск и эвристические алгоритмы) [38].

Анализ исследований [131-132] показал, что в процедуре настройки параметров прогноза на основе уравнения Гаусса целесообразно использовать метод «Имитации отжига» (SA), большим преимуществом которого является «игнорирование» окрестностей минимумов при поиске наилучшего решения.

Интерес представляет разновидность данного метода - сверхбыстрый отжиг, который приводит к быстрому «снижению температуры». Вычислительная реализация метода отжига содержит ряд параметров настройки,

необходимых для обеспечения эффективной и устойчивой работы алгоритма [133-134].

Алгоритм сверхбыстрого отжига обеспечивает высокую скорость обработки информации и, как правило, определяет близкий к наилучшему вариант решения задачи. В случае необходимости определения координат источника, пользователь должен указать на карте ряд замеров концентрации АХОВ. Однако нет гарантий, что опорное решение приведет к «желаемому результату». Дальнейшее уточнение опорного решения требует учета дополнительных данных полевых наблюдений.

Вероятностный характер КА-алгоритмов приводит к некоторой вариативности результатов прогноза и обуславливает необходимость осуществления многократного прогона прогнозной модели. С ростом масштаба области моделирования, а также при увеличении уровня детализации карты местности этот эффект уменьшается.

Тем не менее, «шумы» в результатах прогнозирования невозможно свести к нулю. Серийному прогону прогнозной модели всегда соответствует некоторая погрешность воспроизведения конечного результата, уровень которой зависит от числа проведенных экспериментов.

При настройке параметров прогноза на основе вероятностного КА-подхода применимы методы не выше нулевого порядка [135]. Поэтому для поиска таких параметров использованы алгоритмы прямого перебора и симплексный метод Нелдера-Мида [136].

Использование алгоритмов прямого перебора целесообразно в случаях, когда количество варьируемых параметров является небольшим. Этот подход исследует все возможные комбинации параметров и позволяет оценить чувствительность каждого измерения [137-138]. Стоит учитывать, что расширение области допустимых значений даже небольшого числа параметров приводит к экспоненциальному росту возможных комбинаций и увеличивает вычислительные затраты на реализацию этого метода.

Апостериорный подход, применяемый в двухконтурной схеме обработки, позволяет определить наиболее чувствительные наблюдения, влияющие на устойчивость решения после завершения прямого перебора варьируемых параметров. Целесообразно исключить данный замер из массива исходных данных. Чувствительные замеры могут быть использованы, например, для целей верификации модели.

2.5 Методика визуализации и анализа аварийных выбросов

Методика визуализации и анализа аварийных выбросов, разработанная на основе обобщенной схемы оперативного реагирования (рисунок 2.3), представлена следующими этапами сбора и обработки информации:

1. *Формирование исходных данных для прогнозирования и визуализации аварийного загрязнения местности.*

Исходными являются: данные геоинформационной системы с цифровой картой зоны аварийной ситуации; данные химической разведки местности с координатами расположения замеров (датчиков) концентрации АХОВ, а также координаты расположения источника химического загрязнения; данные метеорологического прогноза. При необходимости вводятся дополнительные сведения для определения пассивности выброса.

2. *Выбор алгоритма прогнозирования.*

После ввода в систему исходных данных, производится выбор алгоритма прогнозирования в зависимости от масштаба аварии, требований к скорости и точности прогнозирования, а также возможности учета специфических факторов рассеивания (п. 2.3.5.).

Оценка обстановки при мезо-масштабном уровне аварии осуществляется на основе уравнения Гаусса. В данном случае не учитываются эффекты застройки местности и влияние полей ветра.

Для экспресс-оценки оперативной обстановки при локальном масштабе аварии применяется эмпирический КА-алгоритм, который обеспечивает

высокую скорость вычислений в условиях застройки местности и возможность учета поля ветра.

При необходимости получения более информативных прогнозов используется алгоритм КА с имитацией полета частицы.

Промежуточным вариантом является фронтальный алгоритм, учитывающий как скорость работы, так и результативность прогнозов.

3. *Расчет начального приближения.*

Во внешнем контуре системы рассчитываются параметры начального приближения, необходимые для реализации стратегии поиска решения. На основе данных ГИС формируется цифровой макет преград, требуемый для расчета прогнозных оценок в условиях застройки местности. Осуществляются предварительные имитационные эксперименты. Для оценки мощности выброса Q^* при локальном масштабе аварии применяется модель SUDC.

4. *Применение стратегии поиска параметров прогноза.*

На основе критериальной оценки отклонений концентрации в парах наблюдение-прогноз в серии вычислительных экспериментов определяются наилучшие параметры прогноза. Процесс определения параметров является итеративным и предполагает многократный расчет прогноза с различными параметрами, что обуславливает временные затраты на поиск опорного решения.

Оценка эффективности прогноза осуществляется на основе показателя геометрической дисперсии VG . В случае прогноза без учета полей ветра работоспособность вероятностного и фронтального КА-алгоритма оценивается с использованием показателя $FAC2$.

Для поиска параметров прогноза на основе уравнения Гаусса применяется алгоритм «Имитации отжига», преимуществом которого является «игнорирование» окрестностей локальных минимумов при поиске наилучшего решения. Для определения параметров прогноза на основе КА-подхода использованы алгоритмы Нелдера-Мида и прямого перебора.

5. *Вывод результатов прогнозирования.*

Выходной информацией является прогнозная оценка размеров и конфигурации зоны загрязнения местности с визуальным отображением границ данной зоны и профилей концентрации АХОВ на цифровой карте местности.

Результаты прогнозирования и визуализации могут быть использованы для анализа химической обстановки, корректировки планов мероприятий по локализации и ликвидации аварии (ПМЛА) и оценки эффективности аварийно-спасательных работ на основе актуальных сведений об аварии, что обеспечивает гибкость и адаптивность реагирования на изменяющуюся ситуацию.

Таким образом, в результате исследования разработан метод обработки аварийной ситуации в комплексной системе прогнозирования и визуализации.

Исследованы особенности алгоритма прогноза на основе уравнения Гаусса, который применяется для прогнозирования и визуализации опасной зоны загрязнения при макро- и мезо-уровневом масштабе аварий. Разработаны и описаны КА-алгоритмы рассеивания примеси, которые учитывают влияние сложных условий выброса при локальном масштабе аварии.

Проанализированы особенности и сформированы условия отбора алгоритмов прогноза (на основе уравнения Гаусса, а также вероятностного, фронтального и эмпирического КА) для внутреннего контура вычислительного ядра СППР. Определены показатели эффективности прогноза и обоснован выбор алгоритмов параметрической настройки прогнозных моделей.

ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ

3.1 Реализация алгоритмического обеспечения

3.1.1 Определение признака пассивности выброса

Подход Гаусса применяется для расчета дисперсии загрязняющих веществ в атмосфере при определенных условиях рассеивания примеси. Такой подход рекомендуется использовать в случаях, когда доминируют ветровые или тепловые конвекционные процессы, а также когда испарение не является значимым, чтобы гравитационные эффекты рассеивания плотных загрязнителей были минимальными. Этот подход также возможен в случаях, когда загрязняющее вещество менее плотное, чем окружающий воздух [90]. В качестве критерия для определения пассивности выброса используется критическое число Ричардсона (Ri_c). Если $Ri_c \leq 1$, то газ считается пассивным и дисперсия выброса рассчитывается с использованием принципов Гаусса [139]. Схема расчета признака пассивности представлена на рисунке 3.1.

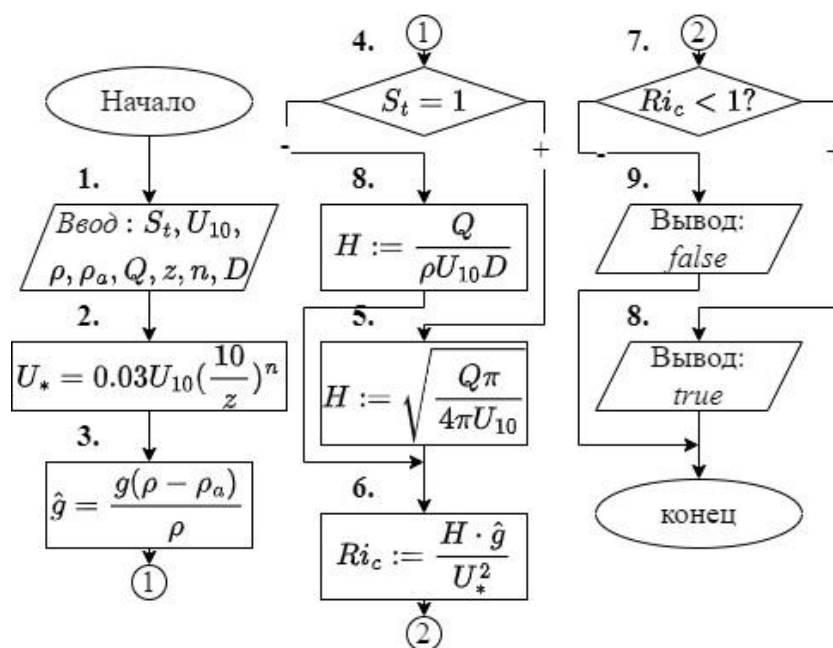


Рисунок 3.1 - Схема расчета признака пассивности, разработанная на основе [139]

Входными данными для расчета являются: сценарий выброса S_i , скорость ветра на высоте 10 м U_{10} , плотность вещества ρ , плотность окружающего воздуха ρ_a , мощность выброса Q , высота замера скорости ветра z , стабильность атмосферы по Пасквиллу n , диаметр разлива D . Для расчета критического числа Ричардсона (Ri_c) в блоке 5 использована формула (3.1):

$$Ri_c = \frac{H\mathcal{G}}{U_*^2}, \quad (3.1)$$

где H - характерный размер источника, $\mathcal{G}$ - плавучесть вещества, U_* - скорость трения ветра. Величина $\mathcal{G}$ рассчитывается в блоке 3 по формуле (3.2):

$$\mathcal{G} = \frac{g(\rho - \rho_a)}{\rho} \quad (3.2)$$

Расчет величины H в блоках 5 и 8 зависит от типа источников выброса (сценария выброса S_i). Рассчитываются варианты непрерывных источников (блок 5) и источников типа разлив (блок 8). Для источников типа разлив ($S_i = 0$) использована формула (3.3):

$$H = \frac{E}{\rho U_{10} D}, \quad (3.3)$$

где E - массовая скорость испарения, D - диаметр разлива. В случае непрерывных источников ($S_i = 1$), расчетное соотношение приобретает вид (3.4):

$$H = \sqrt{\frac{E\pi}{4\rho U_{10}}} \quad (3.4)$$

В соответствии с методикой, при расчете скорости трения U_* в блоке 2 применена формула Дикона (3.5) для нейтральных условий рассеивания над поверхностью океана:

$$U_* = 0,03U \frac{10}{z}^n, \quad (3.5)$$

где U - величина скорости ветра на высоте z . Для аппроксимации профиля скорости ветра использована степенная зависимость. Значения показателя степени n для шести классов (A, B, C, D, E, F) устойчивости Пасквилла: $n_A = 0,108$; $n_B = 0,112$; $n_C = 0,120$; $n_D = 0,142$; $n_E = 0,203$; $n_F = 0,253$ [140].

Признак $Ri_c > 1$ реализует условие отбора модели плотного газа, что соответствует, в том числе, правилам методики [139].

3.1.2 Реализация алгоритмов внутреннего контура

Алгоритмические особенности расчета на основе уравнения Гаусса:

1. В качестве аргументов используются параметры уравнения Гаусса (2.1) $P = \{Q^*, U, x_0, y_0, z_0, p, z_0, m^*\}$ и массив замеров R_s , в котором каждый замер $r_s \in R_s$ представлен координатами (x_r, y_r, z_r) .

2. Алгоритм гауссовой модели допускает расчет поля концентраций в определенных точках $C(x_r, y_r, z_r, p, z_0)$ без обработки всей расчетной области. Поэтому в схеме алгоритма реализован перебор координат замеров r_s , требуемых для расчета концентрации в парах наблюдение-прогноз.

3. Функция f_1 учитывает направление ветра и модифицирует координаты x_r и y_r расположения замера r_s после поворота на угол ветра m^* . Для вычисления функции f_1 использованы расчетные соотношения (3.6):

$$\begin{cases} k_2 = \frac{\pi}{180} \\ x_s' = x_0 + \cos(k_2(x_s - x_0)) - \sin(k_2(y_s - y_0)) \\ y_s' = y_0 + \sin(k_2(x_s - x_0)) + \cos(k_2(y_s - y_0)) \end{cases} \quad (3.6)$$

4. Функция f_2 рассчитывает параметр σ_y , необходимый для получения результата моделирования. Использована модель Бригса. Порядок расчета функции f_2 определен соотношениями (2.5)-(2.8).

5. Функция f_3 реализует алгоритм расчета параметра σ_z на основе метода дисперсионных кривых Смита-Хоскера. При расчете функции f_3 использованы соотношения (2.2)-(2.4).

6. Отклики модели, формируемые функцией f_4 , рассчитываются на основе уравнения Гаусса (2.1).

7. Результаты моделирования представлены в виде разряженного поля концентраций Y , заполненного значениями только в местах наблюдений.

Алгоритмические особенности расчета на основе вероятностного КА. Для увеличения производительности системы серия экспериментов *разделяется* на

отдельные потоки с целью получения сводной информации на основе метода Монте-Карло.

На рисунке 3.2 представлена блок-схема менеджера потоков, который обеспечивает подготовку данных, создает и запускает потоки, агрегирует результаты экспериментов и приводит их к конечному виду.

Блок 2 формирует цикл выполнения серии экспериментов в потоке, в котором счетчик i_{thr} отвечает за координацию экспериментов в потоке, поскольку массив статистики R является общим для всех потоков.

Проведение множества экспериментов с осреднением результатов (блок 5) позволяет повысить стабильность результатов. Однако при формировании итоговых результатов возможно образование границы расчетной области с высокой концентрацией примеси, связанной с ошибками процедурного агрегирования результатов.

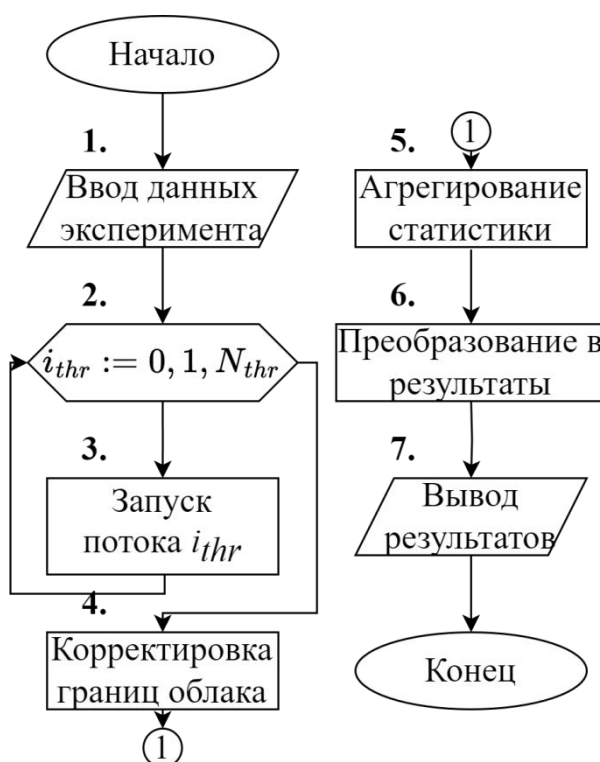


Рисунок 3.2 - Блок-схема менеджера потоков вероятностного КА

При расчете поля концентраций Y_x в блоке 6 менеджера потоков статистические данные интерпретируются как расстояния S_x для формулы SUDC (2.14). В алгоритме преобразования применено соотношение (3.7):

$$Y_x U / Q = K(S_x \cdot c_{size})^{-2} \quad (3.7)$$

Для расчета конечных результатов применена функция f_l , которая реализует формулу SUDC в соответствии с выражением (3.8):

$$Y_x = \frac{KQ(\Phi(S_x) \cdot c_{size})^{-2}}{U} \quad (3.8)$$

Функция интерполяции Φ используется для разрешения проблемы искажения расстояний S_x вдоль оси выброса. Опорные значения границ интерполяции задаются соответствующей таблицей. Чем значительнее размер границ, тем из большего количества секторов может состоять облако.

Блок-схема расчета на основе вероятностного КА представлена на рисунке 3.3. Начальный этап расчета представлен процедурами ввода параметров (блок 1), контроля признака завершения процедуры (блок 2) и инициализации эксперимента (блок 3). Далее реализован процесс имитации полета частицы (блоки 4-9). Схема расчета содержит ряд решающих правил:

1. *Соответствие границам расчетной области.* Если частица переходит за пределы области прогнозирования, то такое событие фиксируется в массиве статистики и частица размещается по координатам источника выброса. В ином случае формируется новое направление движения частицы (блок 4).

2. *Наличие преград на траектории перемещения частицы.* Если частица достигла преграды (блок 5), то направление ее движения корректируется (блок 6). Далее «путь» частицы сохраняется (блок 7) и она размещается в новой ячейке с учетом правил углового переноса (блок 8).

3. *Присутствие примеси в ячейке.* Если в новой ячейке примесь отсутствует (блок 9), то формируется признак заполнения ячейки примесью и выполняется обновление данных (блок 10) с последующей записью координат новой частицы (блок 11).

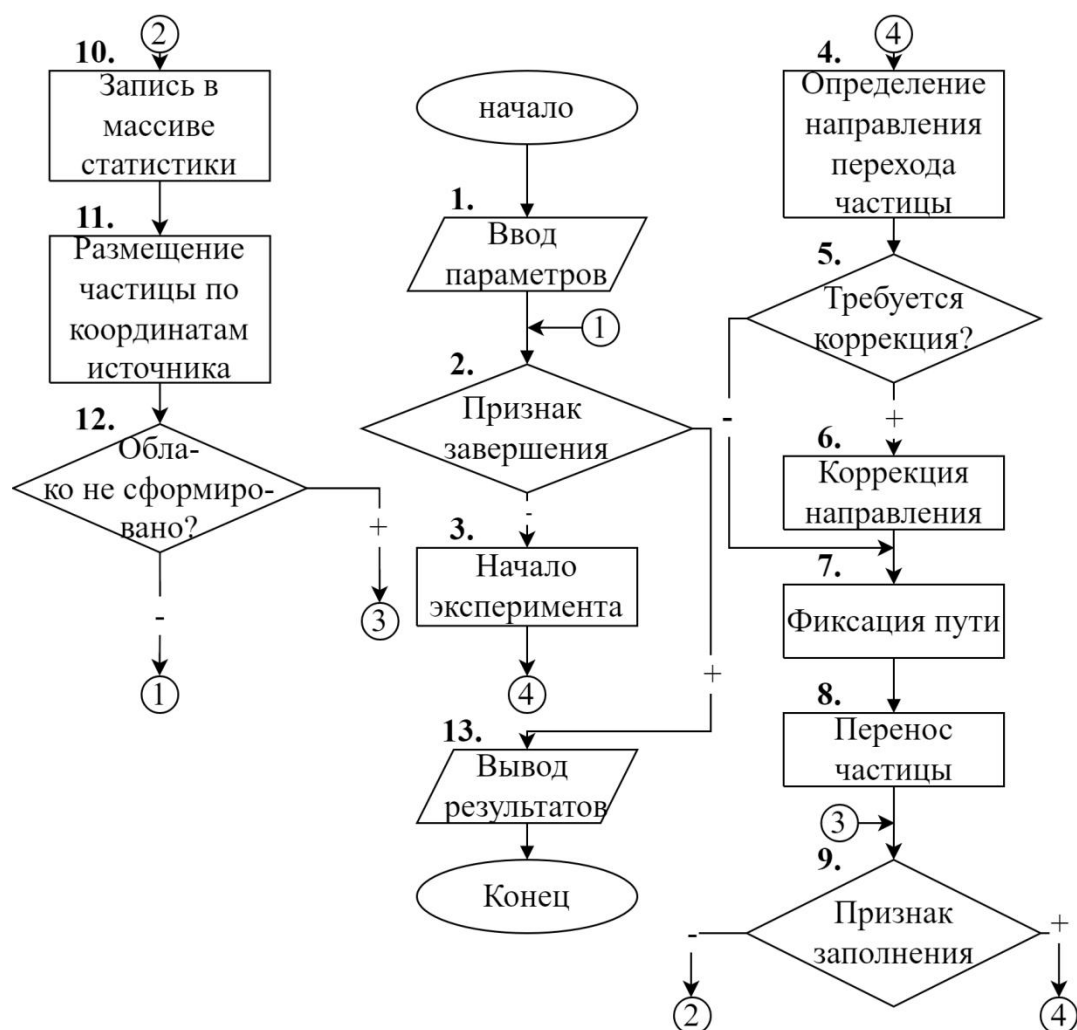


Рисунок 3.3 - Блок-схема расчета на основе вероятностного КА

Множество L_{path} является линейно упорядоченным, где очередность ячеек определяется шагом i на основе набора правил для каждого $(L_{path})_i$ и $(L_{path})_{i+1}$ до тех пор, пока для частицы qn не будет определена свободная ячейка $x \in \Omega_1$. Путь L_{path} в схеме функции переходов $\Psi_1: P \times V \rightarrow V$ представлен в виде полученных на предыдущем $(L_{path})_{i-1}$ и текущем $(L_{path})_i$ шаге координат частицы x . В начале пути $(L_{path})_0$ координаты частицы приравниваются к координатам источника Ω_3 , а номер шага частицы L_{path} обнуляется. Таким образом, в начале эксперимента обнуляется вся информация (блок 4), полученная в предыдущем эксперименте, кроме массива итоговой статистики R .

Алгоритмические особенности расчета на основе фронтального КА. В имитационных экспериментах с фронтальным КА применена ранее

представленная схема организации параллельных вычислений. На рисунке 3.4 представлен алгоритм менеджера потоков фронтального КА.

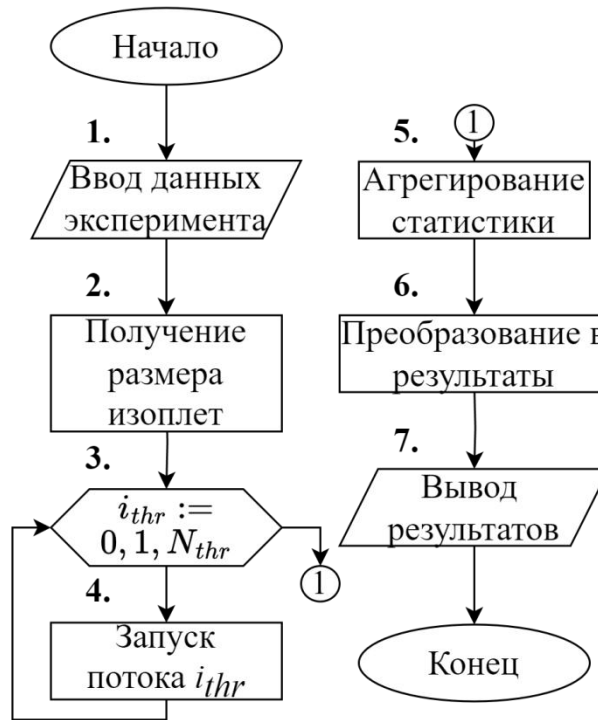


Рисунок 3.4 - Блок-схема менеджера потоков фронтального КА

В блоке 2 производится расчет (3.9) модифицированного масштаба распространения примеси sc :

$$sc = \frac{qc_s}{(IS_v)_{|IS_v|-1}}, \quad (3.9)$$

где IS_v - изоплеты концентраций, $|IS_v|$ - количество изоплет, c_s - концентрация примеси вблизи источника выброса. Блок 4 необходим для определения размера изоплет IS_{size} . Использовано следующее расчетное соотношение (3.10):

$$(IS_{size})_{i_{isop}} = -sc \ln \left(\frac{(IS_v)_{i_{isop}}}{c_s} \right) \quad (3.10)$$

В блоке 5 производится усреднение по результатам всех экспериментов. В блоке 6 используется массив B , в котором посредством функции $DefB$ производится отбор ячеек с наибольшей концентрацией IS_v . В массиве Res содержится сводная в серии экспериментов статистика попадания частицы в ячейку x для изоплет i_{isop} с концентрацией IS_v . В массиве B определяется порог, посредством которого для изоплеты с концентрацией IS_v отбираются ячейки с

наибольшими «значениями» концентрации. Под «значением» подразумевается количество попаданий частиц в ячейку x для изоплеты с концентрацией IS_v .

Блок-схема расчета фронтального КА приведена на рисунке 3.5.

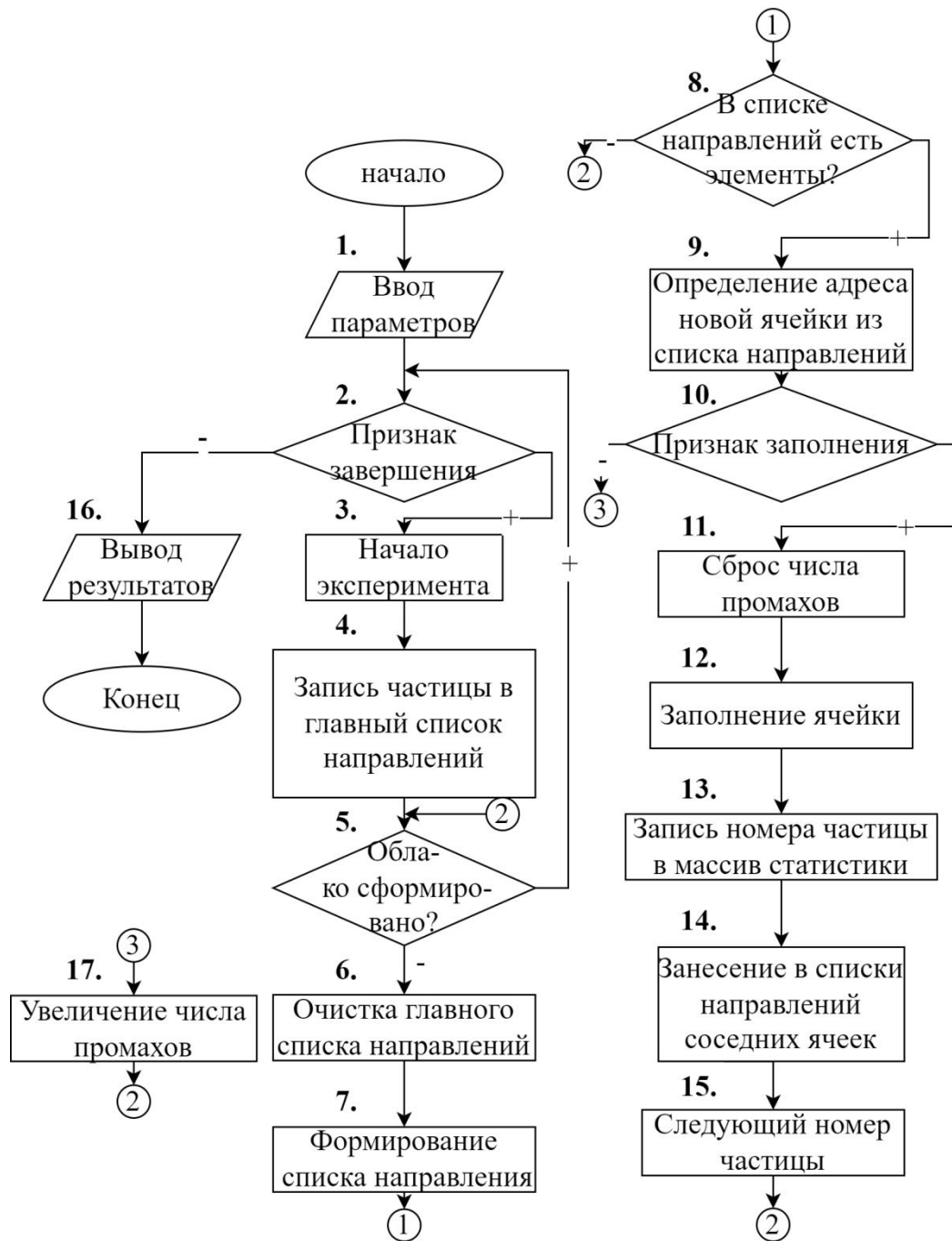


Рисунок 3.5 - Блок-схема расчета фронтального КА

Начальный этап расчета представлен процедурами ввода параметров (блок 1) и выбора условий завершения экспериментов (блок 2). Число экспериментов выбирается с учетом получения приемлемого по времени и стабильного

результата. Если эксперименты не завершены, то в блоке 3 происходит инициализация переменных для нового эксперимента.

В блоке 5 реализована проверка условий формирования конечного результата. Если облако не сформировано, то главный список направлений обнуляется (блок 6) и обновляется (блок 7) на основе правил обработки нормально распределенных статистических данных. Далее реализована процедура выбора адреса новой ячейки (блок 9) с последующей проверкой наличия примеси в данной ячейке (блок 10).

Если примесь в ячейке отсутствует, то запускается процедура ее заполнения: сбрасывается счетчик промахов (блок 11), ячейка заполняется облаком (блок 12), номер частицы записывается в массив статистики (блок 13), все соседние ячейки данной ячейки заносятся в списки направлений (блок 14) и модифицируется индекс частицы (блок 15). Если примесь присутствует, то число промахов увеличивается (блок 17).

Алгоритмические особенности расчета на основе эмпирического КА. Блок-схема расчета (рисунок 3.6) представлена следующими блоками: ввода информации; инициализации модели; синхронизации; разрешения расчета; расчета расстояния; преобразования и вывода информации. Детализируем схему обработки информации.

1. *Блок ввода.* Входные данные и параметры алгоритма: координаты источника (x_0, y_0) ; множество адресов ячеек преград Ω_4 ; поле дисперсии ветра sF ; поле направлений ветра mF ; Q - мощность выброса $[\text{кгс}^{-1}]$; K - безразмерный коэффициент застройки; U - средняя скорость ветра $[\text{мс}^{-1}]$; T_i - окрестность 16-точечного шаблона i -той клетки.

2. *Блок инициализации.* По заданным ранее координатами источника выброса $x=(y_0, x_0)$ в массив расстояний S_{new} заносится начальное значение, соответствующее минимальному расстоянию в шаблоне соседства (рис. 2.11).

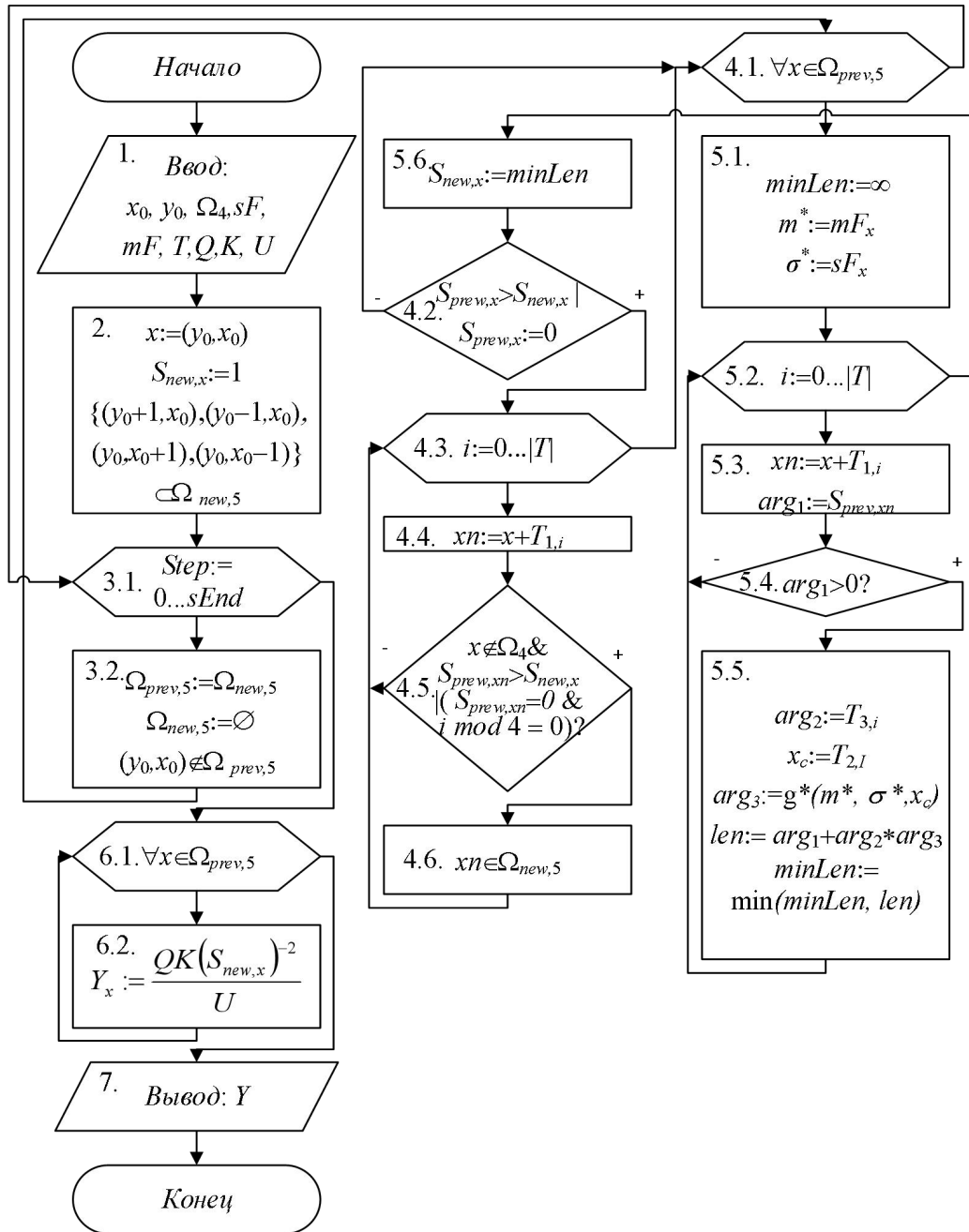


Рисунок 3.6 - Блок-схема расчета эмпирического КА

На основе окрестности фон Неймана вокруг ячейки источника (с адресом x) формируется множество адресов $\Omega_{new,5}$ разрешенных для обработки опорных клеток, для которых будет произведен расчет поля расстояний. Индикатор new отображает последовательность алгоритмических вычислений.

3. *Блок синхронизации.* Индикатор $prev$ характеризует результаты, полученные на предыдущем шаге вычислений ($\Omega_{prev,5} = \Omega_{new,5}$; $\Omega_{new,5} = \emptyset$). Введен запрет на обработку адреса источника $x = (y_0, x_0) \notin \Omega_{prev,5}$ с минимальным на поле

S_x координатным расстоянием, поскольку в T_x -окрестности отсутствуют опорные для его расчета клетки.

4. *Блок разрешения.* В случае, если новое расчетное значение $S_{prev,x} > S_{new,x}$, то запускается процедура отбора адресов клеток $\Omega_{prev,5}$, которые будут обработаны на следующем шаге ($step+1$). Процедура отбора позволила устранить артефакты разрыва поля, связанные с расчетом граничных значений концентрации. В идеале, при встречных атмосферных потоках результирующая концентрация загрязнителя должна суммироваться, однако в рассматриваемом случае для устранения разрыва поля использовано значение максимальной концентрации вещества.

Основные правила процедуры отбора опорной клетки (с адресом xn): отсутствие преграды ($xn \notin \Omega_4$); выполнение условия $S_{prev,xn} > S_{prev,x}$, в ином случае, нарушается требование минимального расстояния до источника и величина $S_{new,x}$ далее не будет рассчитана; если адрес клетки еще не обработан (выполнено условие $S_{prev,xn} = 0$) и клетка принадлежит окрестности фон Неймана ($i \bmod 4 = 0$), то она подлежит отбору. Окрестность фон Неймана устраняет алгоритмическую неопределенность (при наличии преград и т.д.) и ограничивает множество опорных клеток, разрешенных для обработки в блоке расчета расстояний.

5. *Блок расчета расстояния.* Для каждой ячейки T_x -окрестности, образованной вокруг опорной клетки, рассчитывается расстояние len от источника выброса. Из окрестности выбирается ячейка с минимальным расстоянием от источника $minLen = \min(minLen, len)$, которое ставится в соответствие заданной опорной точке. Процедура применима только для клеток с разрешенными адресами ($\Omega_{prev,5}$). Для расчета расстояния len использовано соотношение (3.11):

$$len = arg_1 + arg_2 \cdot arg_3, \quad (3.11)$$

где первая составляющая arg_1 учитывает отклонение $S_{prev,xn}$ координат опорной клетки от координат источника выброса ($arg_1 = S_{prev,xn}$).

При выполнении условия $arg_1 > 0$, анализируется T_x -окрестность опорной клетки. Рассчитывается расстояние $arg_2 = T_{3,i}$ каждой i -той ячейки окрестности и определяется угловое направление $x_c = T_{2,i}$ ее расположения в схеме 16-точечного шаблона соседства (рис. 2.11). На основе графика модифицирующей функции $g^*(x_c)$, соответствующего заданному набору значений (m^*, σ^*) , по фиксированному угловому направлению x_c формируется величина коэффициента arg_3 , используемая для расчета расстояния len в соотношении (3.11). В направлении $x_c = m^*$ поле расстояний искажается только на величину $\Delta = k_1 \sigma^* + l$.

Семейство кривых искажения $g^*(x_c)$ поля расстояний S_x представлено на рисунке 3.7. Каждой кривой соответствует набор значений $(m^*[\text{градусы } ^\circ], \sigma^*[\text{рад}])$, отображенный в легенде диаграммы.

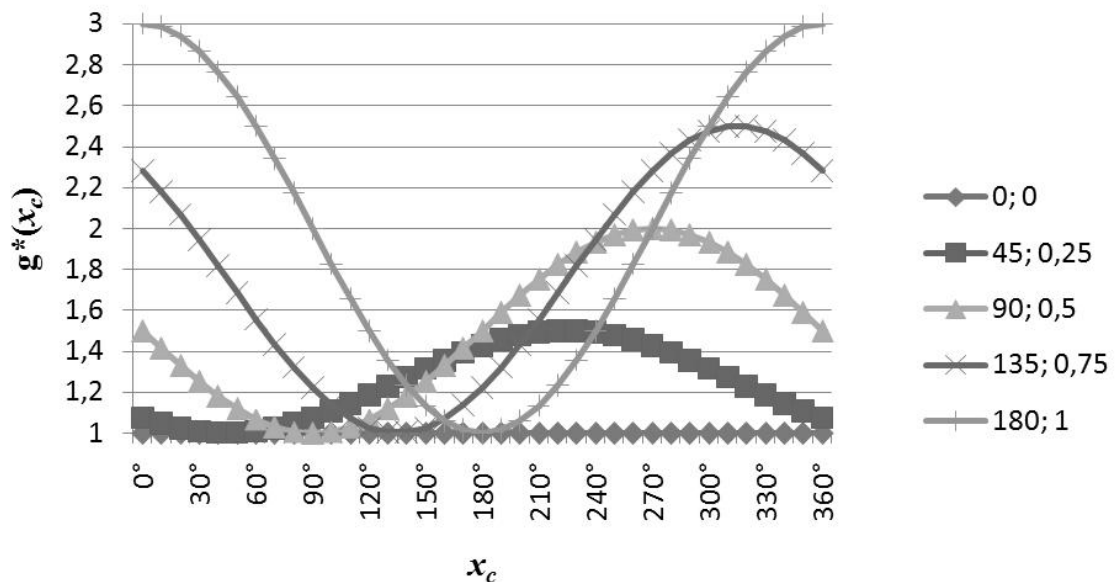


Рисунок 3.7 - Семейство кривых искажения $g^*(x_c)$ поля расстояний в T_x -окрестности опорной клетки для заданного набора значений (m^*, σ^*)

Таким образом, корректирующий коэффициент arg_3 является основным компонентом симуляции турбулентной диффузии выброса и учитывает искажение поля расстояний в зависимости от углового направления x_c . Для всех разрешенных опорных клеток по соотношению (3.11) рассчитывается массив минимальных значений $minLen$ и формируется карта расстояний.

6. *Блок преобразования.* Сформированная карта расстояний S_{new} преобразуется в поле концентраций Y_x для дальнейшей визуализации ОЗЗ и

интерпретации оперативной ситуации. Для реализации такой процедуры целесообразно использовать стандартные алгоритмы преобразования, которые не учитывают данные метеорологической обстановки. Как было отмечено ранее, для расчета концентраций АХОВ применен алгоритм SUDC.

7. *Блок вывода.* После получения результирующих данных о размере и границах ОЗЗ пользователь может проанализировать отклонения фактических и прогнозных значений концентраций АХОВ в местах наблюдений и оценить возможности дальнейшего уточнения параметров прогноза по данным мониторинга. Сканирование значений параметров, отличных от m^* и σ^* , не потребует обязательного перезапуска алгоритма.

Обобщенный алгоритм параметрической настройки. Сформированный в результате исследований обобщенный алгоритм настройки прогнозных моделей на основе уравнения Гаусса и КА-подхода представлен на рисунке 3.8.

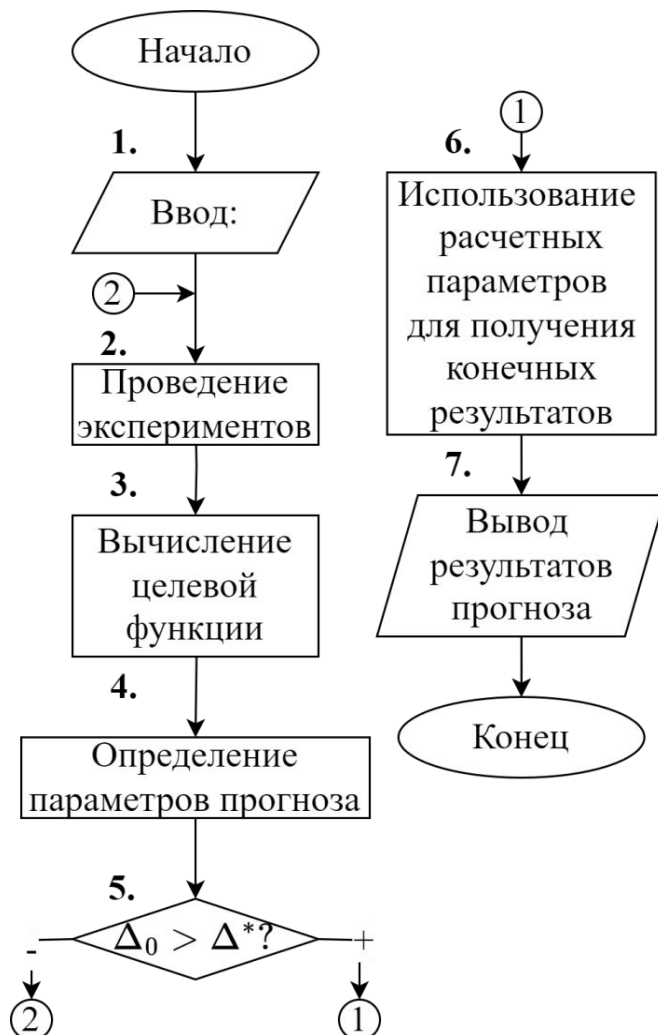


Рисунок 3.8 Обобщенный алгоритм параметрической настройки

3.2 Программная реализация комплексной системы

3.2.1 Разработка архитектуры программных модулей системы

В настоящее время прототип комплексной системы содержит две составляющие, объединенные в рамках одного программного комплекса:

- Проект подсистемы прогноза рассеивания аварийных выбросов на основе алгоритма Гаусса [141].
- Проект интегрированной подсистемы визуализации и анализа последствий аварийных выбросов на основе вероятностного [142], фронтального и эмпирического КА-алгоритма [143].

Разработанные проекты обладают аналогичной функциональной структурой, но различным составом программных компонентов. Более сложная архитектура второго проекта учитывает также подсистему преобразования слоя застройки, формирующую контуры макета местности.

Предполагаемая структурная схема проекта приведена на рисунке 3.9. Модуль прогноза реализует заданный пользователем алгоритм моделирования и формирует результирующие данные полей концентрации АХОВ $C_i^m(x,y,z,t)$ на месте ЧС. В нем обрабатывается информация, поступающая из блока ввода априорной информации, в том числе: фактические метеоданные и параметры выброса (возможная их экспертная оценка). Для работы модуля также необходима информация модуля конфигурации застройки, который преобразует данные ГИС в контурный макет местности.

Данные подсистемы мониторинга, содержащие сведения о координатах расположения датчиков наблюдений и результаты измерения концентрации АХОВ в местах наблюдений $C_i^d(x,y,z,t)$, поступают в модули расчета параметров и топографической привязки датчиков.

В модуле настройки, который реализует алгоритмы глобального поиска и настройки параметров прогноза, на основании данных системы мониторинга и модуля прогноза осуществляется подбор параметров P_{var} по минимуму

критериальной оценки Δ_0 . Результаты имитационного эксперимента (с наилучшими параметрами) передаются в модуль визуализации.

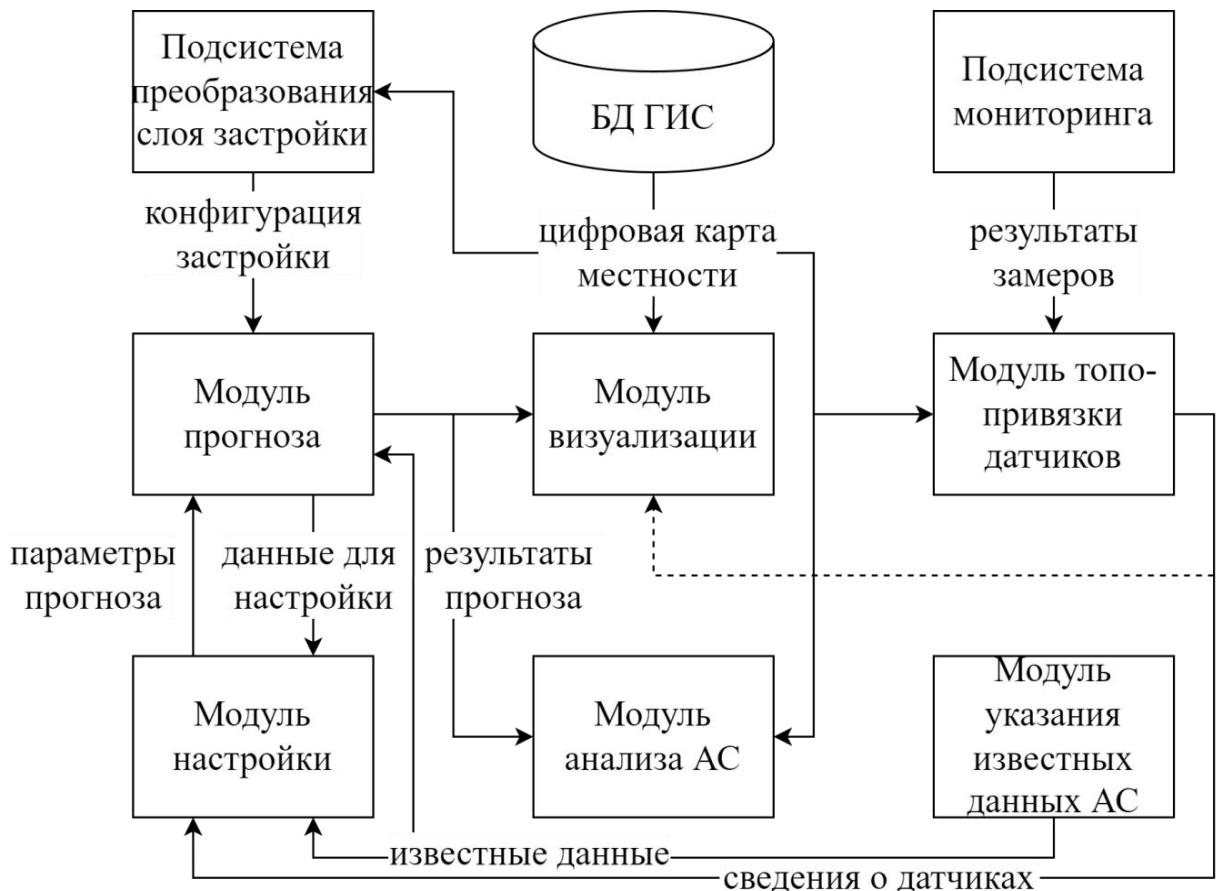


Рисунок 3.9 - Структурная схема прототипа системы

В модуле визуализации, на цифровой карте местности, импортируемой из ГИС, отображаются результирующие данные модели (границы ОЗЗ) с учетом топографической привязки датчиков мониторинга. В модуле анализа АС формируется сводный результат моделирования.

Описание интерфейса программы с прогнозом на основе уравнения Гаусса. Макет экрана прототипа с визуализацией поля концентраций при мезомасштабном уровне аварии отображен на рисунке 3.10.

В данной версии программы реализована возможность автономной загрузки карты с указанием её географических координат. Функции ввода-вывода программы реализованы на основе интерфейса программирования приложений Windows Forms. Макет окна программы содержит: область настройки алгоритма и область визуализации выброса с отображением полей концентрации АХОВ.

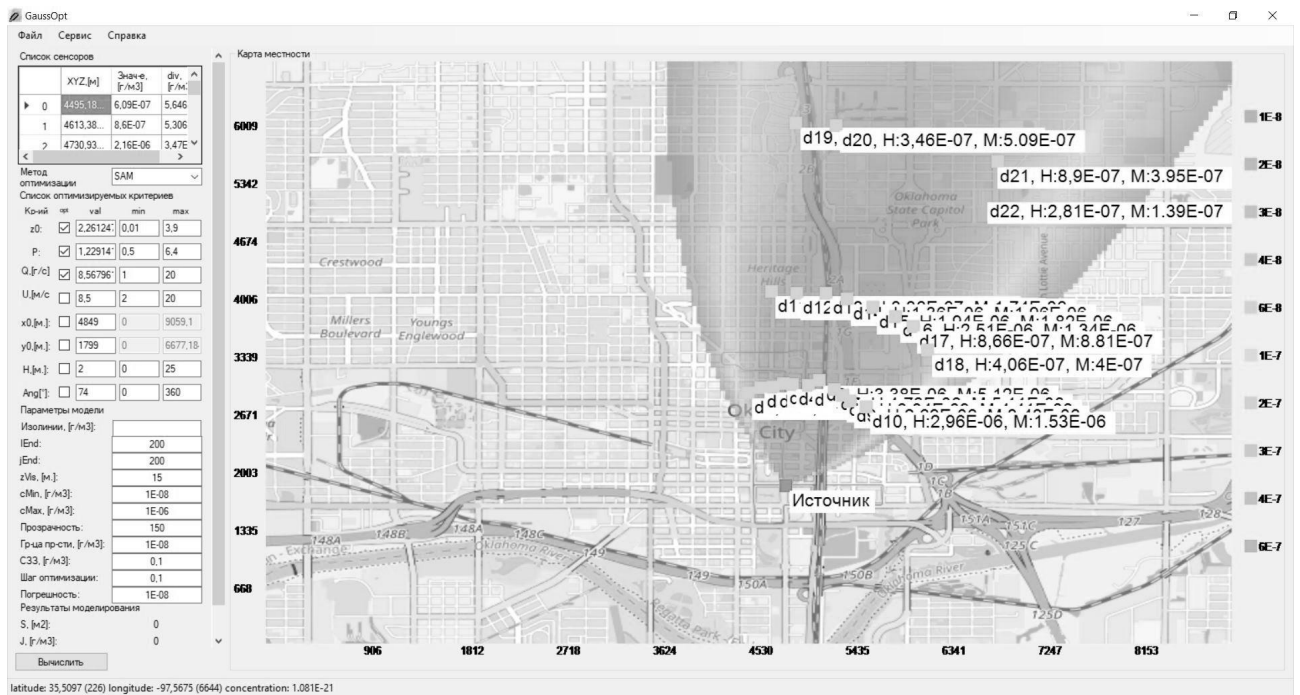


Рисунок 3.10 - Макет экрана прототипа с визуализацией поля концентраций с прогнозом на основе уравнения Гаусса

Разработка интерфейса программы с прогнозом на основе КА-подхода.

Для разработки интерфейса программы выбран язык разметки XAML. Разделение логики приложения, интерфейса пользователя (UI) и данных основано на паттерне MVVM.

XAML - это декларативный язык разметки, который используется в приложениях WPF (Windows Presentation Foundation), а также в технологиях UWP (Universal Windows Platform) и Xamarin.Forms. Он позволяет реализовать визуальный интерфейс в виде разметки, аналогичной XML. Паттерн MVVM является каркасом приложения. Модель (Model) представляет бизнес-логику и данные. Представление (View) отвечает за отображение визуального интерфейса, а модель представления (ViewModel) служит связующим звеном между моделью и представлением.

Математическое ядро прототипа реализовано на основе языка программирования C++, который обеспечивает высокую производительность и эффективность выполнения кода. При таком выборе также возникали и дополнительные трудности разработки. Возможные ошибки в управлении

памятью или некорректная оптимизация способны привести к утечкам памяти и нестабильности программы. В C++ отсутствует нативная поддержка событий.

Схема взаимодействия вычислительного ядра с пользовательским интерфейсом прототипа приведена на рисунке 3.11.

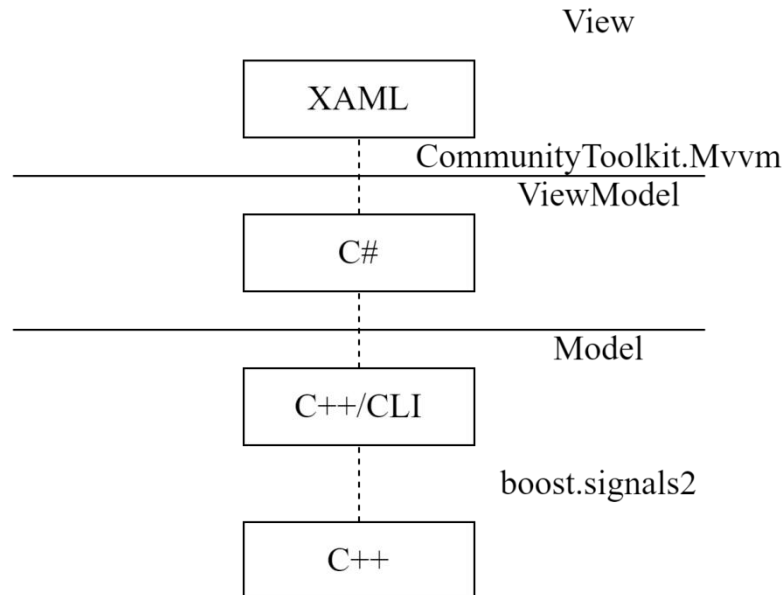


Рисунок 3.11 - Схема взаимодействия вычислительного ядра с пользовательским интерфейсом прототипа

Для реализации событий использован набор библиотек Boost, который обеспечивает многопоточность и эффективную обработку событий. В частности, применена библиотека Signals2, предназначенная для реализации сигналов и слотов (signals and slots) в языке C++.

Для работы с ядром, написанным на C++, использовался язык C++/CLI или Managed C++, который предоставляет инструментарий для написания моста между кодом на C++ и кодом на C#. Язык CLI/C++ реализует удобный способ интеграции существующего кода C++ с проектами .NET, особенно в проектах с неуправляемым кодом или интерфейсом API.

3.2.2 Разработка макета преград

В ситуациях, когда оперативность организационного решения по управлению силами и средствами имеет определяющее значение (например - в аварийной ситуации), процедура генерации детализированной карты рельефа при

выдвигении на место аварии должна быть осуществлена с минимальными временными затратами. На этапе подготовительных работ необходимо сформировать предварительную геопространственную базу данных чрезвычайной ситуации (ЧС), содержащую: карты рельефа местности, схему застройки территории, информацию о дорогах и преградах и т.д. К основным источникам информации такой базы данных следует отнести геоинформационные системы (средства управления географической информацией), которые позволяют создавать, редактировать и анализировать пространственные данные.

Для построения макета преград необходимо использовать готовые решения, предоставляющие пользователю графическую информацию о конфигурации зданий и строений в зоне загрязнения. Существует большое количество как платных ГИС (Qlik GeoAnalytics, Bentley Map), так и бесплатных систем (QGIS, OpenStreetMap). Некоторые системы (ArcGIS, MapInfo Professional) доступны в версиях для частного использования.

Наиболее перспективной в данном плане является система OSM: продукт является бесплатным и поставляется с открытым исходным кодом; система располагает данными для большинства географических районов мира; возможность интеграции системы в сторонние приложения посредством открытого API; автономный режим работы системы.

Пространственные объекты ГИС формируются на основе полигонов. В настоящее время разработаны и активно используются алгоритмы определения конфигурации застройки на двумерной карте местности. К ним относится алгоритм "Ray Casting" (бросания лучей), позволяющий определить принадлежность заданной пользователем точки пространства к определенному полигону в зоне загрязнения местности. Принцип работы алгоритма основан на подсчете узлов пересечения луча, исходящего из проверяемой точки, с границами многоугольника полигона. Если множество узлов является нечетным, то исследуемая точка принадлежит полигону.

В ходе имитационных экспериментов была выявлены основные проблемы, не позволяющие корректно соотносить реперные точки к объектам

(полигонам) зоны загрязнения. Контуры распределенных объектов выходят за пределы границ автономной карты и ограничивают возможности анализа узлов пересечения. На заданном фрагменте цифровой карты местности практически всегда расположены не только простые замкнутые полигоны, но и мультиполигоны более сложной формы.

Для разрешения вышеуказанной проблемы, была разработана модификация алгоритма "Ray Casting", в которую включены дополнительные правила отбора реперных точек (для перебора использовались только точки, принадлежащие контурным фигурам небольшого размера - полигонам застройки). Для ускорения процедуры обработки информации был разработан и реализован словарь объектов ГИС, который обеспечивает поиск узла по идентификатору ID.

Пример сформированной контурной карты застройки местности с использованием разработанной модификации алгоритма "Ray Casting" приведен на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 - Фрагмент контурной карты застройки г. Твери, разработанной с использованием модификации алгоритма "Ray Casting"

Геопространственные данные предоставляют особые возможности при ликвидации ЧС, основанные на пространственном анализе зоны выброса. Прежде всего, это возможности оценки загрязнения объектов критической инфраструктуры, жилого фонда, школ, больниц и прочих социальных объектов. Такой анализ позволяет адекватно взвесить риски и принять адекватные меры по планированию и размещению сил и средств, а также построить маршруты по эвакуации населения, находящегося в санитарной защитной зоне.

3.3 Контрольное испытание системы

Экспериментальное исследование разработанных алгоритмов проведено с использованием данных полевых испытаний индикатора загрязнения Joint Urban 2003 (JU03) [144], которые являются основой многочисленных научных исследований по вопросам экологического мониторинга. Согласно [145], только к середине 2006 года проведено более 120 таких научных исследований.

Используемая далее информация о полевых замерах предоставляется как "public domain" [146] и относится к творческим материалам, которые не защищены законами об интеллектуальной собственности, такими как законы об авторском праве, товарных знаках или патентах.

При выборе исходных данных учтены ограничения масштаба выброса: для испытания подсистемы прогноза рассеивания на основе уравнения Гаусса использованы замеры концентрации, расположенные на расстоянии не менее 1 км от источника выброса; для испытания подсистемы прогноза на основе КА-подхода - на расстоянии не более 1 км от источника выброса.

Из всего массива наблюдений отобраны наблюдения IOP 3 (набор данных 3), IOP 4 (набор данных 4) и IOP 6 (набор данных 6), которым соответствуют условия устойчивого, преимущественно юго-юго-западного направления ветра. Данные IOP 1, IOP 2 и IOP 5 исключены по следующим причинам: при обработке IOP 1 и IOP 2 возникают проблемы с настройкой входных параметров [147]; в случае IOP 5 наблюдался неустойчивый ветер. При анализе данных полевых испытаний индикатора загрязнения Joint Urban 2003 (JU03) *применено правило отбора*

опорных замеров: замеры с уровнем концентрации $c_x^d \leq 45$ pptv считались неопределенными [127].

Для конвертирования единиц измерения концентрации использовано соотношение (3.12) [148]:

$$c_x^d [\text{мг/м}^3] = 0,0409 \cdot c_x^d [\text{ppm}] \cdot M [\text{г/моль}], \quad (3.12)$$

где M - молярная масса загрязнителя.

При обработке данных полевых наблюдений применяют различные интервалы временного усреднения [110]. По мере продвижения облака выброса проявляются эффекты локальной атмосферной турбулентности, которые приводят к «колебаниям» замеров концентрации. И одnoseкундный замер с подветренной стороны облака не будет соответствовать уровню усредненной концентрации, полученному за минуту или час наблюдения. Поэтому в качестве основных показателей испытаний в работе выбраны уровни максимальной концентрации, приведенные в таблицах Joint Urban 2003 [144].

В [144] также отмечено, что основные замеры концентрации индикатора были зафиксированы в период выброса вещества. Длительность выброса составила около 30 мин. Таким образом, наборы исходных данных, необходимые для прогнозирования и визуализации последствий выброса, были сформированы в начальный период наблюдений.

Условия экспериментов: плотность индикатора SF6 $\rho_{\text{SF6}}=6,164$ гл⁻¹; плотность воздуха $\rho_v=1,2754$ гл⁻¹; высота источника выброса $z^*=3$ м; вероятный класс стабильности атмосферы Пасквилла - С. В условиях дефицита данных сделано допущение о пассивности примеси. Направление и скорость ветра в экспериментах соответствуют данным таблицы 2 [122]. Для определения скорости ветра использованы замеры на высоте 10 м.

Для оценки работоспособности подсистемы прогноза на основе КА-подхода в сложных условиях рассеивания облака примеси, наблюдаемых при локальном уровне аварии, использован набор данных DAPPLE 2003 [149]. Данные эксперимента DAPPLE по рассеиванию примесей в городской среде: скорость

ветра на высоте крыши $U=3$ м/с; средняя высота зданий $H_f=22$ м мощность выброса трассера $Q=1,27 \times 10^{-7}$ кг/с; плотность трассера перфторметилциклогексана (PMCH) $\rho_{\text{PMCH}}=1,788$ кг/л (при 25°C); плотность воздуха $\rho_v=1,2754$ г/л; высота источника $z^*=3$ м; вероятный класс Пасквила - D.

В приложении А представлены результаты исследования разработанных алгоритмов с использованием тестовых данных - рисунки с визуализацией области выброса и результирующие диаграммы пар наблюдение- прогноз.

На результирующих диаграммах отображена зависимость между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями концентраций, выраженными в единицах измерения $[\text{кг}/\text{м}^3]$ и $[\text{г}/\text{м}^3]$. Логарифмический масштаб данных позволил отобразить все анализируемые пары прогноз - наблюдение. Квадратными маркерами обозначены опорные пары, которые использованы для параметрической настройки прогнозных моделей, треугольными маркерами - пары, по которым оценивалась работоспособность алгоритмов прогноза. Круглыми маркерами обозначены «чувствительные» пары, которые также учитывались при расчете показателей эффективности прогноза. Использование подобных «чувствительных» вариантов в качестве опорных пар приводит к ошибкам прогнозирования и искажениям результатов визуализации.

Сплошная линия «Точное соответствие» на результирующих диаграммах соответствует идеальному варианту прогноза, при котором прогнозируемые значения совпадают с замерами концентрации. Две пунктирные линии обозначают границы диапазона, в пределах которого пары считаются удовлетворительными согласно критерию $FAC2$ (доле пар, попадающих в границы диапазона, от общего числа таких пар).

Результаты испытания подсистемы прогноза на основе уравнения Гаусса при мезо-масштабном уровне аварии представлены на рисунках приложения А.1 - А.3. Выводы по диаграмме сравнения приведены в разделе обсуждения. В целом, результаты испытаний показали, что исследуемая подсистема является работоспособной для заданных условий вычислительного эксперимента.

Результаты испытания подсистемы прогноза на основе вероятностного КА-подхода. Для испытания подсистемы в сложных условиях выброса при локальном уровне аварии использованы ранее представленные наборы данных (IOP 3, IOP 4 и IOP 6) полевых испытаний Joint Urban 2003 (JU03) [144] и набор данных DAPPLE 2003 [149] с примерным полем ветрового потока.

Результаты испытания подсистемы прогноза на основе вероятностного КА-подхода представлены на рисунках приложения А.4 - А.6. Эксперимент с использованием данных DAPPLE представлен на рисунке А.7. Анализ результатов показал, что вероятностный КА воспроизводит эффекты взаимодействия с препятствиями и способен учитывать конфигурацию поля ветра. Для каждой ячейки области моделирования необходимо задать математическое ожидание и дисперсию направления ветра. Среднеквадратическое отклонение остается варьируемым параметром, а для каждой ячейки вводится в соответствие поправочный коэффициент, учитывающий относительную скорость ветра.

Из результирующей диаграммы (рисунок А.7) следует, что прогнозное значение концентрации, рассчитанное для пары №9 (d_9), примерно в 4 раза больше соответствующего замера. Данный эффект связан, прежде всего, с недостаточной точностью моделирования ветровых потоков. В исследовании [149] показано, что направление ветра в данной точке замера случайным образом изменяется и не может быть предсказано с определенной точностью.

В [110] отмечено, что микрометеорологические модели (в том числе, CFD-модели) управляются начальными и граничными условиями относительно заданной области прогнозирования. Желательно, чтобы граничные условия изменялись со временем. Корректный и адекватный подход к формированию начальных и граничных условий заключается во «вложении» или «уменьшении масштаба» моделей большего уровня. Таким образом, указанная выше модель чувствительна к ошибкам предсказания потоков ветра.

Результаты испытания подсистемы прогноза на основе эмпирического КА-подхода. Результаты эксперимента показаны на рисунках приложения А.8 - А.11. Подчеркнутыми являются «чувствительные» замеры, полужирным тоном

выделены опорные замеры. Чувствительность пар наблюдение-прогноз обусловлена следующими причинами: на границах расчетной области заданы одинаковые краевые условия, что является грубым приближением к реальным условиям, которые характеризуются неоднородностью и временной изменчивостью; при низких концентрациях наблюдается завышенный разброс значений в парах наблюдение-прогноз [127].

По итогам трех представленных выше экспериментов (рисунки А.8 - А.10.) можно отметить некоторую переоценку замеров, номера которых заканчиваются на цифры 1 и 2. Анализ показал, что все отмеченные варианты замеров расположены на западной стороне расчетной области.

На результаты моделирования оказывают влияние упрощенные краевые условия. В последнем эксперименте (рисунок А.11) для всего периметра расчетной области были заданы одинаковые величины скорости ветра 2,2 м/с, при среднем направлении ветра 76° . Однако, из анализа области выброса следует, что величина скорости ветра на юго-западной границе карты должна быть больше. Похожая ситуация наблюдалась при настройке вероятностной КА модели по данным DAPPLE, когда упрощение метеорологической модели привело к занижению результатов прогноза для пары №9 (рисунок А.7).

Результаты испытаний подтвердили основные выводы, приведенные в п.2.3.5 диссертации.

3.4 Обсуждение результатов исследования

3.4.1 Оценка эффективности прогноза

Согласно [150], для «современной» прогнозной модели характерны следующие общепринятые интервалы критериальных показателей: $-0,3 < FB < 0,3$; $NMSE < 4$; $FAC2 \geq 0,5$; $0,7 < MG < 1,3$; $VG < 1,5$. В таблице 3.1 приведена сводная информация, полученная в результате контрольного испытания системы. При расчете критериев FB , MG , $NMSE$, VG учитывались сформированные пары наблюдение-прогноз, соответствующие отобраным замерам. В таблице выделены значения показателей, удовлетворяющие условиям эффективного прогноза.

Анализ приведенной в таблице 3.1 сводной информации показал, что большинство значений критериальных показателей, рассчитанных в результате испытания системы, соответствует указанным выше требованиям. Подсистема прогноза на основе уравнения Гаусса работоспособна в условиях устойчивого ветра при макро- и мезо-уровневом масштабе аварий. Подсистема прогноза на основе КА-похода демонстрирует работоспособность в условиях застройки местности и способна учитывать влияние поля ветра на конфигурацию области выброса.

Таблица 3.1 - Сводная таблица эффективности прогноза

Тип модели	Эксперимент	FB	MG	$NMSE$	VG	$FAC2$
Алгоритм Гаусса (более 1 км)	JU03 IOP3	-0,58	0,84	2,18	6,86	0,57
	JU03 IOP4	-0,24	0,74	0,42	1,64	0,81
	JU03 IOP6	0,09	1,24	0,75	2,05	0,80
<i>Среднее значение</i>		-0,24	0,94	1,12	3,52	0,72
<i>Среднее отклонение</i>		0,23	0,20	0,71	2,23	0,10
Вероятностный КА-алгоритм (до 1 км)	JU03 IOP3	0,16	1,33	0,23	1,29	0,86
	JU03 IOP4	-0,02	0,78	0,12	1,82	0,80
	JU03 IOP6	0,11	1,06	0,15	1,20	0,90
<i>Среднее значение</i>		0,08	1,06	0,17	1,44	0,85
<i>Среднее отклонение</i>		0,07	0,18	0,04	0,26	0,03
Эмпирический КА-алгоритм (до 1 км)	JU03 IOP3	-0,15	0,63	1,36	4,39	0,61
	JU03 IOP4	-0,42	0,32	0,93	15,33	0,36
	JU03 IOP6	-0,04	0,71	0,31	1,60	0,60
<i>Среднее значение</i>		-0,20	0,55	0,87	7,11	0,52
<i>Среднее отклонение</i>		0,14	0,15	0,37	5,48	0,11
Вероятностный КА-алгоритм (до 1 км, поле ветра)	DAPPLE	0,43	1,84	0,21	1,72	0,50
Эмпирический КА-алгоритм (до 1 км, поле ветра)		0,49	1,39	0,35	1,62	0,60

В таблице 3.2 представлены обобщенные для наборов данных IOP3, IOP4 и IOP6 показатели контрольного испытания системы в сравнении результатами

модели HPAC (Hazard Prediction and Assessment Capability - возможности прогнозирования и оценки опасностей) [147].

При составлении таблицы 3.2 использованы следующие аббревиатуры и сокращения [147]: BDF - базовые данные метеорологической службы NWS; MED - выходные данные мезомасштабной метеорологической модели MEDOC; AVG - средняя скорость и направление ветра по данным анемометров; UPWIND - скорость и направление ветра по данным системы метеорологических приборов PWIDS; UDM (Urban Dispersion Model) - модель городского рассеивания; UC (Urban Canopy) - модель городского «полога».

Таблица 3.2 - Показатели эффективности прогноза в сравнении результатами модели HPAC [147]

Метод метеопрогноза	Модель рассеивания	<i>FB</i>	<i>MG</i>	<i>NMSE</i>	<i>VG</i>	<i>FAC2</i>
BDF	UDM	0,88	2,28	3,4	3	0,19
	UC	-0,29	1,41	1,6	2	0,59
MED	UDM	0,91	1,81	3,9	2,1	0,50
	UC	-0,38	0,89	1,9	1,6	0,70
AVG	UDM	1,02	2,15	4,9	2,4	0,46
	UC	0,52	1,59	1,4	1,6	0,63
UPWIND	UDM	0,44	1,04	1,2	1,5	0,74
	UC	-0,89	0,47	3,9	2,3	0,44
Алгоритм Гаусса		-0,24	0,94	1,12	3,52	0,72
Вероятностный КА-алгоритм		0,08	1,06	0,17	1,44	0,85
Эмпирический КА-алгоритм		-0,20	0,55	0,87	7,11	0,52
Вероятностный КА-алгоритм с полем ветра		0,43	1,84	0,21	1,72	0,50
Эмпирический КА-алгоритм модель с полем ветра		0,49	1,39	0,35	1,62	0,60

Результаты сравнения критериев, приведенные в таблице 3.2, показали, что представленные в диссертационной работе алгоритмы демонстрируют приемлемые для практического использования возможности.

3.4.2 Характеристики программного средства

В проекте прогноза рассеивания аварийных выбросов на основе алгоритма Гаусса целевая функция настройки формируется на основе ограниченного числа опорных замеров. Поэтому значительных требований к разработке проекта выдвинуто не было. После инсталляции 32-х разрядной версии проекта на ноутбуке с процессором Intel Core i5-6200U, для реализации процедуры «Метода отжига» с 4 опорными замерами потребовалось около 2 секунд процессорного времени. При увеличении числа опорных замеров затраты процессорного времени возрастают до 5-10 секунд. Необходимый для проекта объем оперативной памяти составляет 43 МБ.

Проект подсистемы визуализации выброса АХОВ на основе вероятностного клеточного автомата на данный момент ограничен рамками двумерной расчетной сетки. При разрешении сетки 150x150 ячеек программа потребляет около 40 МБ оперативной памяти. Проект функционирует под управлением ОС Windows 7-11 с предустановленной .NET framework 4.0. Общий размер программы 1,83 МБ.

На рисунке 3.13 представлена зависимость времени вычислений от размера области прогнозирования, определенная в 5 серийных испытаниях подсистемы с вероятностным КА-алгоритмом при обработке набора данных IOP3. В каждом испытании было выполнено 35 вычислительных экспериментов. Маркерами обозначены результаты испытаний, сгруппированные по ряду значений среднеквадратического отклонения σ^* для вероятностного КА-алгоритма. Отдельно представлена серия испытаний эмпирического КА-алгоритма, быстроедействие которого не зависит от вариации параметра σ^* .

Сокращение процедур, имитирующих полет частицы, привело к снижению временных затрат на поиск опорного решения и обеспечило представленную на рисунке 3.13 линейную зависимость времени вычислений

от размера области моделирования для эмпирического КА-алгоритма. Обработка результатов производилась на мобильном процессоре Intel(R) Core i5 - 6200U CPU @ 2.30GHz (два ядра, четыре логических процессора).

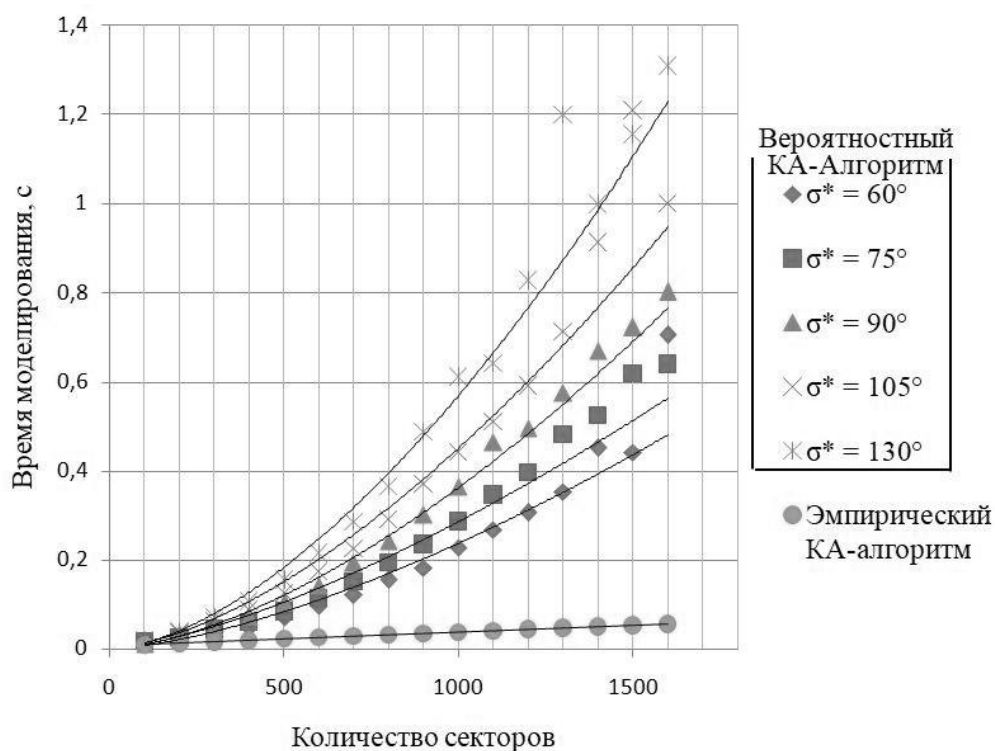


Рисунок 3.13 - Результаты испытаний вероятностного и эмпирического КА-алгоритма при вариациях параметра σ^*

3.4.3 Рекомендации и предложения

В ходе экспериментов наблюдались случаи значительного отклонения концентрации в парах наблюдение-замер. Если такие пары соответствуют опорным замерам, то возникают ошибки расчета параметров, способные исказить результат прогнозирования. Наиболее неблагоприятными для расчета параметров являются условия компактного расположения опорных замеров вблизи оси выброса АХОВ.

Подходом к разрешению данной проблемы является декомпозиция функции критериальной оценки на множестве опорных замеров. На основе метода перебора для каждой пары наблюдение-замер формируется функция отклика для оценки всех возможных комбинаций варьируемых параметров. Отклик представлен отношением концентрации в парах наблюдение-прогноз. Замер объявляется чувствительным, если число комбинаций параметров, приводящих к

более чем 5-ти кратному отклонению значений в паре наблюдение-замер, составляет более 75% от общего числа комбинаций.

По сравнению с традиционными подходами, в которых определяется процент прямого соответствия пар прогноз-наблюдение, такой подход учитывает возможные вариации параметров. Если результаты сканирования параметров прогноза находятся в установленных пределах, то такие прогнозы считаются стабильными в заданном диапазоне изменения параметров.

Для ускорения процедур поиска решения, целесообразно использовать алгоритмы параллельных вычислений. При этом разрешается проблема разделения расчетного поля Ω на отдельные потоки. Полный доступ к разделяемой среде отдельным потокам в эмпирическом КА-алгоритме не предоставляется: каждый поток вносит изменения только в независимые ячейки расчетной сетки на основе данных из окрестных ячеек.

Необходимо отметить, что расчет поля метеорологических данных относится к дальнейшим исследованиям, поскольку важно учитывать влияние таких данных на общую производительность и точность моделей. Согласно данным испытания прототип системы позволяет получить итоговые результаты в пределах одной минуты, что в условиях дефицита времени значимым образом сказывается на оперативности информирования о последствиях выброса.

Дальнейшее развитие комплексной системы связано с внедрением в обобщенную схему обработки аварийной ситуации подхода Байеса и алгоритмов стохастического прогнозирования на основе цепей Маркова для эффективной оценки неопределенностей, связанных со сложными атмосферными процессами.

В результате исследования разработаны алгоритмы и программные модули системы с подробным описанием расчетных выражений и обозначением переменных. На наборе тестовых примеров подтверждена работоспособность предлагаемых алгоритмов. Оценена возможность визуализация зоны загрязнения в условиях городской среды. Критериальные показатели в контрольном испытании в основном соответствуют требованиям работоспособности и производительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические исследования и вычислительные эксперименты в представленной диссертационной работе по разработке системы визуализации и анализа последствий аварий на химически опасном производстве позволили сделать следующие основные выводы:

1. Проведен тщательный анализ проблемы оперативного управления ликвидацией последствий аварийного загрязнения местности при выбросах токсических веществ на химически опасном производстве и разработанных в Российской Федерации и за рубежом научных подходов к прогнозированию параметров оперативной обстановки. Осуществлена постановка научной задачи исследований в диссертационной работе.

2. Проанализированы возможности и ограничения наиболее известного подхода Гаусса, а также клеточно-автоматного (КА) подхода для разработки метода прогнозирования и визуализации оперативной обстановки с возможностью корректировки параметров прогноза по данным химической разведки местности.

3. Проанализированы особенности и обоснованы условия применения алгоритмов прогноза (на основе уравнения Гаусса, а также вероятностного, фронтального и эмпирического клеточного автомата) для реализации во внутреннем контуре системы визуализации и анализа последствий аварий.

4. Разработаны и программно реализованы алгоритмы клеточно-автоматной модели прогноза, отличающиеся учетом правил заполнения эллипса рассеивания, а также эффектов взаимодействия с препятствиями, что позволяет математически более точно описывать распространение загрязнений в условиях застройки местности.

5. Предложен подход к развитию алгоритмических возможностей комплексной системы, отличающийся возможностью визуализации области выброса с использованием ветровых потоков на основе фронтальной и эмпирической модификации алгоритмов клеточно-автоматной модели, что

позволяет в значительной степени ускорить модельные вычисления в условиях сложной конфигурации рельефа и высокой детализации карты местности.

6. Реализован алгоритм формирования цифрового макета местности, отличающийся от существующих способом формирования контуров объектов, распределенных за границами автономной карты, на основе модификации алгоритма бросания лучей.

7. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение комплексной визуализации и анализа последствий аварий, эффективность системы подтверждена вычислительными экспериментами и результатами апробации.

Таким образом, в диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача в области разработки методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации в соответствии с п. 4. «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта» и п. 12. «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации» паспорта научной специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов, И.В. Опасные технологические процессы и производства/ И.В. Антонов, С.В. Ефремов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. – 114 с. – Текст: непосредственный.
2. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федеральный закон от 20 июня 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 08.08.2024). – Текст: электронный // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234 (дата обращения: 30.09.2024).
3. Об охране окружающей среды: федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ (ред. от 08.08.2024). – Текст: электронный // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения: 30.09.2024).
4. Техногенные угрозы. Радиационные и химические аварии / Э.Н. Аюбов [и др.]. – М.: ФГБУВНИИГОЧС (ФЦ), 2016. – 124 с. – ISBN 978-5-93970-181-5. – Текст: непосредственный.
5. Balczo, M. Evaluation, improvement and guidance for the use of local-scale emergency prediction and response tools for airborne hazards in built environments / M.Balczo, [etc.]. – Brussels: COST Action ES1006, 2012. – 80 p. – Text: direct.
6. Об основах государственной политики Российской Федерации в области обеспечения химической и биологической безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу: Указ Президента РФ от 11 марта 2019 г. № 97 (ред. от 08.08.24). – Текст: электронный// СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_319787 (дата обращения: 30.09.2024).
7. О стратегии национальной безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 20 июня 2021 г. № 400. – Текст: электронный // СПС КонсультантПлюс. - URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_389271 (дата обращения: 01.09.2024).

8. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году: государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. – 686 с. – Текст: непосредственный.
9. Количество загрязняющих воздух предприятий увеличилось на 19%. – Текст: электронный // ФинЭкспертиза: интернет-сайт. - 2023.- URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2023/kol-zagr-vozd-uvelich> (дата обращения: 06.06.2024).
10. Дорфман, Н.Н. Разработка мероприятий по ликвидации последствий возможной химической аварии на перерабатывающем предприятии / Н.Н. Дорфман, А.Н. Перегудов, С.А. Бокадаров. – Текст: непосредственный // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2017. – № 1(22). – С. [номер страниц не виден на изображении]. – ISSN 2226-700X.
11. Промышленная безопасность опасных производственных объектов : учеб. пособие / В.С. Сердюк, [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – 115 с. – Текст: непосредственный.
12. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году: государственный доклад. – М.: Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. – 59 с. – Текст: непосредственный.
13. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2022 году. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2023. – 380 с. – Текст: непосредственный.
14. Меньшиков, В.В. Опасные химические объекты и техногенный риск / В.В. Меньшиков, А.А. Швыряев. – М. : Изд-во МГУ, 2003. – 109 с. – Текст: непосредственный.
15. Сибриков, С. Химическая безопасность и аналитический контроль техногенных объектов / С. Сибриков. – Ярославль: ЯрГУ, 2022. – 144 с. – Текст: непосредственный.

16. Многотоннажные отходы химической промышленности: аналитическая оценка и систематизация технологических решений / Л.Я. Шубов, [и др.]. – Текст: непосредственный // Экологические системы и приборы. – 2019. – №. 3. – С. 8-30.
17. Радоуцкий, В.Ю. Опасные технологии производства / В.Ю.Радоуцкий, В.Н. Шульженко, Н.В. Нестерова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 202 с. – Текст: непосредственный.
18. Правила безопасности химически опасных производственных объектов: об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности. – Утверждены Приказом Ростехнадзора от 07.12.2020 № 500. – Текст: электронный // Официальный портал правовой информации: интернет-ресурс. – 2020. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012230013> (дата обращения: 30.09.2024).
19. Исаев, В. С. Аварийно химически опасные вещества / В. С. Исаев, В. А. Владимиров. – Текст: непосредственный // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 618-655.
20. РД 52.04.253–90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте / Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета // СПб.: Библиотека интеграла, 2000. – 25 с. – Текст: непосредственный.
21. О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: постановление Правительства РФ от 30 дек. 2003 г. № 794: (ред. от 17.01.24). – Текст: электронный // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/-cons_doc_LAW_45914 (дата обращения: 01.09.2024).
22. Трифонов, Г.С. Муниципальное звено региональной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций / Г.С. Трифонов. – Текст: непосредственный // ГО и защита от ЧС в учреждениях, организациях и на предприятиях. – 2023. – № 1. – С. 12-17.

23. Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей: федер. закон от 22 авг. 1995 г. № 151-ФЗ: (ред. от 14.07.22). – Текст: электронный // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_7746 (дата обращения: 01.09.2024).
24. ГОСТ Р 22.7.01-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Единая дежурно-диспетчерская служба. Основные положения: нац. стандарт РФ. – Введен 29.06.2016. – М.: Стандартинформ, 2016. - 11 с. – Текст: непосредственный.
25. Методика анализа риска аварий на опасных производственных объектах морского нефтегазового комплекса. – Утверждена Приказом Ростехнадзора от 10.02.2023 № 51. – Текст: электронный // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_440212/2ff7a8c72de3994f30496a0ccbb1ddafdaddd518 (дата обращения: 30.09.2024).
26. Матвеев, Ю.Н. Основы построения автоматизированных систем оперативного управления технической безопасностью химических производств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Ю.Н. Матвеев. – Тверь: ТвГТУ, 2011. – 352 с. – Текст: непосредственный.
27. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по классификации аварийно опасных происшествий на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса». – Утверждено Приказом Ростехнадзора от 20.11.2023 № 410. – Текст: электронный// СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_464365/4273db5e484510602abad955883fa24542d577b2 (дата обращения: 30.09.2024).
28. Об утверждении требований к документационному обеспечению систем управления промышленной безопасностью : постановление Правительства Рос. Федерации от 17 авг. 2020 г. № 1243. –Текст : электронный// Официальный портал правовой информации: интернет-ресурс. - URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202008190014>. (дата обращения: 30.09.2024).
29. Матвеев, Ю.Н. Автоматизированная система поддержки принятия решений для прогнозирования процессов рассеивания химически опасных веществ / Ю.Н. Матвеев, Л.О. Чернышев. - DOI 10.15827/0236-235X.134.307-315. – Текст:

непосредственный // Программные продукты и системы. – 2021. – № 2(34). – С. 307-315.

30. Сосунов, И.В. Проблемы защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях в условиях современных вызовов и угроз: справочное пособие / И.В. Сосунов. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017. – 452 с. – Текст: непосредственный.

31. Седнев, В.А. Оценка возможной обстановки при аварии на химически опасных объектах Ставропольского края /В.А. Седнев,В.М. Немцов. - DOI 10.25257/FE.2020.1.44-53. – Текст: непосредственный // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. - 2020. - № 1. - С. 44-53.

32. Ямалов, И.У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций / И.У. Ямалов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2007. – 288 с. – ISBN 978-5-93208-193-8. – Текст: непосредственный.

33. Телегина, М.В. Поддержка принятия решений при обработке данных производственного экологического мониторинга потенциально химически опасных объектов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / М.В. Телегина. – Ижевск: ИжГТУ, 2016. – 398 с. – Текст: непосредственный.

34. Пучков В.А. Гражданская защита: энциклопедический словарь / В.А. Пучков [и др.] – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. – 706 с. – Текст: непосредственный.

35. Песков, Р.И. Основные используемые в МЧС России информационные системы / Р.И. Песков. – Текст: непосредственный // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. – 2017. – № 2(72). – С. 1-10.

36. Newman, J.P. Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: Current status and future research directions / J.P. Newman, [etc.]. - Text: direct //Environmental Modelling & Software. - 2017. - Vol. 96. - Pp. 378-409.

37. Чернышев, Л.О. Модификация алгоритма фронтального моделирования последствий аварийных выбросов на основе эмпирико-статистического подхода / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев.- DOI 10.15827/0236-235X.142.095-104. – Текст:

непосредственный// Программные продукты и системы. – 2024. – № 1 (37). – С. 95-104.

38. Hutchinson, M. A review of source term estimation methods for atmospheric dispersion events using static or mobile sensors /M. Hutchinson, H. Oh, W.H. Chen.– Text: direct//Information Fusion. – 2017. – V. 36. – Pp. 130-148.

39. Интервью Е.Л. Гениховича журналу «Экология и право». – Текст: электронный // Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова: интернет-ресурс. - URL: <http://voeikovmgo.ru/index.php/component/content/article/27sobytia/1005-intervju-e-l-genihovicha-zhurnalu-jekologija-i-pravo> (дата обращения: 31.08.2024).

40. Bosanquet, C.H. The spread of smoke and gases from chimneys / C.H Bosanquet, J.L. Pearson. – DOI:10.1039/tf9363201249. – Text: direct // Trans. Faraday Soc. – 1936. – Vol. 32. – Pp. 1249-1263.

41. Генихович, Е.Л. Моделирование и прогноз загрязнения атмосферного воздуха: история, современное состояние и перспективы развития / Е.Л. Генихович. – Текст: электронный // Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова: интернет-ресурс. - URL: http://voeikovmgo.ru/download/Conferences/Conference2013101_3/Presentations/2013101/7_%20genikhovicj.pdf (дата обращения: 31.08.2024).

42. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И Марчук. – М.: Наука, 1982. - 319 с. – Текст: непосредственный.

43. Белолипецкий, В.М. Математическое моделирование в задачах окружающей среды / В.М. Белолипецкий, Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Издательство «ИНФОЛИО пресс», 1997. - 240 с. – Текст: непосредственный.

44. Израэль, Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка окружающей природной среды. Основы мониторинга / Ю.А. Израэль. – Текст: непосредственный // Метеорология и гидрология. - 1974. - № 7. - С. 3–8.

45. Рязанов, В.И. Исследование распространения примесей в атмосфере при работе ракетных двигателей с учетом фактических метеопараметров: дис. ... канд. ф.-м. наук: 25.00.30 /В.И. Рязанов. – Нальчик: ФГБУ Высокогорный геофизический институт, 2019. – 148 с. – Текст: непосредственный.

46. Борисова, Л.Р. Анализ существующего методического аппарата по оценке токсической опасности выбросов (проливов) опасных химических веществ / Л.Р. Борисова. – Текст: непосредственный // Технологии гражданской безопасности. – 2009. – №. 3-4. – С. 52-60.
47. Олишевский, А.Т. Обзор методических подходов к моделированию загрязнения атмосферы промышленными объектами на примере США, стран ЕС и России / А.Т. Олишевский, И.В. Москочная, Р.Е. Попков. – Текст: непосредственный // Новые научные исследования: сборник статей VI междунар. науч.-практич. конф. – 2021. – С. 46-51.
48. Мензелинцев, Н.В. Математические модели рассеивания вредных веществ в атмосфере / Н.В. Мензелинцев, С.А. Богомолов, С.Б. Дьякова, [и др.]. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: материалы VI Всерос. конф. - Волгоград, 2019. - С. 268-270.
49. Губарев, С.В. Комплекс программ для расчета распространения загрязнения методом клеточных автоматов / С.В. Губарев, Д.Б. Берг, А.П. Сергеев. – Текст: непосредственный // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – № 1. – С. 2053-2057.
50. Сысоева, Е.В. Методы расчета рассеивания загрязняющих веществ в городской атмосфере / Е.В. Сысоева, М.О. Гельманова. – DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1027-1045. – Текст: непосредственный // Вестник МГСУ. – 2022. – №8. – С. 1027-1045.
51. Learning Adaptive Probabilistic Models for Uncertainty-Aware Air Pollution Prediction / Z. Wu, N. Liu, G. Li, [etc.]. -DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3247956. - Text: direct // Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2023. – Vol. 11. – Pp. 24971-24985.
52. Чернышев, Л.О. Моделирование источника загрязнения при авариях на техногенных объектах / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев, А.Р. Хабаров. – Текст : непосредственный // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XX Междунар. науч.-техн. конф., посвященной

75-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний» – 2020. – С. 222-226.

53. Чернышев, Л.О. Технологии разработки макета местности для моделирования рассеивания загрязнений / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев, В.В. Лебедев. - Текст : непосредственный // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей XI Междунар. науч.-практ. конф./ под ред. А.П. Ремонтова. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2021. – С. 162-166.

54. Панарин, В.М. Автоматизированный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха промышленно развитых территорий / В.М. Панарин, А.А. Маслова, С.А.Савинкова. – Тула: ТулГУ, 2021. – 219 с. – Текст: непосредственный.

55. Lotrecchiano, N. Spatial Interpolation Techniques for Innovative Air Quality Monitoring Systems. / N. Lotrecchiano, D. Sofia, A. Giulino, [etc.]. – DOI: 10.3303/CET2186066. – Text: direct// Chemical engineering transactions. – 2021. – Vol. 86. – Pp. 391-396.

56. Madankan, R. Application of conjugate unscented transform in source parameters estimation / R. Madankan, P. Singla, T. Singh. – Text: direct// American Control Conference: IEEE. – Washington, 2013. – Pp. 2448-2453.

57. Bieringer, P.E. Paradigms and commonalities in atmospheric source term estimation methods / P.E. Bieringer, [etc.]. – Text: direct//Atmospheric Environment. – 2017. – Vol. 156. – Pp. 102-112.

58. Astrup, P. Data assimilation in the early phase: Kalman filtering RIMPUFF / P. Astrup, [etc.]. – Forsknings center Risoe, 2004. – 32 p. – Text: direct.

59. Kalman filtration of radiation monitoring data from atmospheric dispersion of radioactive materials / M. Drews, [etc.]. – Text: direct //Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – Vol. 111, № 3. – Pp. 257-269.

60. Stohl, A. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition / A. Stohl, P. Seibert, G. Wotawa [etc.]. – Text: direct // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2012. – Vol. 12. – Pp. 2313-2343.

61. Winiarek, V. Estimation of the caesium-137 source term from the Fukushima Daiichi nuclear power plant using a consistent joint assimilation of air concentration and deposition observations / V. Winiarek, [etc.]. – Text: direct//Atmospheric environment. – 2014. – Vol. 82. – Pp. 268-279.
62. Long, K.J. Assessing sensitivity of source term estimation / K.J. Long, S.E. Haupt, G.S. Young. – Text: direct// Atmospheric Environment. – 2010. – Vol. 44, № 12, – Pp. 1558-1567.
63. Rodriguez, L.M. Impact of sensor characteristics on source characterization for dispersion modeling/ L.M. Rodriguez, S.E Haupt, G.S. Young. – Text: direct// Measurement. – 2011. – Vol. 44, №. 5. – Pp. 802-814.
64. Albo, S.E. The Aerodyne Inverse Modeling System (AIMS): Source estimation applied to the FFT 07 experiment and to simulated mobile sensor data/ S.E. Albo, O.O. Oluwole, R.C. Miake-Lye. – Text: direct// Atmospheric Environment. – 2011. – Vol. 45, № 33, – Pp. 6085-6092.
65. Демьянов В.В. Геостатистика: теория и практика / В.В Демьянов, Е.А. Савельева. – М.: Наука, 2010. – 327 с. – Текст: непосредственный.
66. Gilks, R. Markov Chain Monte Carlo / R. Gilks. – Text: electronic // Wiley Online Library. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470011815.b2a14021> (дата обращения: 06.08.2023).
67. Abril-Pla, O. PyMC: A modern and comprehensive probabilistic programming framework in Python / O.Abril-Pla, [etc.]. – Text: direct //PeerJ Computer Science. – 2023. – Vol. 9.
68. Allen, C.T. Improving pollutant source characterization by better estimating wind direction with a genetic algorithm. / C.T Allen, G.S. Young, S.E. Haupt. – Text: direct // Atmospheric Environment. – 2007. – № 41 (11). – Pp. 2283-2289.
69. Stochastic event reconstruction of atmospheric contaminant dispersion using bayesian inference / I. Senocak, N.W.Hengartner, M.B. Short, W.B. Daniel. – Text: direct // Atmospheric Environment. – 2008. – № 42 (33). – Pp. 7718-7727.
70. Cho, S.J. The effective sample size in Bayesian information criterion for level specific fixed and random effect selection in a two level nested model / S.J. Cho, H. Wu,

- M. Naveiras. – Text: direct // British Journal of Mathematical and Statistical Psychology. – 2024. – Vol. 77, № 2. – Pp. 289-315.
71. Barmak, Mostofian., Daniel, M., Zuckerman. (2019). Statistical Uncertainty Analysis for Small-Sample, High Log-Variance Data: Cautions for Bootstrapping and Bayesian Bootstrapping. Journal of Chemical Theory and Computation, 15(6):3499-3509. DOI: 10.1021/ACS.JCTC.9B00015.
72. Ryan, S.D. Uncertainty quantification of steady and transient source term estimation in an urban environment / S.D. Ryan, C.J. Arisman. – Text: direct// Environmental Fluid Mechanics. – 2021. – Vol. 21, № 3. – Pp. 713-740.
73. Папаев, П.Л. Ячеечно-нейросетевая система компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы химическими производствами дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / П.Л. Папаев. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2017. – 226 с. – Текст: непосредственный.
74. Bandman, O.L. Invariants of cellular automata models for reaction-diffusion processes / O.L. Bandman. – Text: direct// Applied Discrete Mathematics. – 2012. – № 3. – Pp. 108-118.
75. Toffoli, T. Cellular Automata as an Alternative to (rather than approximation of) Differential Equations in Modeling Physics / T. Toffoli. – Text: direct// Physica D. – 1984. – Vol. 10. – Pp. 117-127.
76. Тоффоли, Т. Машины клеточных автоматов / Т. Тоффоли, Н. Марголус. – М.: Мир, 1991. – 280 с. – Текст: непосредственный.
77. Бобков, С.П. Моделирование плоскопараллельного течения жидкости с использованием теории клеточных автоматов / С.П. Бобков. – Текст: непосредственный //Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2008. – № 3. – С. 59-63.
78. Wolf-Gladrow, D.A. Lattice-gas cellular automata and lattice Boltzmann models: an introduction / D.A. Wolf-Gladrow. – Berlin: Springer, 2004. – 314 p. – Text: direct.
79. Клеточно-автоматное моделирование самоорганизующихся реакционно-диффузионных процессов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Киреева А. Е. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2013. – Текст: непосредственный.

80. Яровой, С.В. Имитационное моделирование распределенных динамических процессов на поверхности земли на основе агентного подхода: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01/С.В.Яровой.- Красноярск, 2019.- 145 с. – Текст : непосредственный.
81. Ванаг, В.К. Исследование пространственно распределенных динамических систем методами вероятностного клеточного автомата / В.К. Ванаг. – Текст: непосредственный //Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169, №. 5. – С. 481-505.
82. Матюшкин, И.В. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций / И.В. Матюшкин, М.А. Заплетина. – Текст: непосредственный //Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11, № 1. - С. 9-57.
83. Романов, В.И. Прикладные аспекты аварийных выбросов в атмосферу / В.И. Романов. – М.: Физматкнига, 2006. – 367 с. – Текст: непосредственный.
84. Moussiopoulos, N. Ambient Air Quality, Pollutant Dispersion and Transport Models: European Topic Centre on Air Quality / N. Moussiopoulos, [etc.]. – Copenhagen: European EA, 1997. – Topic Report 19. – 94 p. – Text: direct.
85. Беспроводные каналы связи. – Текст: электронный //Новая Автоматика: интернет-ресурс. – URL: <http://new-automatics.ru/page-41.html> (Дата обращения: 26.07.24).
86. Chaudhari, B. SLPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations / B.S. Chaudhari, M. Zennaro, S. Borkar. – Text: direct //Future Internet. – 2020. – Vol. 12, № 3. – Pp. 46.
87. Снегирёв, А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений / А.Ю. Снегирёв. – СПб: Политехнический ун-т, 2009. – 143 с. – Текст: непосредственный.
88. US Environmental Protection Agency. ALOHA Software. – Text: electronic // EPA: интернет-ресурс. – URL: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software> (дата обращения: 04.06.2024).
89. Spicer, T. User's guide for the DEGADIS 2.1 dense gas dispersion model. / T. Spicer, J. Havens, D. Guinnup. – Text: electronic // US Environmental Protection

Agency: интернет-ресурс. – URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=2000J5GU.txt> (дата обращения: 01.10.2024).

90. Byrnes, A. Final Report – The Jack Rabbit II Project's Impacts on Emergency Responders / A. Byrnes, H. DuPont, D. Matthew, [etc.]. – Text: electronic // UVU's Department of Emergency Services. – URL: <https://www.uvu.edu/es/docs/jackrabbit/jrl7/finalreports/uvu-jack-rabbit-final-report-2017.pdf> (дата обращения: 06.08.2024).

91. Chan S.T. A validation of FEM3MP with Joint Urban 2003 data / S.T. Chan, M.J. Leach. – Text: direct // Journal of applied meteorology and climatology. – 2007. – Vol. 46, №. 12. – Pp. 2127-2146.

92. Помощь в расследовании инцидентов. – Текст: электронный // Gexcon: интернет-сайт. – URL: <https://www.gexcon.com/contact/incident-investigation-help/> (дата обращения: 11.06.2024).

93. Титов, Д.А. Основы оптимизации в радиотехнических системах / Д.А. Титов, И.В. Юнкин, Н.В. Рубан. – Омск: ОмГТУ, 2016. – 120 с. – Текст: непосредственный

94. Keats, A. Bayesian inference for source determination with applications to a complex urban environment / A. Keats, E. Yee, F.S. Lien. – Text: direct // Atmospheric environment. – 2007. – Vol. 41, № 3. – Pp. 465-479.

95. Allwine, K.J. Joint Urban 2003: Study overview and instrument locations / K.J. Allwine, J.E. Flaherty. – Text: direct// Pacific Northwest National Lab. - 2006. - 92 p.

96. Kumar, P. Reconstruction of an atmospheric tracer source in an urban- like environment / P. Kumar, [etc.]. – Text: direct// Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2015. – Vol. 120, 24. – Pp. 12589-12604.

97. Biltoft, C.A. Customer report for mock urban setting test / C.A. Biltoft. – DPG Document, 2001. – 55 p. – Text: direct.

98. Singh, S.K. Assimilation of concentration measurements for retrieving multiple point releases in atmosphere: A least-squares approach to inverse modelling / S.K. Singh, R. Rani. - Text: direct// Atmospheric Env. – 2015. – Vol. 119. – Pp. 402-414.

99. Калюжная, А.В. Методы и технологии управления неопределенностью прогностических моделей для обеспечения защиты Санкт-Петербурга от

наводнений :автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / А. В. Калюжная. – Санкт-Петербург, 2014. – 18 с. – Текст: непосредственный.

100. Метод скользящего окна (Windowing method). – Текст: электронный // Loginom: интернет-ресурс. – URL: https://wiki.loginom.ru/articles/windowing_method.html (дата обращения: 24.09.2024).

101. Принятие решений для управления ликвидацией последствий аварийных и чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах / Ю.Н. Матвеев, К.А. Карельская, Н.А. Стукалова, [и др.]. – Текст: непосредственный // Вопросы современной науки и практики. – 2018. – № 2. – С. 19-27.

102. Структуры математических моделей аварийных и чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах / Ю.Н. Матвеев, К.А.Карельская, Н.А. Стукалова, [и др.]. – Текст: электронный // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Том 8, № 5. – С. 1-5. – URL: <http://naukovedenie.-ru/PDF/89TVN516.pdf> (дата обращения: 24.06.2024).

103. Григорьева, И.Г. Области применения моделей для расчета распределения примесей в приземном слое атмосферного воздуха / И.Г Григорьева, Ю.А. Тунакова, Р.А. Шагидуллина. – Текст: непосредственный// Вестник Казанского технологического университета. – 2017. -№20.- С 163-165.

104. Асадов, Х.Г. Метод условной пространственной интерполяции для обнаружения минимально загрязненных зон при точечных аэрозольных выбросах в городскую атмосферу / Х.Г. Асадов, Р.Ш. Маммадли. – DOI: 10.21778-/2413-9599-2020-30-3-57-66. – Текст: непосредственный// Радиопромышленность. – 2020. – № 3. – С. 57-66.

105. Чернышев, Л.О. Модели рассеивания загрязнений для принятия решений в чрезвычайных ситуациях / Л.О. Чернышев, В.В. Лебедев, О.Л. Чернышев. – Текст: непосредственный // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XX Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2020. – С. 82-85.

106. High Resolution Urban Air Quality Modeling by Coupling CFD and Mesoscale Models: a Review / R.Kadaverugu, A.Sharma, C.Matli, R.Biniwale. – DOI: 10.1007/s13143-019-00110-3. – Text: direct// Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences. – 2019. – Vol. 55. – Pp.539-556.
107. Weber, E. Airpollution: assessment methodology and modeling / E.Weber. – Springer, 2013. - 330 p. – Text: direct.
108. Classification of airpollution dispersion models: a critical review / Indra E., Sinha N., Ghose M., [etc.]. – Text: direct //Proceedings of National Seminar on Environmental Engineering with special emphasis on ME – 2004. – 11 p.
109. El-Harbawi, M. Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review / M. El-Harbawi. – Text: direct // Environmental Reviews. – 2013. – Vol. 21, № 3. – Pp. 149-179.
110. A Discussion on Gas Dispersion Models. – Text: electronic // The first responder: интернет-ресурс. – URL: <https://www.aristatek.com/Newsletter/02%2007%20July/A%20Discussion%20on%20Gas%20Dispersion%20Models.htm> (дата обращения: 04.06.2024).
111. Агапов, А.А. Программные продукты линейки TOXI+ для расчета последствий аварий и количественной оценки риска / А.А. Агапов, А.С. Софьин, С.И. Сумской. – Текст: непосредственный //Безопасность труда в промышленности. – 2020. – №. 4. – С. 27-33.
112. Monache, L.D. Bayesian inference and markov chain monte carlo sampling to reconstruct a contaminant source on a continental scale / L.D. Monache, J. Lundquist, B. Kosovic., [etc.]. – Text: direct // Journal of Applied Meteorology and Climatology . – 2008. – Vol. 47 – Pp. 2600-2613.
113. Scalise, D. Emulating cellular automata in chemical reaction – diffusion networks /D. Scalise, R. Schulman. – Text: direct: //Natural Computing. – 2016. – Vol. 15. – Pp. 197-214.
114. Рубцов, С. Е., Павлова А. В., Сунозов А. А. К клеточно-автоматному моделированию процесса диффузии и взаимодействия субстанций / С. Е. Рубцов,

- А. В. Павлова, А. А. Сунозов – Текст: непосредственный //Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2014. – №. 2. – С. 30-34.
115. Губарев, С.В. Имитационный подход к решению задач распространения примесей / С.В. Губарев, Д.Б. Берг, А.П. Сергеев. – Текст: непосредственный //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2010. - Т. 12, № 1-8. – С. 2112-2115.
116. Freire, J.G. Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire prevention and fighting / J.G. Freire, C.C. DaCamara. - Text: direct // Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions. – 2018. – Vol. 6. – Pp. 1-15.
117. Стоянов, В.У. Анализ математических моделей для оценки и прогнозирования химической обстановки в результате чрезвычайных ситуации на экологически-опасных объектах / В.У.Стоянов. – Текст: непосредственный // Строительство и техногенная безопасность. – 2011. – № 40. – С. 74-84.
118. МУ 2.6.5.010-2016. Обоснование границ и условия эксплуатации санитарно-защитных зон и зон наблюдения радиационных объектов: утв. ФМБА России 22.04.2016 – Текст: электронный // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/documentcons_doc_LAW-208818 (дата обращения: 30.05.2024).
119. Chernyshev, L.O. Stochastic Cellular Model in the Rapid Response System / L.O. Chernyshev, Yu.N. Matveev // International Scientific and Practical Conference "Railway Transport and Technologies" (RTT-2021): Collection of conference materials. – Ekaterinburg, 2021. – Text: direct.
120. Newman, J.P. Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: Current status and future research directions / J.P. Newman, [etc.]. - Text: direct //Environmental Modelling & Software. - 2017. - Vol. 96. - Pp. 378-409.
121. Martin, D. Urban tracer dispersion experiments during the second DAPPLE field campaign in London 2004 / D. Martin, [etc.]. - Text: direct // Atmospheric Environment. – 2010. – Vol. 44, №. 25. – Pp. 3043-3052.
122. Hanna, S. Observed winds, turbulence, and dispersion in built-up downtown areas of Oklahoma City and Manhattan / S. Hanna, J. White, Y. Zhou. – Text: direct // Boundary-layer meteorology. – 2007. – Vol. 125, № 3. – Pp. 441-468.

123. Матвеев, Ю.Н. Алгоритм фронтального моделирования в системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов / Ю.Н. Матвеев, Л.О. Чернышев. - DOI 10.46573/2658-5030-2022-3-81-91. – Текст: непосредственный // Вестник ТвГТУ. Серия: Технические науки. – 2022. – № 3 (15). – С. 81-91.
124. Kirik, E. Turns of different angles and discrete-continuous pedestrian dynamics model / E. Kirik, T. Vitova, A. Malyshev. - DOI: 10.1007/s11047-019-09764-4. – Text: direct // Natural Computing. – 2019. – Vol. 18, № 4. – Pp. 875-884.
125. Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ». – Утв. Приказом Ростехнадзора от 02.11.2022 № 385. – Текст: электронный// СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_433690/ (дата обращения: 30.09.2024).
126. Stull, R. Pollutant dispersion /R. Stull. – Text: direct //Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science. – Vancouver: Univ. of British Columbia, 2017. – Pp. 723-745.
127. Chang, J.C. Air quality model performance evaluation / J.C. Chang, S.R. Hanna. – Text: direct //Meteorology and Atm. Physics. – 2004. – Vol. 87. – №. 1. – Pp. 167-196.
128. Kirkpatrick, S. Optimization by simulated annealing: quantitative studies / S. Kirkpatrick. – Text: direct//J. of statistical physics. – 1984. – Vol. 34. – Pp. 975-986.
129. Пантелеев, А.В. Методы глобальной оптимизации: Метаэвристические стратегии и алгоритмы / А.В. Пантелеев, Д.В. Метлицкая, Е.А. Алешина. – М.: Вузовская книга, 2013. – 244 с.– Текст: непосредственный.
130. Щербина, О.А. Метаэвристические алгоритмы для задач комбинаторной оптимизации/ О.А. Щербина. – Текст: непосредственный.//Таврический вестник информатики и математики. – 2014. - № 1 (24). – С. 56-72.
131. Лопатин, А.С. Метод отжига / А.С. Лопатин. – Текст: непосредственный// Стохастическая оптимизация в информатике. – 2005. – №. 1. – С. 133–149.
132. Thomson, L.C. An improved algorithm for locating a gas source using inverse methods / L.C. Thomson, [etc.]. -Text: direct // Atmospheric environment. - 2007. - Vol. 41, № 6. - Pp. 1128-1134.

133. Huri, D. Surrogate model-based parameter tuning of simulated annealing algorithm for the shape optimization of automotive rubber bumpers / D. Huri., T. Mankovits. - Text: direct //Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 11. – P. 5451.
134. Yan, L.J. Study on parameter setting method for simulated annealing algorithm / L.J. Yan, Z.B. Li, J.H. Wei. – Text: direct //Journal of system simulation. – 2008. – Vol. 20, № 1. – Pp. 245-247.
135. Thévenin, D. Optimization and Computational Fluid Dynamics / D. Thévenin, G. Janiga. – Springer, 2008. – 309 p. – Text: direct.
136. Nelder, J.A. A simplex method for function minimization /J.A. Nelder, R. Mead. – Text: direct //The computer journal. – 1965. – Vol. 7, № 4. – Pp. 308-313.
137. Gan, Y. A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model / Y. Gan, [etc.]. – Text: direct //Environmental modelling & software. – 2014. – Vol. 51. – Pp. 269-285.
138. Pannell, D.J. Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies / D.J. Pannell. – Text: direct //Agr. Economics. – 1997. – Vol. 16, № 2. – Pp. 139-152.
139. ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation / R. Jones, W. Lehr, D. Simecek-Beatty, R.M. Reynolds. – Text: electronic // NOAA library: Technical Memorandum NOS OR&R 43. - Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA, 2013. – 96 p. – URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2669> (дата обращения: 22.05.2024).
140. Havens, J.A. Development of an atmospheric dispersion model for heavier-than-air gas mixtures. / J.A. Havens, T.O. Spicer. – Text: direct // Final report. – 1980. – Vol.1. – 278 p.
141. Программа поддержки принятия решений для прогнозирования процессов рассеивания промышленных аварийных выбросов: свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021662063 от 21 июля 2021 г.: РФ / Л.О.Чернышев, Ю.Н.Матвеев. – ТвГТУ, 2021. – Текст: непосредственный.
142. Система визуализации и анализа последствий аварийных выбросов на основе модели вероятностного клеточного автомата: свид. о гос. регистрации

программы для ЭВМ № 2021665537 от 28 сентября 2021 г.: РФ / Л.О.Чернышев, Ю.Н.Матвеев. – ТвГТУ, 2021. – Текст: непосредственный.

143. Программный модуль фронтального моделирования последствий аварийных выбросов на основе эмпирико-статистического подхода: свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023669204 от 11 сентября 2023 г.: РФ / Л.О.Чернышев, Ю.Н.Матвеев. – ТвГТУ, 2023. – Текст: непосредственный.

144. Clawson, K.L. Joint urban 2003 (JU03) SF6 atmospheric tracer field tests / K.L. Clawson. – Text: electronic // NOAA library: интернет-ресурс. – URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/12573> (дата обращения: 15.07.2024).

145. Allwine, J. Editorial/ J. Allwine, M. Leach. – Text: direct// Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2007. – Vol. 46, № 12. – Pp. 2017-2018.

146. NOAA: Data and Publications Archive. – Text: electronic // The Air Resources Laboratory's (ARL): интернет-ресурс. – URL: <https://www.arl.noaa.gov/newspubs/data-and-publications-archive> (дата обращения: 15.07.2024).

147. Hanna, S.R. Urban HPAC and a simple urban dispersion model compared with the joint urban 2003 (JU2003) field data / S.R. Hanna, I. Sykes, J. White, E. Baja. – Text: direct // Croatian Meteorological Journal. – 2008. – Vol. 43. – Pp. 327-332.

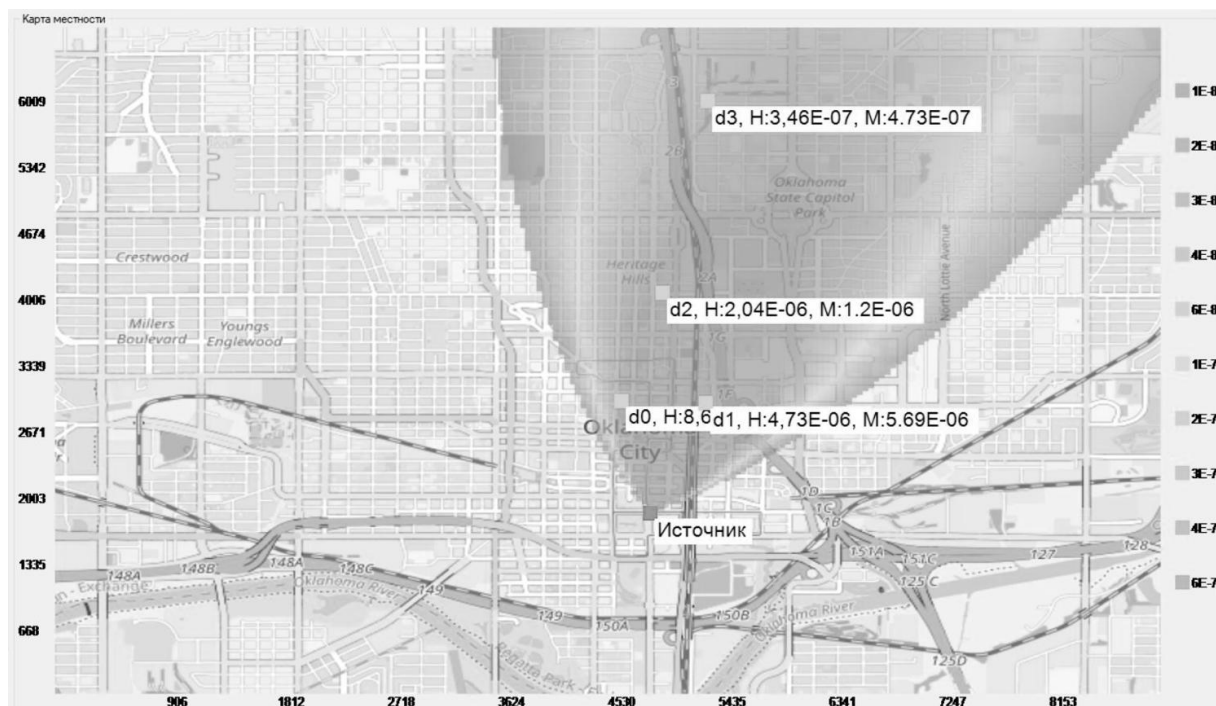
148. Boguski, T.K. Understanding units of measurement / T.K. Boguski. – Text: direct // Environm. science and technology briefs for citizens. – 2006. - № 2 – Pp. 1-2.

149. Martin, D. Urban tracer dispersion experiment in London (DAPPLE) 2003: field study and comparison with empirical prediction / D. Martin, [etc.]. – Text: direct // Atmospheric Science Letters. – 2010. – Vol. 11, № 4. – Pp. 241-248.

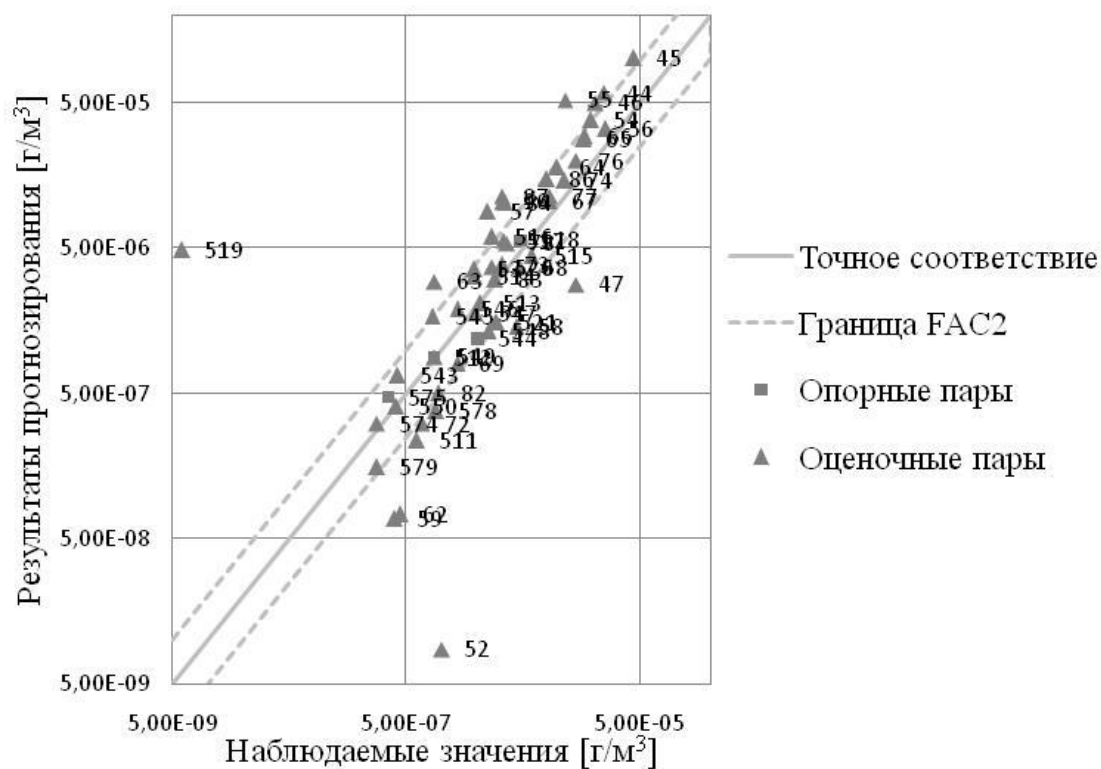
150. Sabatino, S.D. COST 732 in practice: the MUST model evaluation exercise / S.D. Sabatino, [etc.]. – Text: direct // Journal of Environment and Pollution. – 2011. – Vol. 44, № 1-4. – Pp. 403-418.

151. Hertwig, D. Evaluation of fast atmospheric dispersion models in a regular street network / D. Hertwig, L. Soulhac, V. Fuka, T. Auerswald, M. Carpentieri, P. Hayden, A. Robins, Z.-T. Xie, O. Coceal. – DOI: 10.1007/s10652-018-9587-7. – Text: direct // Environmental Fluid Mechanics. – 2018. – Vol. 18, № 4. – Pp. 1007-1044.

ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕСТОВЫХ ДАННЫХ

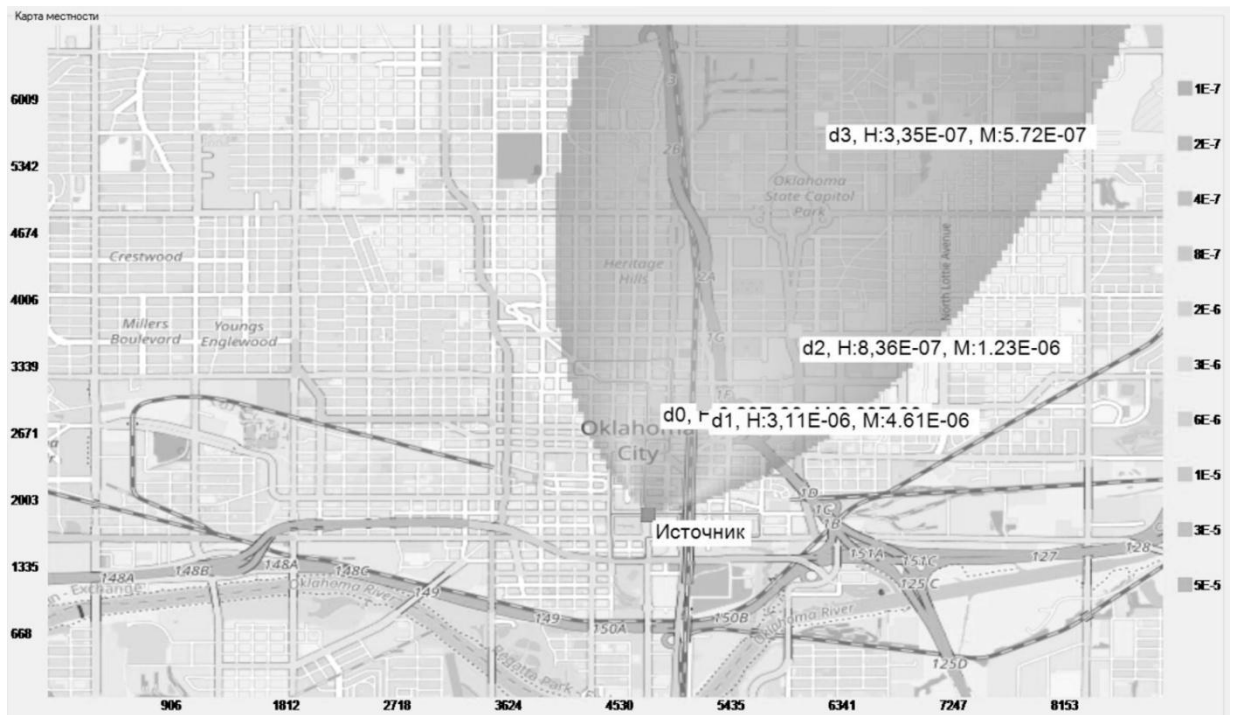


а) - Визуализация области выброса

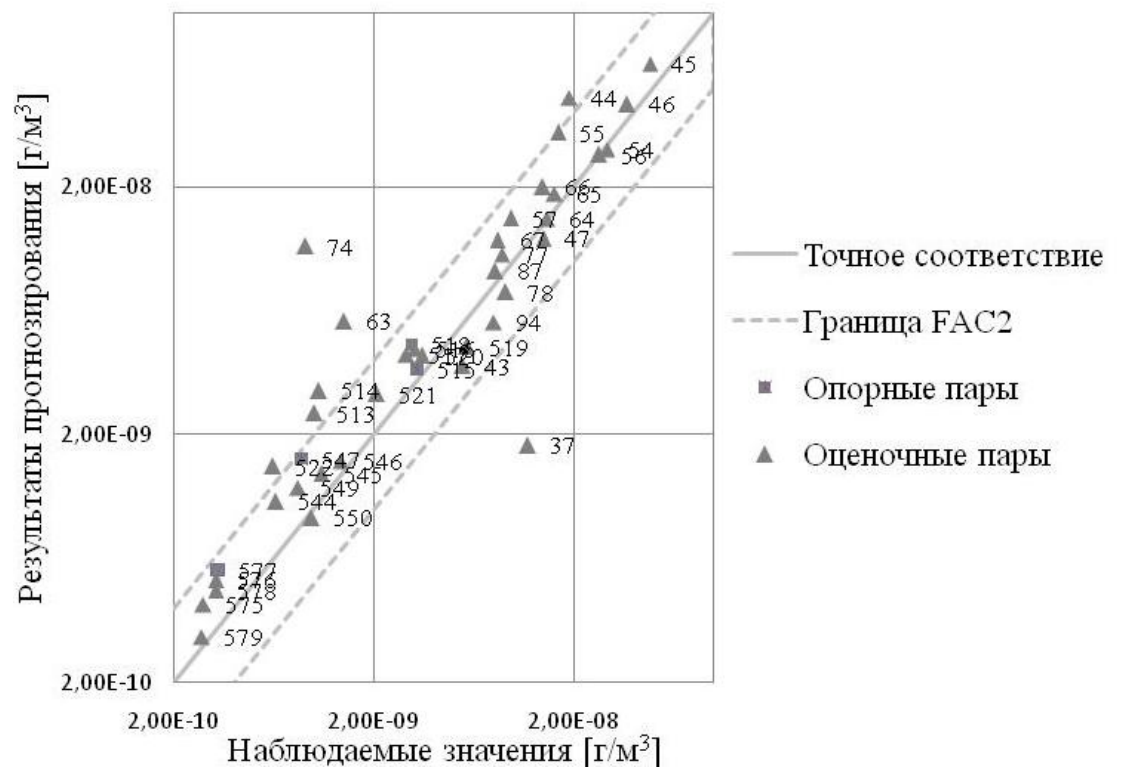


б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.1 - Испытания подсистемы прогноза на основе уравнения Гаусса с использованием набора данных IOP 3



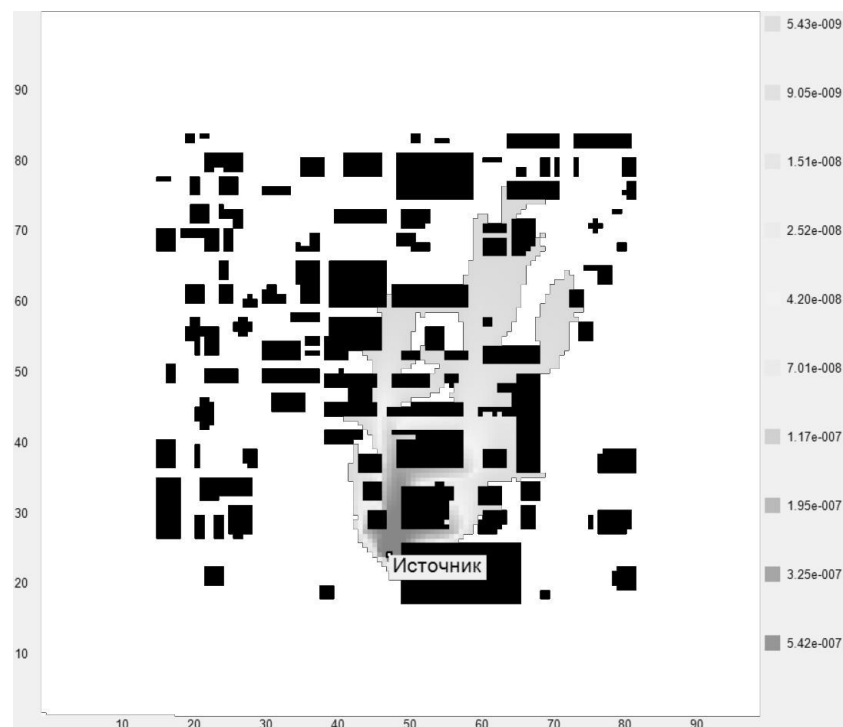
а) - Визуализация области выброса



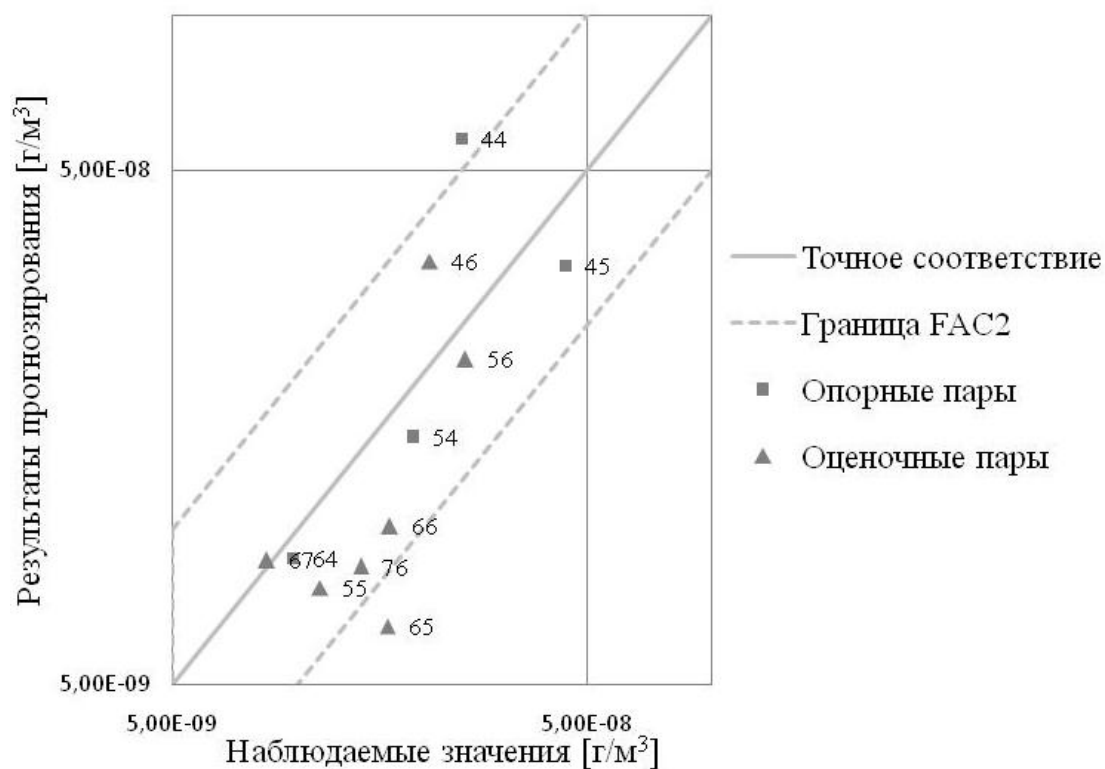
б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.2 - Испытания подсистемы прогноза на основе уравнения Гаусса с использованием набора данных IOP 4

Рисунок А.3 - Испытания подсистемы прогноза на основе уравнения Гаусса с использованием набора данных IOP 6

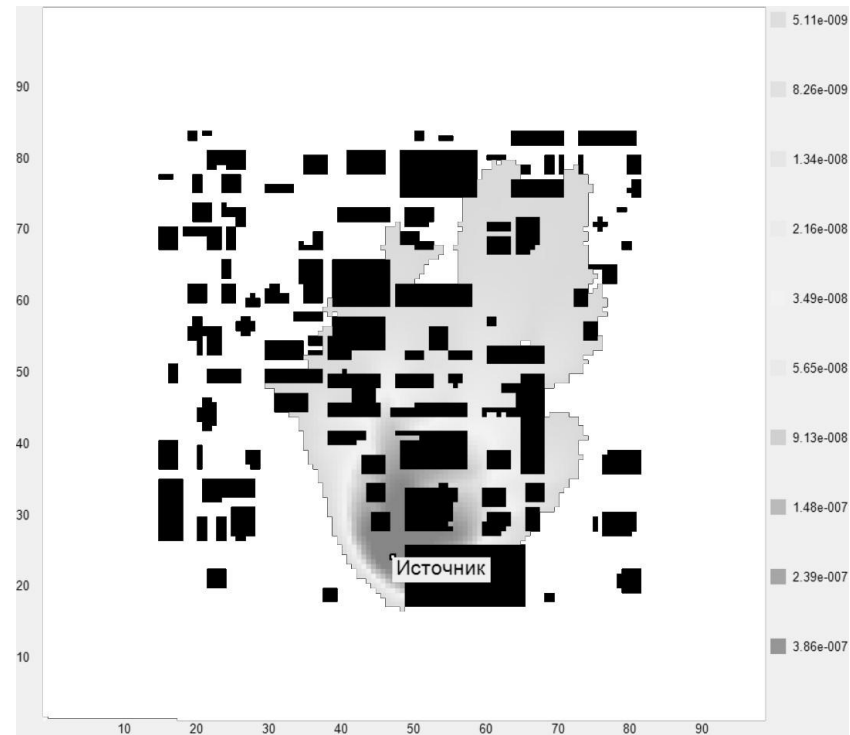


а) - Визуализация области выброса с учетом застройки местности

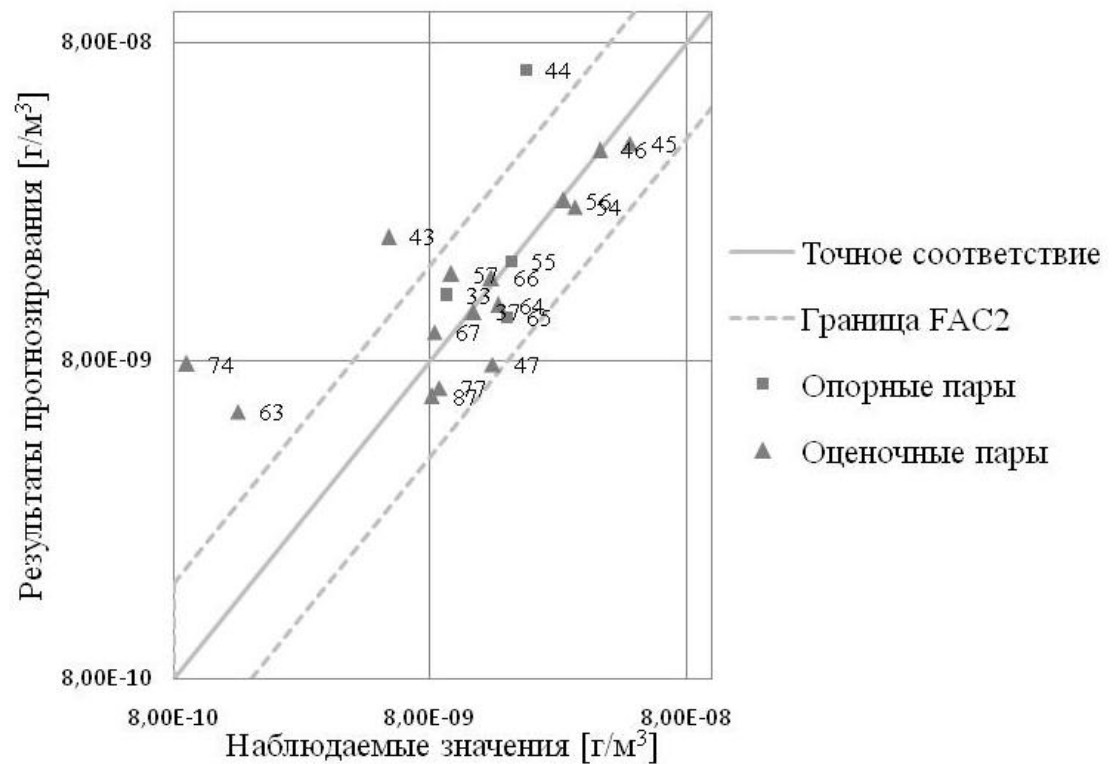


б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.4 - Испытания подсистемы прогноза на основе вероятностного КА-подхода с использованием набора данных IOP 3



а) - Визуализация области выброса с учетом застройки местности

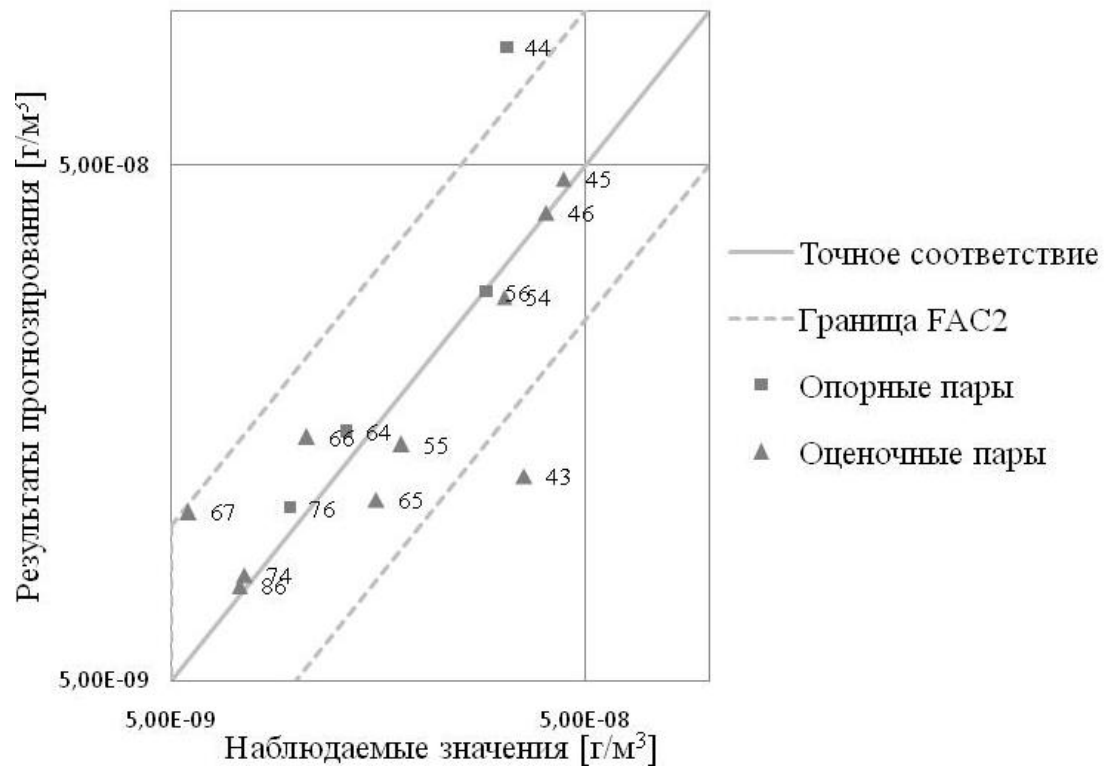


б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.5 - Испытания подсистемы прогноза на основе вероятностного КА-подхода с использованием набора данных IOP 4



а) - Визуализация области выброса с учетом застройки местности

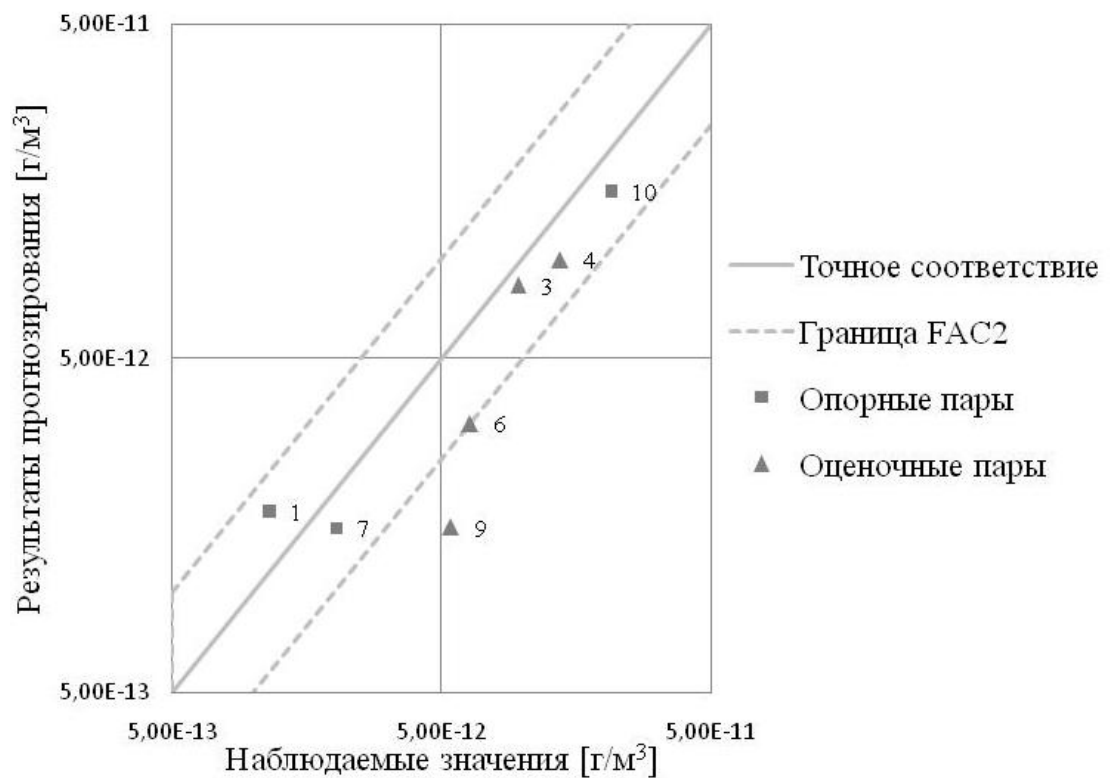


б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.6 - Испытания подсистемы прогноза на основе вероятностного КА-подхода с использованием набора данных IOP 6

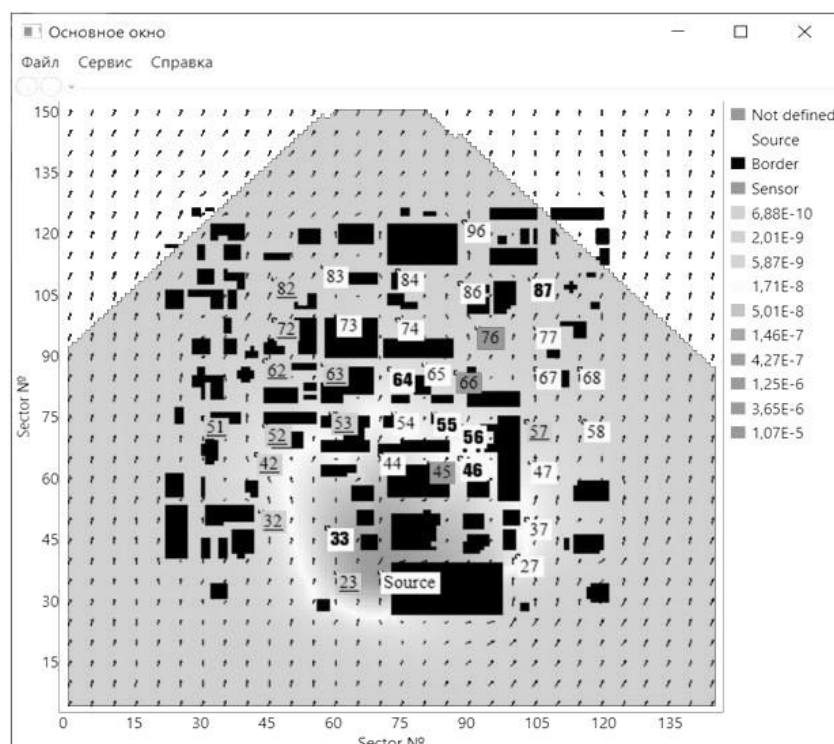


а) - Визуализация области выброса с учетом застройки местности
и примерным полем ветра

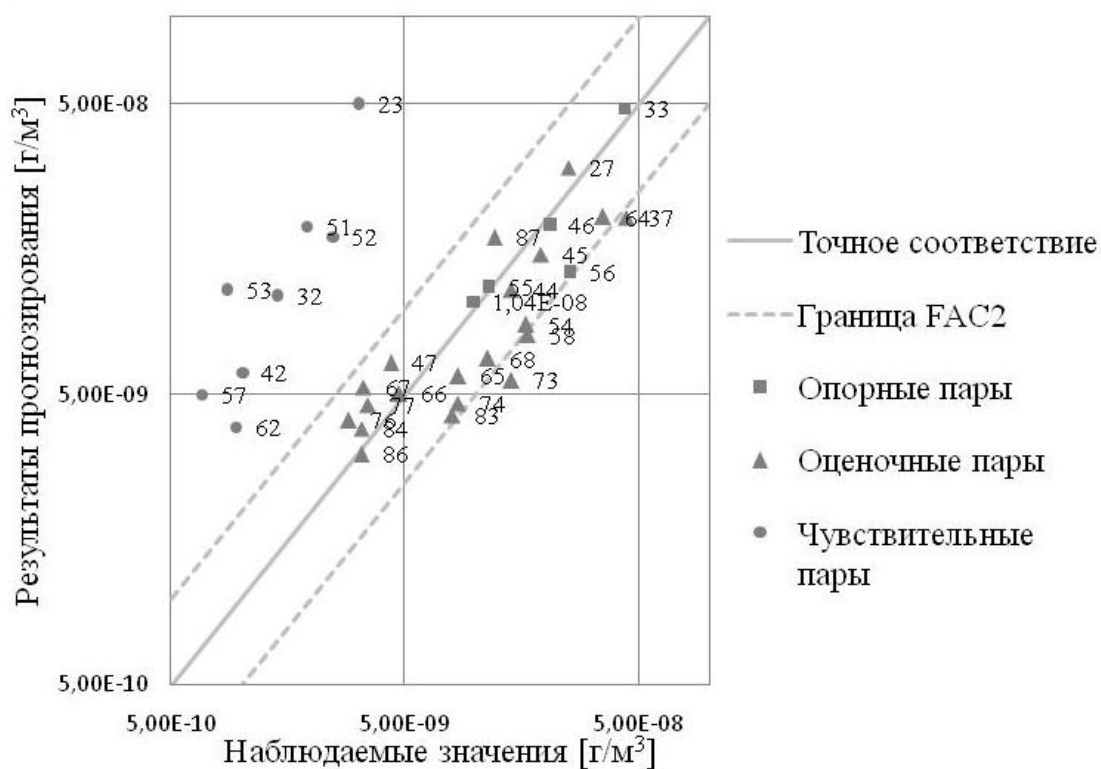


б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.7 - Испытания подсистемы прогноза на основе вероятностного КА-подхода с использованием набора данных DAPPLE и примерным полем ветра

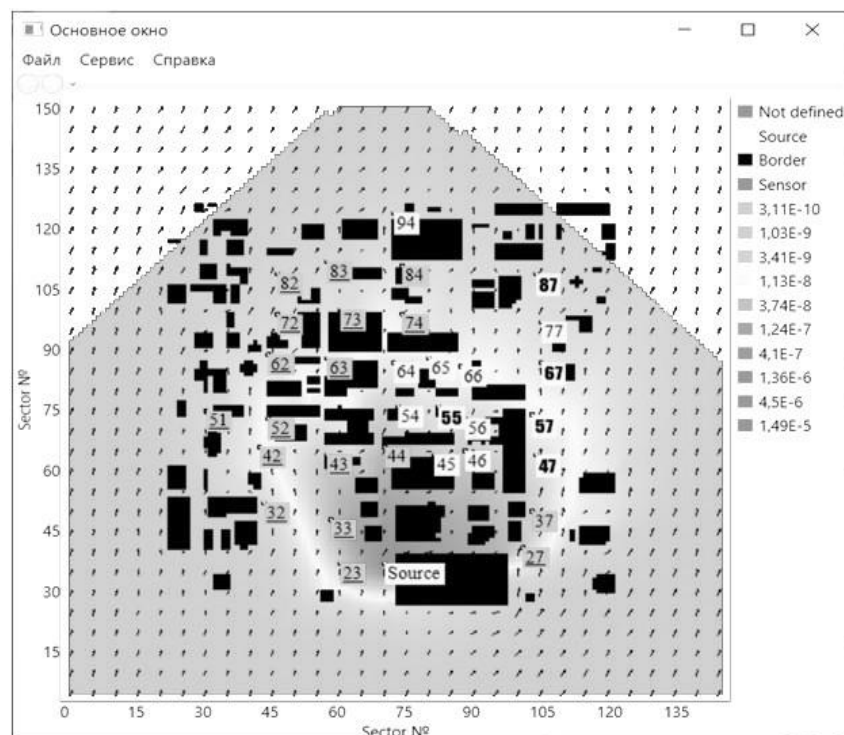


а) - Визуализация области выброса с учетом застройки местности
и примерным полем ветра

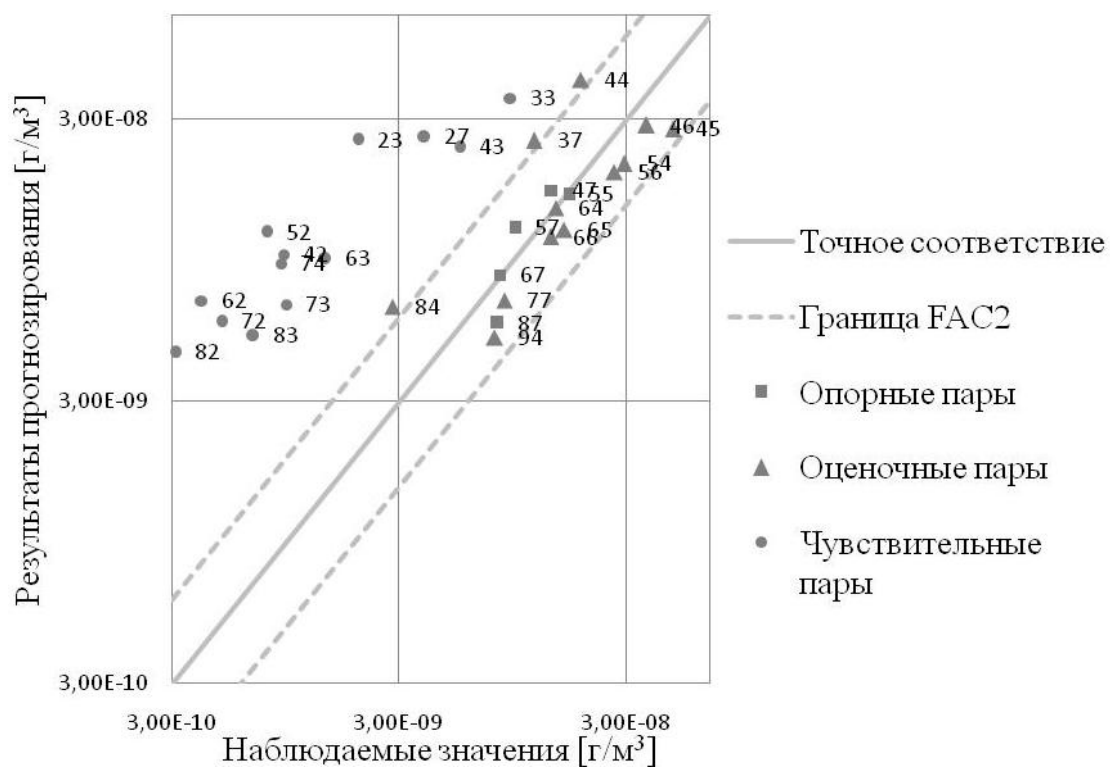


б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.8 - Испытания подсистемы прогноза на основе эмпирического КА-
похода с использованием набора данных IOP 3 и примерным полем ветра

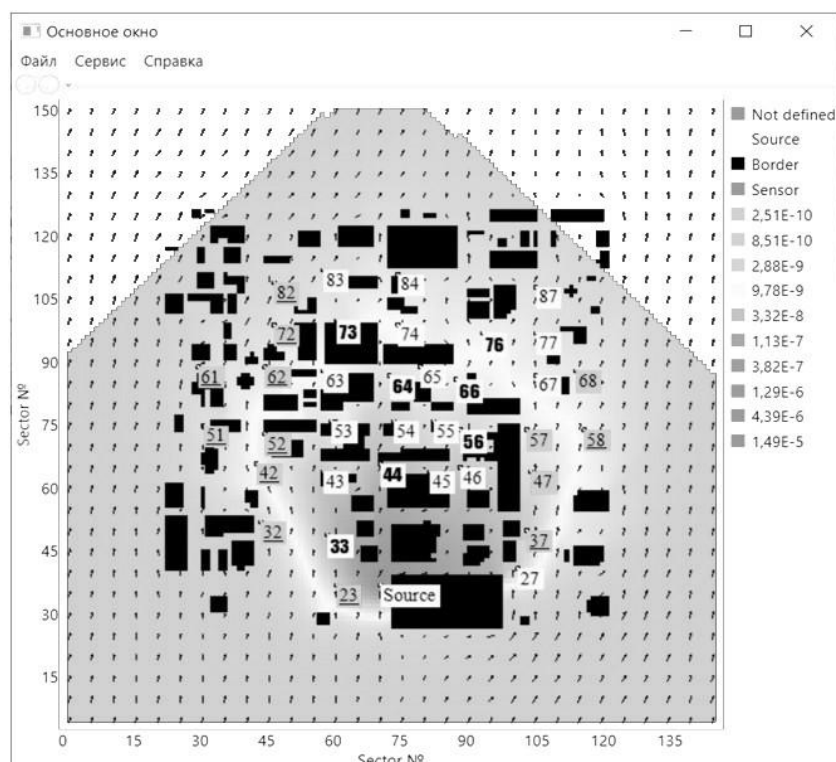


а) - Визуализация области выброса с учетом застройки местности
и примерным полем ветра

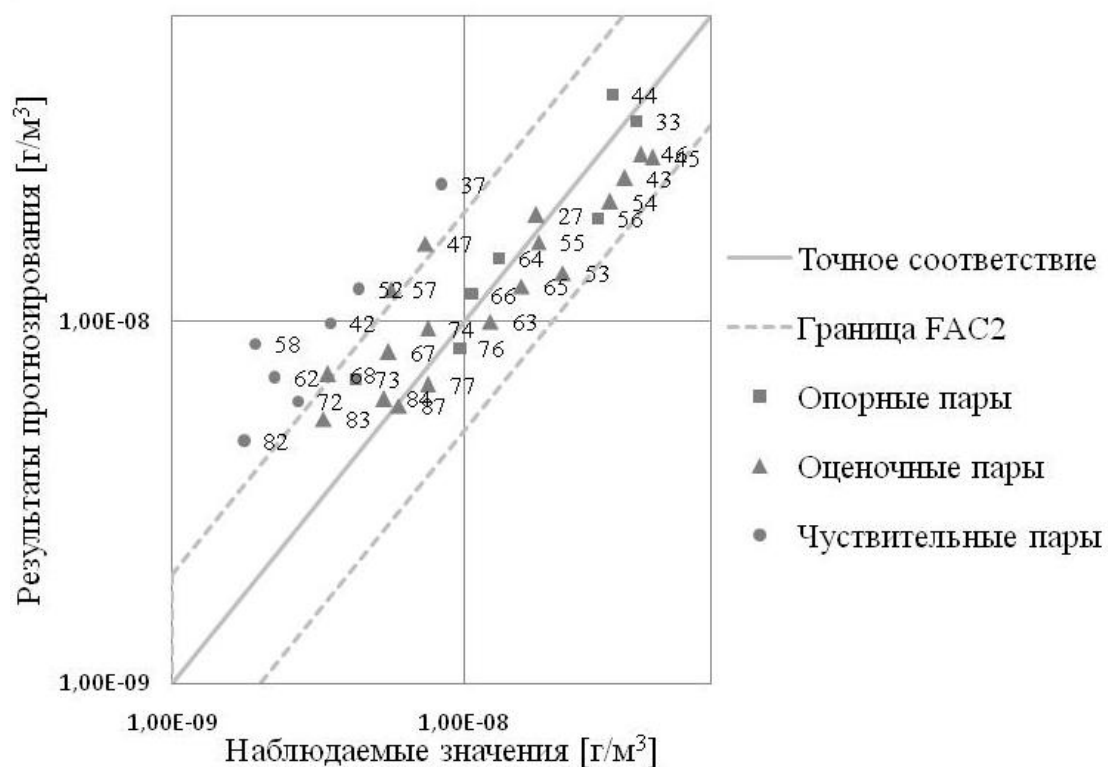


б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.9 - Испытания подсистемы прогноза на основе эмпирического КА-
похода с использованием набора данных IOP 4 и примерным полем ветра

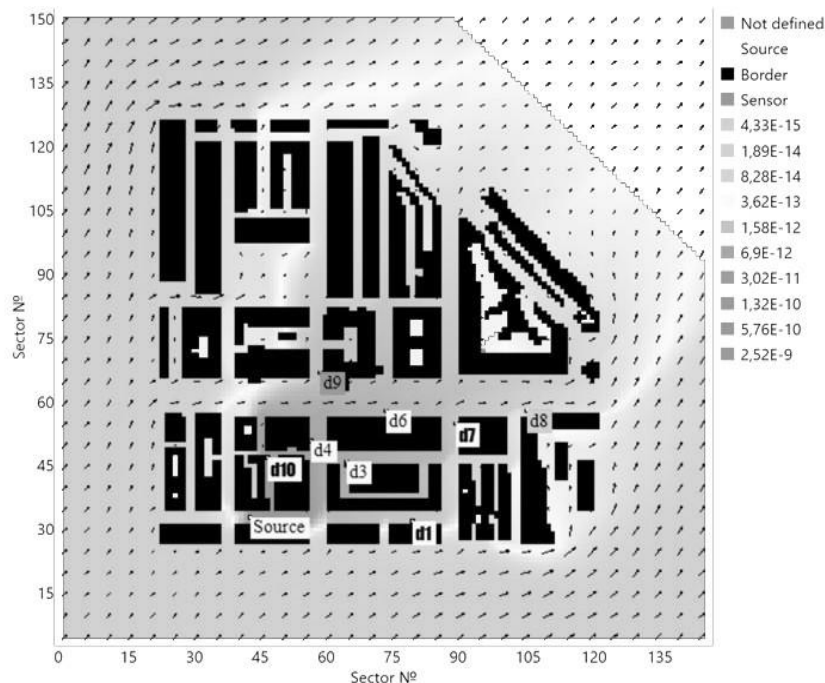


а) - Визуализация области выброса с учетом застройки местности
и примерным полем ветра

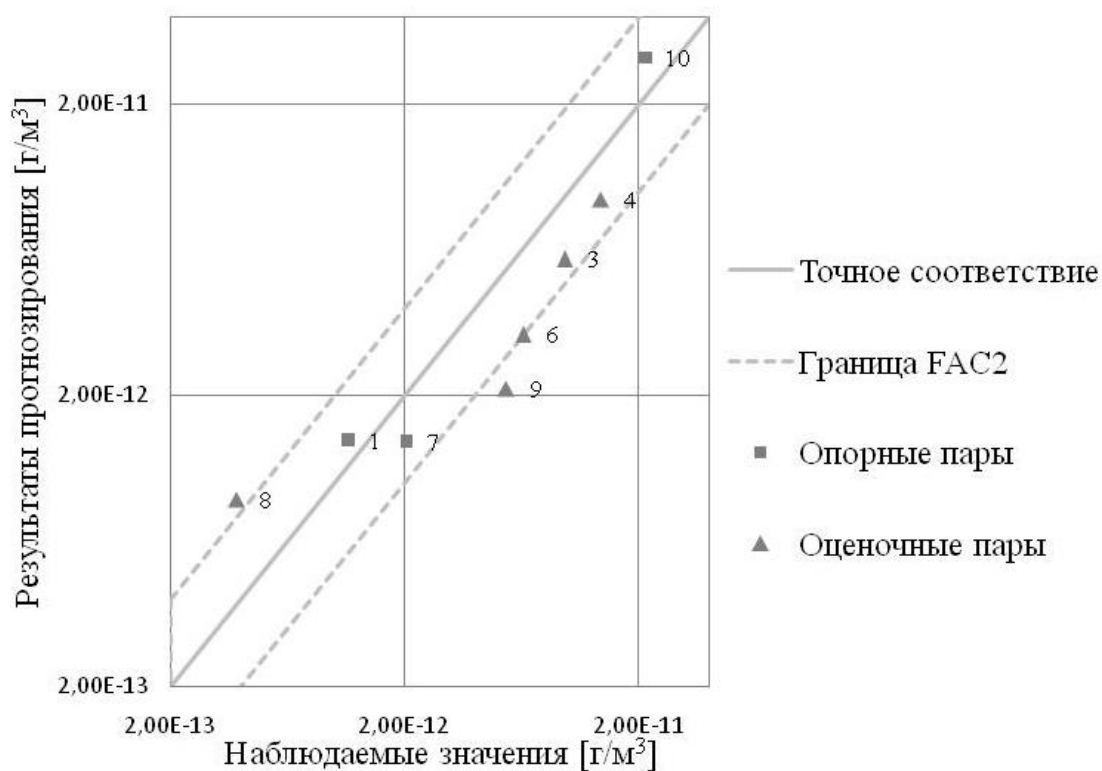


б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.10 - Испытания подсистемы прогноза на основе эмпирического КА-
похода с использованием набора данных IOP 6 и примерным полем ветра



а) - Визуализация области выброса с учетом застройки местности
и примерным полем ветра



б) - Результирующая диаграмма пар наблюдение- прогноз

Рисунок А.11 - Испытания подсистемы прогноза на основе эмпирического КА-
похода с использованием набора данных DAPPLE и примерным полем ветра

ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВЕДЕНИЯ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

УТВЕРЖДАЮ

Начальник управления
по ОБЖН администрации г. Твери



Н.А. Соболев

«__» октября 2021 года

Акт

передачи в опытную эксплуатацию

программы поддержки принятия решений для прогнозирования процессов
рассеивания промышленных аварийных выбросов

Настоящий акт свидетельствует о том, что комплекс средств "Программы поддержки принятия решений для прогнозирования процессов рассеивания промышленных аварийных выбросов", разработанный в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ) профессором кафедры «Электронные вычислительные машины» (ЭВМ) Матвеевым Юрием Николаевичем и аспирантом кафедры ЭВМ Чернышевым Леонидом Олеговичем был передан в опытную эксплуатацию в «Управление по обеспечению безопасности жизнедеятельности населения администрации города Твери» для поддержки принятия решений при ликвидации последствий аварийных выбросов на предприятиях города Твери.

В ходе передачи выполнена установка программы, рассмотрен комплект эксплуатационной документации, изучен интерфейс и осуществлено тестирование функций проекта. В ходе опытной эксплуатации на контрольных примерах отработаны основные алгоритмы программы, реализующие:

- анализ последствий аварийных выбросов с графическим отображением на цифровой карте местности полей и профилей концентрации опасных химических веществ и изоплет зон загрязнения;
- моделирование вероятных сценариев аварии при вариациях характеристик источника выброса, изменении метеорологических данных и выборе коэффициента шероховатости прилегающей территории;
- автоматическую корректировку параметров модели при ассимиляции данных оперативного мониторинга в режиме реального времени.

Функционал программы, предоставляющий возможность визуального анализа последствий аварий на основе неполной априорной информации, обладает актуальностью и практической значимостью, повышает эффективность принятия решений по обеспечению промышленной безопасности и может быть использован для обоснования вариантов действий персонала при оперативном реагировании на инциденты.

Главный специалист

В.С. Буров

Б.1 – Акт передачи результатов исследования в управление по ОБЖН
администрации г. Твери

**«Проектно-конструкторское бюро
автоматизации производств»
(ООО «ПКБ АП»)**



тел. (4822) 41-53-38
тел./факс (4822) 41-53-38
E-mail: pkbap@mail.ru
www.pkbap.ru

В.М.Кожемякин
2021 г.

Члены комиссии: Викторов В.М. Викторов В.М.

**ПРИЛОЖЕНИЕ В СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ
ДЛЯ ЭВМ**



В.1 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021660993

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021665537

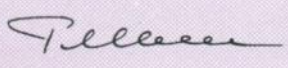
**"Система визуализации и анализа последствий
аварийных выбросов на основе модели вероятностного
клеточного автомата"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ) (RU)*

Авторы: *Чернышев Леонид Олегович (RU), Матвеев Юрий
Николаевич (RU)*

Заявка № **2021664783**
Дата поступления **22 сентября 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **28 сентября 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


Г.П. Ивлиев



В.2 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021664783

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023669204

**«Программный модуль фронтального моделирования
последствий аварийных выбросов на основе эмпирико-
статистического подхода»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ) (RU)*

Авторы: *Чернышев Леонид Олегович (RU), Матвеев Юрий
Николаевич (RU)*

Заявка № 2023667946

Дата поступления 29 августа 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 сентября 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов