

На правах рукописи



ЧЕРНЫШЕВ ЛЕОНИД ОЛЕГОВИЧ

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ХИМИЧЕСКИ
ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Специальность 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика (технические науки)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Тверь – 2025

Работа выполнена на кафедре электронных вычислительных машин ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»)

Научный руководитель: Матвеев Юрий Николаевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Электронные вычислительные
машины» ТвГТУ

Официальные оппоненты: Савицкая Татьяна Вадимовна,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Кибернетика химико-технологических
процессов» ФГБОУ ВО
«Российский химико-технологический
университет им. Д.И. Менделеева», г. Москва

Попов Николай Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Природопользование и защита
окружающей среды» ФГБОУ ВО «Тамбовский
государственный технический университет»,
г. Тамбов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тульский государственный
университет», г. Тула

Защита состоится 4 марта 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета 24.2.410.01 в ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический университет» по адресу: 170026, г. Тверь, наб.
Аф. Никитина, д. 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского
государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.410.01
доктор физико-математических наук,
профессор

С.М. Дзюба

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 жизненно важных 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 программно-технические комплексы, позволяющие сформировать и отобразить на карте местности очаги аварийного загрязнения и оценить варианты развития оперативной обстановки. Однако, по оценкам специалистов, 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 могут 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 Г.И. Марчука, Ю.И. Шокина, В.М. Белолипецкого, Л.Б. Чубарова.

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. Клеточно-автоматный подход к моделированию представлен в работах: О.Л. Бандман, В.К. Ванаг, И.В. Матюшкина, М.А. Заплетиной, 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: Р. Kumar, А.А. Feiz, S.K. Singh, P. Ngae, G. Turbelin использованы различные классы моделей атмосферной дисперсии.

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 и задачи. 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 существующих 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 глобальных экстремумов, алгоритмы интеллектуальной обработки и визуализации данных с использованием геоинформационных технологий.

Информационная база исследования. Нормативные и 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 примеси 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 актами испытаний и свидетельствами о регистрации программ №2021660993, №2021664783 и №2023669204.

Участие автора. Все представленные в диссертации исследования непосредственно принадлежат автору. Автором лично разработан, реализован и апробирован комплекс алгоритмов для решения поставленных задач.

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 K1 - 2, в журнале категории K2 - 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 и опубликовано учебное пособие. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено обоснование актуальности исследования в области прогнозирования и визуализации последствий выброса АХОВ, обозначены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи, приведена научная новизна и практическая значимость работы, представлены публикации по теме диссертации, а также структура и объём работы.

В **первой главе** приведена статистика аварийных ситуаций, связанных с выбросом АХОВ, и кратко описаны опасности химических производств.

Рассмотрены вопросы реагирования на последствия выбросов, проанализированы особенности формирования решений на объектовом уровне реагирования и детализирован порядок оповещения аварийно-спасательных служб. Представлена обобщенная схема оперативного реагирования на химически опасном производстве с указанием роли и значимости системы

визуализации загрязнения местности. Проанализированы основные характеристики систем оперативного реагирования. Рассмотрены особенности алгоритмического обеспечения АСППР в ЧС.

Представлен обзор существующих подходов к разработке алгоритмов рассеивания вредных веществ в атмосфере. Предметная область исследования ограничена продолжительными, турбулентными, пассивными выбросами химических веществ в атмосферу при микро- и мезо- уровне масштаба аварий. Показано, что в условиях застройки местности и стохастичности условий выброса целесообразно использовать апостериорный подход к обработке информации, в рамках которого предложена двухконтурная схема обработки информации, позволяющая оценивать параметры модели прогноза на основе результатов моделирования и данных мониторинга.

Результаты проведенного анализа показали, что для разработки алгоритмического обеспечения такой системы могут быть применены методы оценки параметров источника, а также алгоритмы клеточных автоматов.

В качестве каркаса для разработки и исследования двухконтурного алгоритма обработки информации выбрана методология функционального моделирования IDEF0, которая позволила структурировать все этапы научного исследования (рисунок 1).



Рисунок 1 - Схема исследования двухконтурного алгоритма обработки информации согласно методологии IDEF0

Определены следующие этапы разработки и исследования алгоритмов комплексной системы: формирование алгоритмов для внутреннего контура системы; выявление параметров прогноза, обрабатываемых во внешнем

контуре системы; выбор и обоснование критериальных показателей и алгоритмов параметрической настройки прогнозных моделей; практическая реализация и экспериментальное исследование разработанных алгоритмов.

Формализация задачи. 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) при ограничениях: $(P_{var})_H \leq P_{var} \leq (P_{var})_B$:

$$\Delta = F(C_i^m(x,y,z,t), C_i^d(x,y,z,t)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $F(*,*)$ - критериальная оценка прогноза, $i = \overline{1, M}$ - номер пары наблюдение-прогноз, M - число пар, индексами «н» и «к» обозначены нижние и верхние пределы изменения параметров. Определение $\min \Delta$ является основой для визуализации и анализа области опасного загрязнения местности.

Во второй главе предложен метод прогнозирования с возможностью корректировки параметров прогноза, который в отличие от известных методов оценки неизвестных параметров источника (STE), позволяет на основе данных химической разведки местности оценить размеры и конфигурацию зоны аварийного загрязнения местности. Обобщенная схема оперативного реагирования с учетом предлагаемого подхода к обработке информации приведена на рисунке 2.

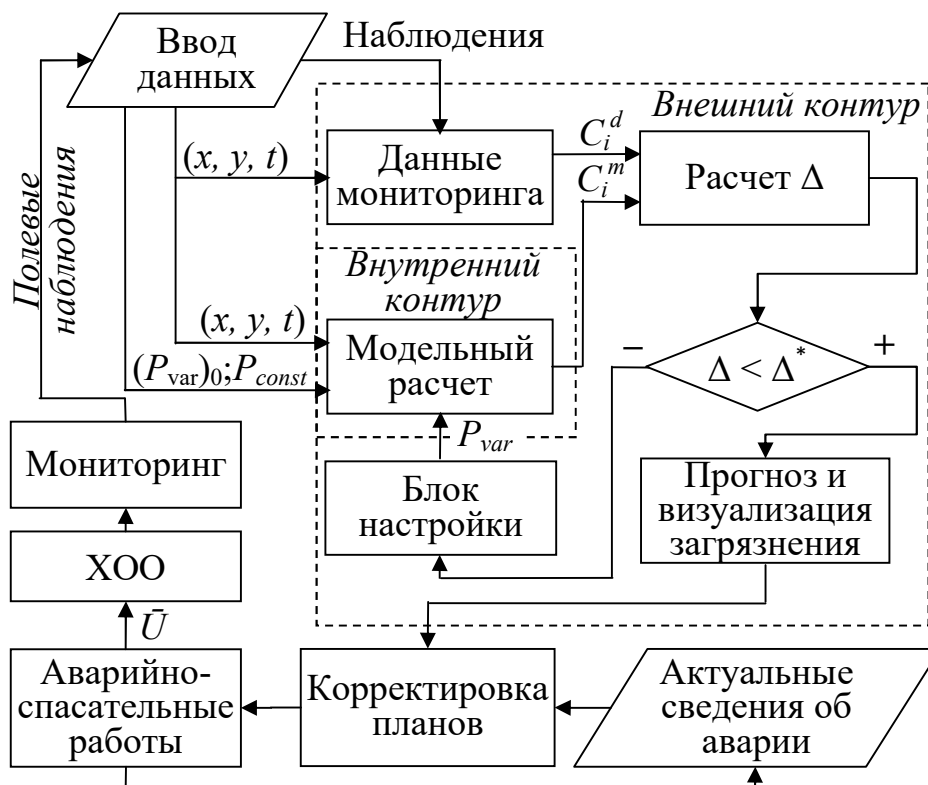


Рисунок 2 - Обобщенная схема оперативного реагирования с учетом предлагаемого подхода к обработке информации

Представленный метод выбран в качестве основы для разработки алгоритмов прогнозирования и визуализации опасной зоны загрязнения, объединенных в единую схему двухконтурной обработки информации при

оперативном реагировании на последствия аварии. Во внутреннем контуре такой схемы формируется результат прогноза, во внешнем контуре - по данным химической разведки местности рассчитываются параметры прогнозной модели (прогноза).

Рассмотрены аналитические и вычислительные алгоритмы рассеивания примеси. Исследованы особенности алгоритма на основе наиболее известного уравнения Гаусса, которое применяется для прогнозирования и визуализации опасной зоны загрязнения при мезо-уровневом масштабе аварий. Разработанная схема расчета концентрации загрязняющего вещества с использованием уравнения Гаусса представлена на рисунке 3.

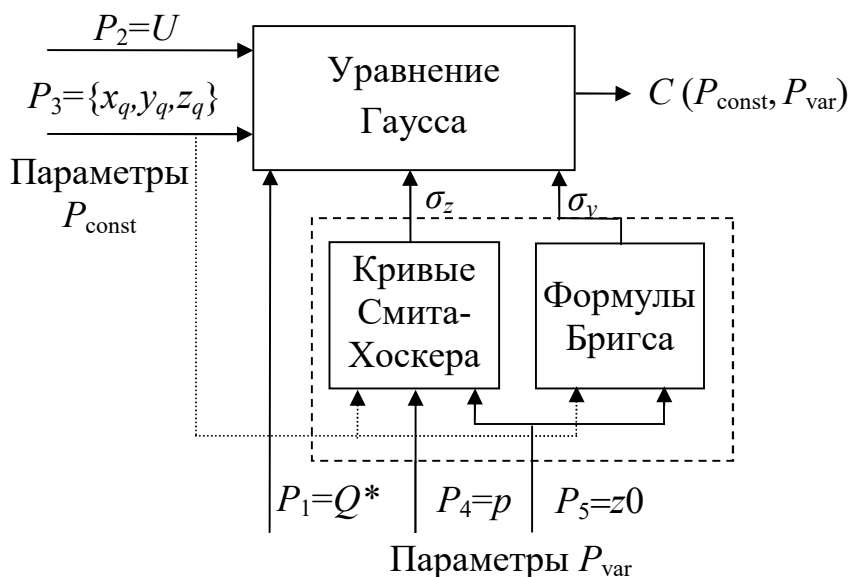


Рисунок 3 - Схема расчета концентрации загрязняющего вещества с использованием уравнения Гаусса

Определены неизменяемые параметры прогноза P_{const} на основе уравнения Гаусса: $P_2=U$ - 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.

Показано, что алгоритмы гауссовой модели не учитывают сложные условия выброса при локальном масштабе аварии. Для данного случая разработаны алгоритмы клеточно-автоматной (КА) модели рассеивания примеси. Определены эмпирические допущения, расчетные схемы и решающие правила КА моделей. Схема расчета концентрации загрязняющего вещества на основе вероятностного КА приведена на рисунке 4.

Основные параметры КА модели: $P = \{m^*, \sigma^*, B, K, Q^*, U^*, x_0, y_0\}$, где: m^* - математическое ожидание направления ветра; σ^* - среднеквадратическое отклонение полярного угла; B - массив преград; K - коэффициент плотности застройки; Q^* - интенсивность выброса; U^* - скорость ветра (м/с); x_0, y_0 - координаты источника; Y - поле концентрации загрязнителя. Вся область выброса представлена в виде множества Ω равных по площади клеток поверхности квадратной формы, структура которого делится на составляющие:

Ω_1 - внутренние клетки среды; Ω_2 - клетки границ; Ω_3 - клетки источника; Ω_4 - клетки препятствий; Ω_5 - клетки присутствия примеси, Ω_6 - клетки выполненных замеров.

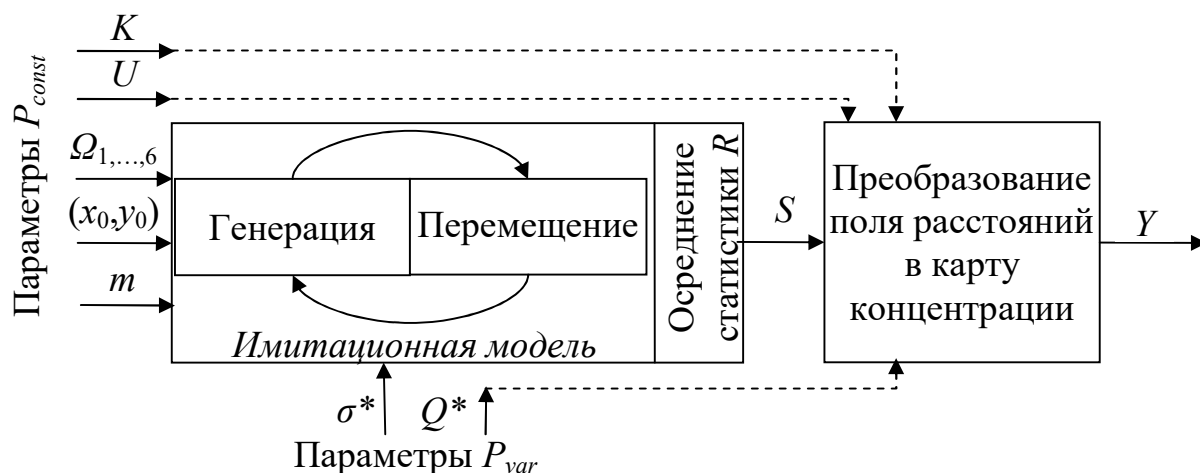


Рисунок 4 - Схема расчета концентрации загрязняющего вещества на основе вероятностного КА

Функция преобразования $S \rightarrow Y$ представлена формулой SUDC (The Simple Urban Dispersion correlation):

$$Y_i = \frac{QK(S_i * c_{size})^{-2}}{U}, \quad (2)$$

где Y_i - концентрация загрязнителя на уровне земли; S_i (м) - расстояние между ячейкой и источником выброса; c_{size} - размер ячейки; i - индекс ячейки.

Алгоритм вероятностного КА с окрестностью фон Неймана разработан на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло), при котором облако примеси моделируется в виде ансамбля пробных частиц, оседающего в ячейках поверхности с учетом правил обхода препятствий. Алгоритм с имитацией полёта частицы содержит процедуры инициализации, генерации и переноса частицы, формирования карты концентрации (рисунок 4).

Результаты имитационных экспериментов показали, что основными проблемами КА подхода к моделированию рассеивания примеси являются проблемы быстрогодействия и численной диффузии. Для разрешения проблем быстрогодействия разработан фронтальный КА-алгоритм с гексагональным шаблоном соседства, в котором фронт концентрации примеси в ходе выброса достигает и охватывает преграды на основе вероятностных правил фронтального расширения. Фронтальный подход позволил ускорить модельные вычисления и снизить затраты процессорного времени при расчете зоны загрязнения в случае сложной конфигурации преград. Однако в алгоритмах с одноранговыми шаблонами соседства число направлений углового перехода ограничено, что приводит к эффекту численной диффузии при различном направлении ветра.

Определено, что процедуры генерации случайных чисел в существенной мере снижают скорость вычислений и приводят к появлению "шумов" в результатах моделирования. Поэтому в разработанном эмпирическом КА-

алгоритме не используется подход Монте-Карло, а для разрешения проблем численной диффузии применен 16-ти точечный шаблон соседства, в котором учтены особенности расчетной схемы поиска кратчайшего пути.

На рисунке 5 представлены демонстрационные примеры визуализации зоны загрязнения с использованием разработанных алгоритмов.

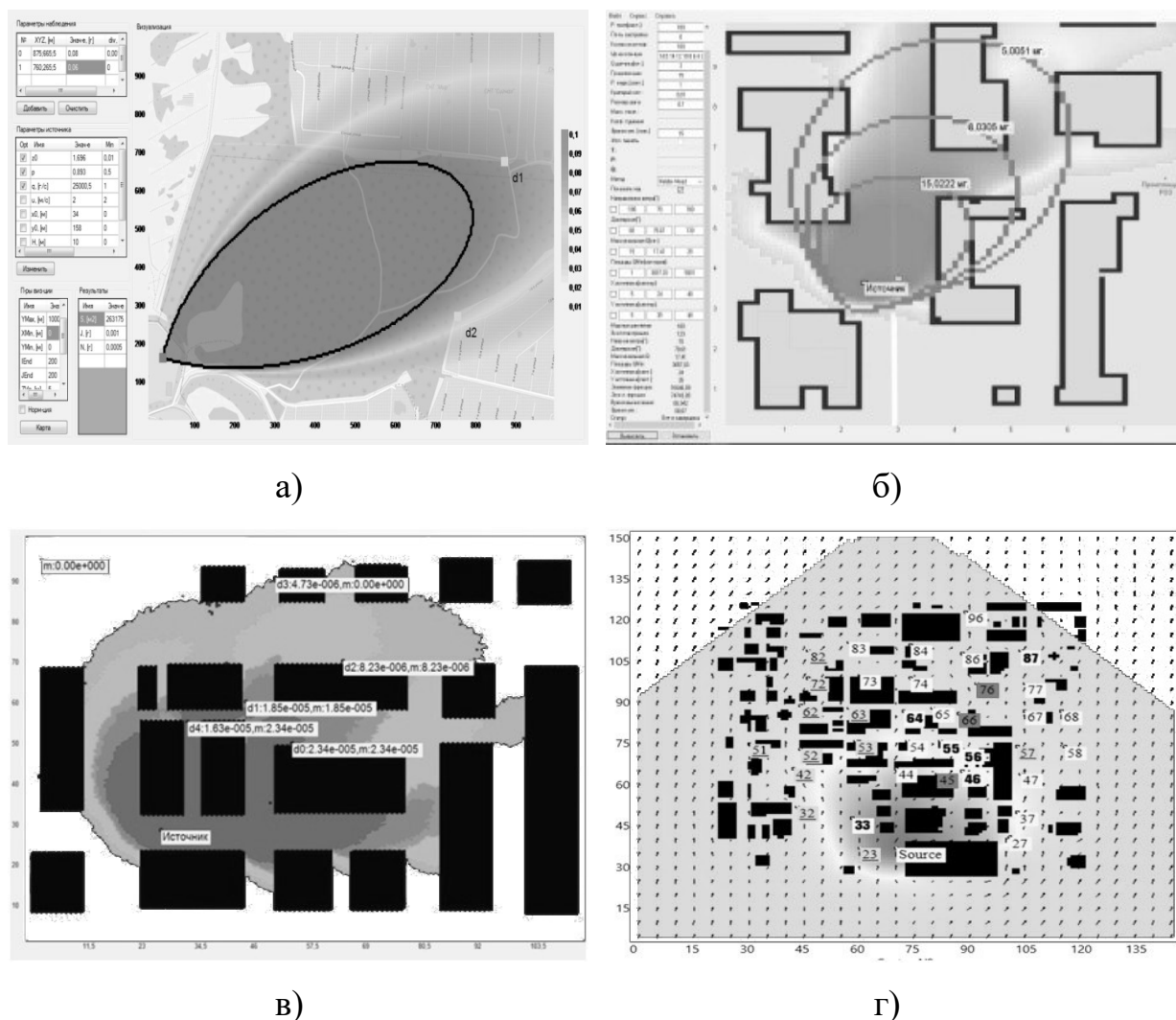


Рисунок 5 - Демонстрационные примеры визуализации зоны загрязнения с использованием: а) алгоритма на основе уравнения Гаусса; б) вероятностного алгоритма; в) фронтального алгоритма; г) эмпирического алгоритма

Выявлены следующие особенности алгоритмов:

1. Алгоритм на основе уравнения Гаусса (рисунок 5а) учитывает основные факторы рассеивания промеси и 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 5б) учитывает эффекты застройки местности и обеспечивает устойчивость решений. Недостатки: снижение быстродействия, обусловленное имитацией полета частицы; ошибки численной диффузии при малых величинах дисперсии рассеивания.

3. Модифицированный фронтальный КА-алгоритм (рисунок 5в) увеличивает скорость обработки информации при расчете зоны загрязнения в случае сложной конфигурации преград. Недостатки: снижение стабильности результатов и ограничение возможности симуляции пристеночного ветра.

4. Эмпирический КА-алгоритм (рисунок 5г) обеспечивает высокую скорость вычислений, отсутствие «шумов» в итоговых результатах и устойчивость границ моделируемой области. Недостатки: снижение информативности прогноза.

Сформированы условия отбора алгоритмов прогноза для внутреннего контура вычислительного ядра СППР. Выбор конкретного алгоритма зависит от масштаба последствий аварийного выброса, требований к скорости расчета и информативности прогноза, а также возможности учета специфических факторов рассеивания. Для прогнозирования последствий выброса при мезомасштабном уровне аварии используется алгоритм на основе уравнения Гаусса. 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. КА-алгоритм с имитацией полета частицы применен для получения информативных прогнозов, основанных на подходе Монте-Карло. Промежуточным вариантом является фронтальный алгоритм, учитывающий как скорость работы, так и результативность прогнозов.

Определены показатели эффективности прогноза и обоснован выбор алгоритмов параметрической настройки прогнозных моделей. Процесс определения параметров 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 (3). В случае прогноза без учета полей ветра работоспособность вероятностного и фронтального КА-алгоритма оценивается с использованием показателя $FAC2$ (4).

$$VG = \exp \left[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2} \right] \quad (3)$$

$$0,5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2,0, \quad (4)$$

где $C_o = C_i^d$ - наблюдение (замер концентрации), $C_p = C_i^m$ - предсказание, горизонтальная черта над формулой (3) - усреднение вычислений по всем i -м парам наблюдение-прогноз.

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.

В результате исследований разработана методика визуализации и анализа аварийных выбросов, которая содержит следующие этапы сбора и обработки информации: формирование исходных данных; выбор алгоритма прогноза; расчет начального приближения; применение стратегии поиска параметров прогноза; анализ полученных результатов.

Представлена программная реализация интерфейса комплексной системы. Для разработки интерфейса выбран язык разметки XAML. Разделение логики приложения, интерфейса пользователя (UI) и данных основано на паттерне MVVM. Математическое ядро прототипа реализовано на основе языка программирования C++, который обеспечивает высокую производительность и эффективность выполнения кода.

Для реализации событий использован набор библиотек Boost, который обеспечивает многопоточность и эффективную обработку событий. Для реализации сигналов и слотов (signals and slots) применена библиотека Signals2. Для работы с вычислительным ядром использован язык C++/CLI (Managed C++), в котором имеется возможность интеграции кода C++ с проектами .NET. Схема взаимодействия вычислительного ядра прототипа с интерфейсом пользователя приведена на рисунке 7.

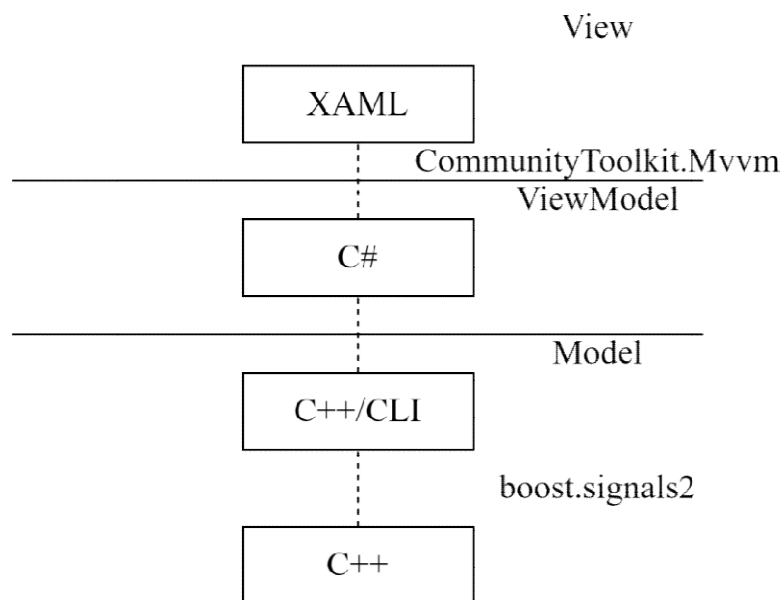


Рисунок 7 - Схема взаимодействия вычислительного ядра с пользовательским интерфейсом прототипа

Разработана и реализована модификация алгоритма "бросания лучей", позволяющая сформировать контурный слой застройки. Двумерная цифровая карта местности преобразуется в макет препятствий, который необходим для визуализации последствий выброса в условиях застройки местности. Принцип работы алгоритма основан на подсчете узлов пересечения луча, исходящего из проверяемой точки, с границами многоугольника полигона. Если множество таких узлов является нечетным, то исследуемая точка принадлежит полигону.

Однако на фрагменте карты практически всегда располагаются не только простые замкнутые полигоны, но и мультиполигоны более сложной формы, контуры которых находятся вне границ рассматриваемого фрагмента. Такие объекты ограничивают возможности анализа узлов пересечения. Поэтому в алгоритм «бросания лучей» введены дополнительные правила отбора реперных точек. Для ускорения процедуры обработки информации разработан и реализован словарь объектов ГИС, который обеспечивает поиск узла по идентификатору ID.

Экспериментальное исследование разработанных алгоритмов проведено с использованием данных полевых испытаний индикатора загрязнения Joint Urban 2003 (JU03). Из всего массива наблюдений JU03 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. 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.

В качестве основных показателей испытаний в работе использованы уровни максимальной концентрации, приведенные в таблицах Joint Urban 2003. Применено правило отбора опорных замеров: замеры с уровнем концентрации $c_x^d \leq 45$ pptv считались неопределенными.

Для оценки работоспособности подсистемы прогноза на основе КА-подхода в сложных условиях рассеивания облака примеси, наблюдаемых при локальном уровне аварии, использованы данные эксперимента DAPPLE по рассеиванию примесей в городской среде.

Результаты исследования разработанных алгоритмов с использованием тестовых данных (визуализация области выброса и результирующие диаграммы пар наблюдение-прогноз) представлены в приложении А диссертации.

Для «современной» прогнозной модели характерны следующие общепринятые интервалы критериальных показателей: $-0,3 < FB < 0,3$; $NMSE < 4$; $FAC2 \geq 0,5$; $0,7 < MG < 1,3$; $VG < 1,5$, где: FB - дробное смещение; $NMSE$ - нормализованная среднеквадратичная ошибка; $FAC2$ - доля прогнозов в пределах двукратного отклонения от наблюдений; MG - геометрическое среднее смещение; VG - геометрическая дисперсия.

В таблице 1 приведена сводная информация, полученная в результате контрольного испытания системы. При расчете критериев FB , MG , $NMSE$, VG учитывались пары наблюдение-прогноз в выбранных замерах концентрации. В таблице выделены показатели испытания, соответствующие условиям эффективного прогноза.

Анализ приведенной в таблице 1 сводной информации показал, что большинство значений критериальных показателей, рассчитанных в результате испытания системы, в основном соответствует указанным выше требованиям.

Подсистема прогноза на основе уравнения Гаусса работоспособна в условиях устойчивого ветра при мезо-уровневом масштабе аварий.

Подсистема прогноза на основе КА-подхода демонстрирует работоспособность в условиях застройки местности и способна учитывать влияние поля ветра на конфигурацию области выброса. 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.

Определено, что на эффективность прогноза с использованием КА алгоритмов в сильной мере влияют ошибки предсказания потоков ветра. Такие ошибки связаны с упрощенным подходом к моделированию потоков ветра, при котором на границах расчетной области заданы одинаковые краевые условия,

что является грубым приближением к фактическим условиям, которые характеризуются неоднородностью и временной изменчивостью.

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

Таблица 1 - Сводная таблица эффективности прогноза

Тип модели	Эксперимент	<i>FB</i>	<i>MG</i>	<i>NMSE</i>	<i>VG</i>	<i>FAC2</i>
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

Разработана и апробирована методика анализа чувствительности датчиков с использованием функции отклика. Определено, что наиболее критичными для процедур настройки КА-модели является компактное расположение опорных замеров вблизи оси выброса АХОВ.

На рисунке 8 представлена зависимость времени вычислений от размера области моделирования, определенная в 5 серийных прогонах вероятностной КА-модели с использованием набора данных IOP3 JU03. Каждая серия включала 35 вычислительных экспериментов.

Сокращение процедур, имитирующих полет частицы, привело к снижению временных затрат на поиск опорного решения и обеспечило представленную на рисунке 8 линейную зависимость времени вычислений от размера области моделирования. Обработка результатов производилась на мобильном процессоре Intel(R) Core i5 - 6200U CPU @ 2.30GHz (два ядра, четыре логических процессора).

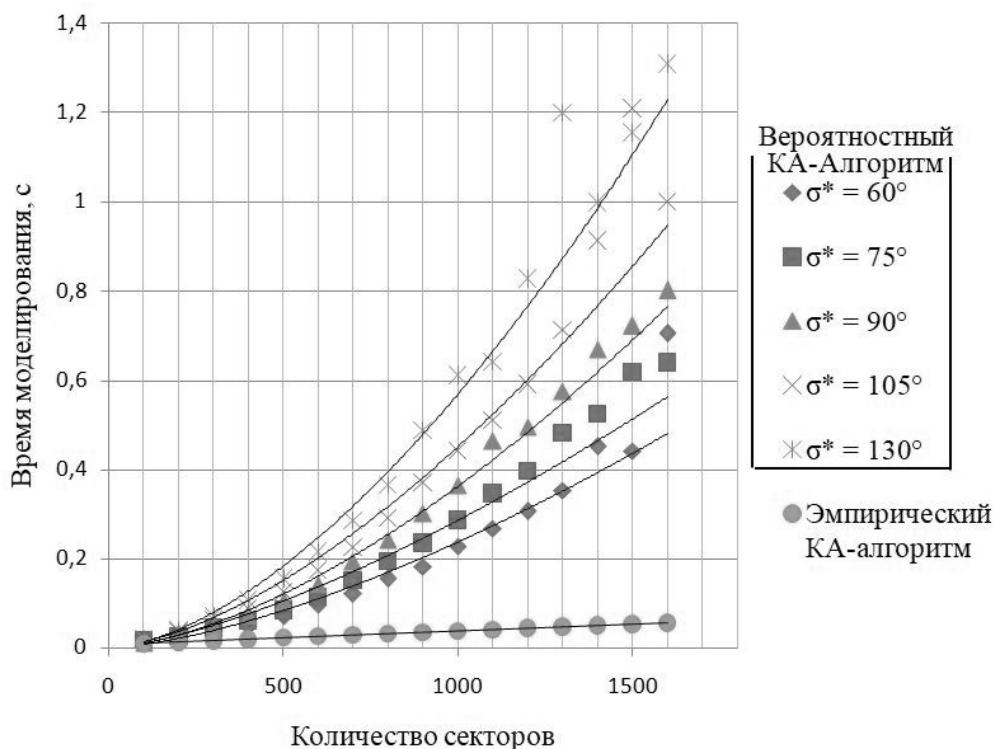


Рисунок 8 - Результаты испытаний вероятностного и эмпирического КА-алгоритма при вариациях параметра σ^*

В заключении представлены выводы, отражающие основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены результаты испытания системы на тестовых данных, сведения о внедрении результатов исследований и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен 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 клеточно-автоматного (КА) подхода для разработки метода прогнозирования 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 системы визуализации и анализа последствий аварий, эффективность системы подтверждена вычислительными экспериментами и результатами апробации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Матвеев, Ю.Н. Автоматизированная система поддержки принятия решений для прогнозирования процессов рассеивания химически опасных веществ / Ю.Н. Матвеев, **Л.О. Чернышев** // Программные продукты и системы. – 2021. – № 2(34). – С. 307-315. – DOI 10.15827/0236-235X.134.307-315. (Соискатель – 75%).

2. **Чернышев, Л.О.** Компьютерная система визуализации и анализа последствий аварийных выбросов в условиях промышленной застройки местности / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 2. – С. 60-63. (Соискатель – 75%).

3. Матвеев, Ю. Н. Алгоритм фронтального моделирования в системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов / Ю.Н. Матвеев, **Л.О. Чернышев** // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 3(15). – С. 81-91. – DOI 10.46573/2658-5030-2022-3-81-91. (Соискатель – 80%).

4. **Чернышев, Л.О.** Модификация алгоритма фронтального моделирования последствий аварийных выбросов на основе эмпирико-статистического подхода / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев // Программные продукты и системы. – 2024. – № 1(37). – С. 95–104. – DOI 10.15827/0236-235X.142.095-104. (Соискатель – 77%).

Публикации в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus

5. **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. Volume 2624, Ekaterinburg, 24–25 ноября 2021 года. Vol. 2624, Issue 1. – USA: AIP PUBLISHING, 2023. – P. 050074. – DOI 10.1063/5.0132317. (Соискатель – 80%).

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ

6. **Чернышев, Л.О.** Моделирование источника загрязнения при авариях на техногенных объектах / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев, А.Р. Хабаров // 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.

7. **Чернышев, Л.О.** Модели рассеивания загрязнений для принятия решений в чрезвычайных ситуациях / Л.О. Чернышев, В.В. Лебедев, О.Л. Чернышев // 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.

8. **Чернышев, Л.О.** Формирование подхода к моделированию оперативной ситуации при авариях на техногенных объектах / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев, Н.Г. Михальцов // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей X Междунар. науч.-практ. конф./ под ред. А.П. Ремонтова. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2020. – С. 134-139.

9. **Чернышев, Л.О.** Современные технологии принятия решений в чрезвычайных ситуациях / Л.О. Чернышев, А.Н. Неведомский, О.Л. Чернышев // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей X Междунар. науч.-практ. конф./ под ред. А.П. Ремонтова. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2020. – С. 129-133.

10. **Чернышев, Л.О.** Модификация алгоритмов оптимизации в системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев, В.В. Лебедев // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XXI Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2021. – С. 82-85.

11. **Чернышев, Л.О.** Особенности использования средств дистанционного мониторинга при выбросах токсичных газов / Л.О. Чернышев, В.В. Лебедев, О.Л. Чернышев // 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. 167-170.

12. **Чернышев, Л.О.** Технологии разработки макета местности для моделирования рассеивания загрязнений / Л.О. Чернышев, Ю.Н. Матвеев, В.В. Лебедев // 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.

13. **Чернышев, Л.О.** Алгоритмы параллельных вычислений в системе анализа последствий аварийных выбросов/ Л.О.Чернышев, Ю.Н.Матвеев, В.В.Лебедев // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конф./ под ред. А.П. Ремонтова. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2022. – С. 145-148.

14. **Чернышев, Л.О.** Рецепторные модели в системе оперативного реагирования / Л.О.Чернышев, В.В.Лебедев, О.Л.Чернышев // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конф./ под ред. А.П. Ремонтова. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2022. – С. 142-145.

15. **Чернышев, Л.О.** Особенности практического использования системы визуализации и анализа последствий аварийных выбросов загрязняющих веществ / Л.О.Чернышев, В.В.Лебедев, Ю.Н. Матвеев // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2023. – С. 158-161.

16. **Чернышев, Л.О.** Специфика системы реагирования на инциденты / Л.О. Чернышев, О.Л. Чернышев, В.В. Лебедев // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2023. – С. 154-157.

17. **Чернышев, Л.О.** Метеорологические параметры в моделях рассеивания токсических веществ/ Л.О.Чернышев, В.В. Лебедев, О.Л. Чернышев // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2024. – С. 192-196.

18. **Чернышев, Л.О.** Подход к разработке макета преград для визуализации последствий аварийных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу/ Л.О.Чернышев, В.В. Лебедев, Ю.Н. Матвеев // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании: сб. статей XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: АННМО «Приволжский Дом знаний». – 2024. – С. 196-200.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

19. 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.

20. 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.

21. 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.

Учебные пособия

22. Матвеев, Ю.Н. Введение в теорию принятия решений: учебное пособие// Ю.Н. Матвеев, **Л.О. Чернышев** / Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. - 168 с.: ISBN 978-5-9729-1924-6.