

КОТКОВА Елизавета Александровна

**МЕТОДИКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОРГАНИЗАЦИИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ИЗ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ**

2.3.4. Управление в организационных системах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»

Научный руководитель

МАТВЕЕВ Александр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты

ШУЛЬГА Татьяна Эриковна,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет им. Гагарина Ю.А.»,
кафедра «Информационно-коммуникационные системы
и программная инженерия», профессор;

КОРОЛЕВ Денис Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», кафедра техносферной
и пожарной безопасности, доцент

Ведущая организация

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

Защита состоится 26 сентября 2024 г. в 15:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 04.2.003.02 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149) и на сайте <http://dsomet.igps.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 04.2.003.02
кандидат технических наук, доцент

А.В. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задача обеспечения безопасной и своевременной эвакуации людей при пожарах и чрезвычайных ситуациях (ЧС) была и остается важнейшей проблемой как на этапах проектирования, так и на этапах эксплуатации зданий с массовым пребыванием людей, в том числе общественных зданий. Анализ пожара в торгово-развлекательном центре (ТРЦ) «Зимняя вишня» в г. Кемерово, произошедшего в марте 2018 г. и унесшего жизни 64 человек, подтверждает крайнюю важность решения проблемы принятия адекватных решений при организации эвакуации. Грамотное ситуативное управление эвакуационными потоками, своевременное информирование и инструктирование эвакуирующихся потенциально может снизить количество погибших и пострадавших при пожарах или ЧС в общественных зданиях.

При обосновании планируемых решений в сложных системах используют методы моделирования, которые получили широкое применение и при планировании путей эвакуации на этапе проектирования зданий. К настоящему времени накоплен достаточно большой класс реализованных моделей и специальных программных средств, позволяющих проводить анализ процесса эвакуации людей при пожарах, оценивать время эвакуации и пожарные риски. Исследования данных моделей с использованием программных средств позволяют проводить оценивание эффективности возможных альтернативных решений, а также обосновывать рекомендации по управлению в условиях существующих рисков.

Главным недостатком использования традиционных методов моделирования является то, что они хорошо работают на этапе планирования, при моделировании удастся рассмотреть весьма ограниченное количество сценариев с жесткими требованиями к входным параметрам моделей. Однако в реальности развитие ситуации может идти совсем не по рассмотренным заранее сценариям, что будет требовать принятия ситуативных решений в режиме реального времени.

При этом процесс моделирования эвакуации осложняется еще и многими факторами, которые оказывают значительное влияние на адекватность моделей, и неучет которых может приводить к ошибкам в результатах расчетов. Результаты моделирования в большой степени основываются на входных параметрах в моделях эвакуации, делая эти результаты чувствительными к незначительным изменениям значений входных параметров. Это означает, что оперативная и достоверная информация о состоянии аварийных выходов, координаты аварийной зоны или источника пожара, количество людей в каждом секторе исследуемого здания должны быть точно поданы на вход используемой модели, чтобы точно провести расчет необходимого времени эвакуации и уровня риска и принять адекватные решения по организации эвакуации людей.

Таким образом, используемые традиционные модели не могут в полной мере решать задачу управления эвакуацией в реальном времени в условиях динамически меняющейся ситуации. Решение задачи определения оптимального эвакуационного пути основывается на построении графов полных планов эвакуации и алгоритмах работы с ними, что требует некоторого времени, измеряемого в минутах или даже часах. Как показывают исследования, задержка на 1 мин в предоставлении решения может привести к дополнительным 5–10 мин на эвакуацию, поскольку окружающая среда в здании быстро меняется в аварийной ситуации.

Еще одним существенным ограничением применения традиционных подходов, реализующих аналитическое и имитационное моделирование эвакуации, является сложность имитирования человеческого поведения, которое характеризуется высокой степенью неопределенности при принятии решений людьми в условиях стрессовой ситуации и панического состояния. Для повышения адекватности моделирования процессов эвакуации используемые модели должны учитывать возможные изменения в поведении людей, однако применяемые в практике и рекомендуемые к модели эвакуации в настоящее время данные факторы не учитывают. Это значительно снижает их практическую значимость для

управления эвакуацией в режиме реального времени. Для решения перечисленных проблем весьма перспективным видится возможность интеграции традиционных моделей эвакуации с методами машинного обучения, в частности, нейронными сетями. При решении задачи определения времени эвакуации и обоснования оптимального эвакуационного пути из общественного здания можно ожидать, что алгоритмы машинного обучения за очень короткое время обеспечат возможность принятия в сложной обстановке адекватного решения по регулированию потоков людей, находящихся внутри здания, с учетом информации о пространственной топологии здания, актуальном реальном расположении людей и источников опасности.

Степень разработанности темы исследования. В вопросы управления и организации процессов эвакуации значительный вклад внесли труды А.В. Матвеева, А.П. Парфененко, Д.А. Самошина, А.А. Таранцева, В.В. Холщевникова, S. Gwynne, X. Zheng. Научные исследования, посвященные проблеме учета факторов психоэмоционального состояния людей в условиях ЧС, проводились не только зарубежными авторами, такими как D. Helbing, T. Miyoshi, J. Radianti, K. Zia и др., но и отечественными исследователями: С.В. Калачиным, А.В. Матюшиным, А.А. Порошиным. Возможности использования методов искусственного интеллекта для поддержки принятия решений в интересах обеспечения безопасности при пожарах или ЧС исследованы А.В. Калачем, И.Г. Малыгиным, А.В. Маслобоевым, К.С. Chan, R. Panchalingam и др.

Однако в работах указанных авторов возможности решения задачи по организации эвакуации людей в условиях паники и динамически меняющейся ситуации в полной мере не представлены.

Цель исследования заключается в повышении качества прогнозирования времени эвакуации при пожарах в общественных зданиях в условиях динамически меняющейся ситуации.

Для достижения цели исследования в работе были поставлены и решены следующие частные задачи:

1. Провести исследование процесса эвакуации людей при пожаре или ЧС в условиях паники.
2. Провести синтез научно-методических средств оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий.
3. Разработать программное обеспечение для интеллектуального прогнозирования эффективности организации эвакуации из общественных зданий на примере ТРЦ в условиях динамически меняющейся ситуации.
4. Провести оценку качества применения разработанных авторских научно-методических средств.

Объект исследования – процесс эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ при пожарах.

Предмет исследования – моделирование распространения паники и ее учет при организации эвакуации.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- в отличие от известных авторская модель эвакуации дополнительно учитывает влияние психоэмоционального состояния толпы на процесс эвакуации;
- в отличие от известных методов оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий реализует возможности агентно-ориентированного подхода для описания психоэмоционального поведения каждого агента в отдельности в процессе эвакуации толпы;
- для решения задачи оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ впервые использованы одновременно методы имитационного и нейросетевого моделирования;

– автоматизированы процедуры прогнозирования эффективности организации эвакуации из общественных зданий типа ТРЦ с использованием оригинальных научно-методических средств.

Теоретическая значимость состоит в:

- установлении существенной взаимосвязи между степенью распространения паники при пожаре в организационных системах и скоростью эвакуации из общественных зданий;
- развитии класса методов оценки эффективности организации процесса эвакуации людей в части учета факторов паники;
- расширении границ применимости методов имитационного и нейросетевого моделирования в решении задачи организации эвакуации людей из общественных зданий.

Практическая значимость состоит в:

- научно обоснованной необходимости и возможности учета фактора распространения паники при моделировании процесса эвакуации людей;
- возможности количественной оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ в условиях паники;
- возможности оперативного прогнозирования времени эвакуации в условиях динамически меняющейся ситуации при пожаре в общественных зданиях;
- возможности решения задачи оптимального планирования путей эвакуации в темпе изменения обстановки при пожаре в общественном здании за счет повышения качества прогнозирования эффективности организации эвакуации.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы системного анализа, теории вероятности и математической статистики, методы математического моделирования систем, методы машинного обучения, методы нейросетевого, имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту. Соискателем лично получены следующие основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Системно-динамическая модель распространения паники при эвакуации людей из общественных зданий.
2. Метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий с использованием агентно-ориентированного подхода.
3. Методика интеллектуального прогнозирования времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует п. 2 «Разработка математических моделей и критериев эффективности, качества и надёжности организационных систем», п. 5 «Разработка методов получения данных и идентификации моделей, прогнозирования и управления организационными системами на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации» паспорта научной специальности 2.3.4. Управление в организационных системах.

Степень достоверности. Достоверность основных полученных результатов обеспечивается корректностью постановки научно-технической задачи исследования, надёжными исходными данными, адекватностью выбранного математического аппарата и корректностью применения указанных методов исследования и подтверждается апробацией и внедрением полученных результатов в практическую деятельность.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационного исследования докладывались, обсуждались и получили одобрение на: III-й Международной заочной научно-практической конференции «Безопасность человека и общества: совершенствование системы реагирования и управления защитой от чрезвычайных ситуаций» (Минск, 2019 г.); Второй Республиканской научной конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях», Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: научный

журнал (Донецк, 2019 г.); XIV-ой Международной научно-практической конференции курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов (аспирантов, соискателей) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (Минск, 2020 г.); Международном семинаре «Пожарная безопасность объектов хозяйствования» (Кокшетау, 2020 г.); Научно-практической конференции «Молодёжь. Наука. Инновации в области обеспечения безопасности» (Санкт-Петербург, 2020 г.); IV-ой Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, 2020 г.); XI-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (Кокшетау, 2020 г.); IX-ой всероссийской научно-практической конференции «Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности» (Санкт-Петербург, 2020 г.); XV-ой Международной научно-практической конференции молодых ученых «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (Минск, 2021 г.); XVII-ой международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Воронеж, 2021г.); Всероссийской научно-практической конференции «Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения» – 2021 (Санкт-Петербург, 2021 г.); Научно-техническом семинаре «Современные проблемы системного анализа: год спустя» (Санкт-Петербург, 2021 г.); III-ей Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» (Железногорск, 2021 года.); Международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (Санкт-Петербург, 2021г.).

Исследования по теме диссертационной работы были поддержаны грантами Правительства Санкт-Петербурга для студентов и аспирантов (2019, 2021 г.г.), и грантом для молодых ученых, молодых кандидатов наук вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (2023 г.).

Внедрение результатов исследования. Основные положения диссертационного исследования внедрены в практическую деятельность Главного управления МЧС России по Ленинградской области при выдаче рекомендаций по способам повышения уровня обеспечения пожарной безопасности собственникам объектов с массовым пребыванием людей, а также ООО «Редженси Пропертиез» в проектные решения здания многофункционального центра «Остров» по обеспечению нормативного уровня индивидуального пожарного риска для контингента рассматриваемого объекта. Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждается соответствующими актами.

Публикации по материалам диссертации. Опубликовано 23 научных работы (8 статей, 14 материалов научных конференций, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ), 5 из которых опубликованы в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 1 в сборнике индексируемом Web Of Science и Scopus, в том числе 12 работ опубликованы без соавторов.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту основные положения, выводы и результаты получены автором лично. Автором предложена системно-динамическая модель распространения паники при эвакуации людей из общественных зданий, метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий с использованием агентно-ориентированного подхода, методика интеллектуального прогнозирования времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 160 страниц машинописного текста, в том числе 46 рисунков, 15 таблиц. Список литературы включает 180 библиографических источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность, цель, задачи, объект, предмет и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполнения работы, положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Социально-экономические и организационные аспекты управления эвакуацией людей из общественных зданий» проведен анализ пожаров, их причин и последствий, произошедших в общественных зданиях на примере ТРЦ, выявлены их общие закономерности. Проведенный анализ из официальных статистических данных показывает, что численность пожаров на объектах, подходящих по функциональному значению к ТРЦ (объекты складского, торгового, сервисного, административного, культурно-досугового назначения) ежегодно остается на достаточно высоком уровне. Именно при пожарах и ЧС на объектах данной категории возможен значительный социальный ущерб, сопровождающийся большим количеством погибших и пострадавших людей.

Определено, что моделирование и изучение процесса эвакуации при ЧС, в том числе пожарах в зданиях, включая исследование поведения людей в экстремальных ситуациях, является важным аспектом для принятия управленческих решений, направленных на снижение потенциального количества жертв и пострадавших. Главным недостатком использования традиционных методов моделирования является то, что они хорошо работают на этапе планирования, при моделировании удастся рассмотреть весьма ограниченное количество сценариев с жесткими требованиями к входным параметрам моделей. Однако в реальности развитие ситуации может идти совсем не по рассмотренным ранее сценариям, что будет требовать принятия ситуативных решений в режиме реального времени.

Еще одним существенным ограничением применения традиционных подходов, реализующих аналитическое и имитационное моделирование, является сложность имитирования человеческого поведения, которое характеризуется высокой степенью неопределенности при принятии решений в условиях стрессовой ситуации и паники. Применяемые модели должны учитывать факторы степени опасности пожара и состояние людей, однако используемые на практике научно-методические и программные средства в настоящее время данные факторы не учитывают, что также значительно снижает их практическую значимость при управлении эвакуацией в режиме реального времени.

Среди множества подходов к моделированию эвакуации в последнее время все больше находит применение агентно-ориентированный, который позволяет исследователям учитывать поведение отдельных индивидуумов и его влияние на процесс эвакуации толпы в целом. Были рассмотрены исследования как отечественных, так и иностранных ученых в области агентного моделирования процесса эвакуации. Обосновано, что агентно-ориентированный подход к моделированию процесса эвакуации является весьма перспективным и позволяет повысить адекватность моделей за счет учета когнитивных способностей людей в экстремальных ситуациях. Данный подход должен быть интегрирован с другими методами моделирования. В этой связи перспективным видится интегрирование методов агентно-ориентированного моделирования с методами искусственного интеллекта при оценивании эффективности возможных решений по организации эвакуации в условиях сложившейся ситуации при пожаре в общественных зданиях.

Таким образом, в первой главе диссертации поставлена и формализована основная научная задача диссертационного исследования, заключающаяся в разработке научно-методических средств оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий с учетом фактора паники в условиях динамически меняющейся ситуации.

Во второй главе «Исследование влияния поведения людей на процесс эвакуации из общественных зданий» рассматривается задача изучения распространения паники среди

людей во время эвакуации, значительно усиливающей факторы неопределенности в процессе эвакуации при ЧС в сложных социальных системах.

Для изучения динамических процессов при массовой эвакуации предложено использовать системно-динамический подход. По сравнению с другими видами моделирования этот метод имеет особые преимущества при работе с неполными знаниями при принятии решений. Системно-динамический подход, предложенный впервые Дж. Форрестером, позволяет использовать принципы обратной информационной связи при моделировании динамики функционирования сложных систем, которая во многом определяется структурой причинно-следственных связей между элементами сложной системы. В первую очередь, данные модели направлены на понимание и исследование общей траектории развития и прогнозирования изменения состояний системы, а не на получение достаточно точных количественных значений. Применение системно-динамического подхода позволяет строить модели систем с большим количеством фазовых переменных, объединенных большим количеством причинно-следственных связей, интегрируя их в одно целое и давая возможность получить количественное обоснование в системах поддержки принятия управленческих решений.

Основой для построения системно-динамических моделей являются знания экспертов об исследуемой системе. Именно эксперты формируют множество факторов, включаемых в описание динамики состояний исследуемой системы, а также определяют причинно-следственные связи между ними.

В целом в рассматриваемой системе эвакуации можно выделить три базовых подсистемы, которые взаимодействуют между собой, формируют и определяют глобально весь процесс эвакуации людей:

- внешняя среда, формирующая риски угрозы для людей в результате наступления ЧС или пожара, которые могут привести к возникновению паники и ее дальнейшему распространению среди толпы;
- подсистема управления эвакуацией (модуль принятия решений), которая может влиять на действия эвакуирующихся и в некоторой степени контролировать распространение паники, за счет координации действий эвакуируемых в условиях опасности путем оповещения людей с использованием различных технических средств (звуковое и речевое оповещение, световые табло и указатели и др.);
- толпа перемещающихся людей.

На основе применения метода декомпозиции последняя подсистема была разделена на ряд взаимодействующих элементов (Таблица 1).

Из-за достаточной сложности интерпретации взаимодействия при групповом поведении для подобной сложной системы весьма существенным становится качественный метод, в котором взаимодействие между различными элементами может быть просто описано следующим образом:

- положительное воздействие, которое обозначается знаком «+»;
- отрицательное воздействие, которое обозначается знаком «-».

Например, рассмотрим взаимодействие между эмоциональным состоянием людей в процессе эвакуации и скоростью эвакуации. Увеличение количества людей, находящихся в НЭС приводит к увеличению СЭ. Поэтому параметр НЭС оказывает положительное влияние на параметр СЭ, что отражается в виде знака «+». Увеличение количества людей в ПС снижает значение КТ выбора направления движения толпы, что отражается в виде знака «-». Аналогичным образом могут быть получены другие взаимодействия между элементами системы эвакуации. Таким образом, была сформирована схема причинно-следственных связей исследуемой системы (Рисунок 1).

Таблица 1 – Элементы системно-динамической модели эвакуации

Параметр	Значение и обоснование
Внешняя среда (ВС)	Диапазон значения параметра от 0 до 1. Значение отражает степень опасности, чем ближе ВС к 1, тем выше уровень опасности. Значение параметра ВС постепенно увеличивается со временем, что отражает развитие степени опасности, например распространение опасных факторов пожара (ОФП)
Модуль принятия решений (МПР)	На необходимость об информировании толпы и регулировании процесса эвакуации и спасения влияет уровень опасности (элемент ВС). То есть чем выше значение параметра ВС, тем больше будет значение МПР, т.е. требуется выше интенсивность указаний эвакуирующимся. Диапазон значения параметра от 0 до 1
Общее количество эвакуирующихся из здания (ОКЭ)	С распространением и развитием пожара будет постепенно увеличиваться количество сегментов здания, находящихся в опасности, что приведет к увеличению количества эвакуирующихся. То есть значение параметра ОКЭ зависит от параметра ВС. Начальное значение ОКЭ было выбрано в количестве 1500 человек
Количество людей, находящихся в нормальном эмоциональном состоянии (НЭС)	Параметр НЭС представляет количество агентов в нормальном состоянии, не подвергнувшихся панике
Количество людей, находящихся в паническом состоянии (ПС)	Параметр отражает количество людей, перешедших в состояние паники, которые формируют нестандартное поведение в процессе эвакуации
Коэффициент точности (КТ) выбора направления движения толпы	Параметр КТ представляет коэффициент точности направления эвакуации всей толпы в целом. Предположим, что P_1 – вероятность того, что люди, находящиеся в нормальном состоянии, выбирают правильное направление эвакуации, а P_2 – вероятность того, что люди, находящиеся в состоянии паники выбирают правильное направление эвакуации, тогда $КТ = (НЭС \cdot P_1 + ПС \cdot P_2) / ОКЭ.$ Значения вероятностей P_1 и P_2, очевидно, зависят от МПР, поскольку при правильном управлении эвакуацией и оповещении с использованием различных технических средств значения данных вероятностей будут увеличиваться
Скорость эвакуации (СЭ)	Определяет скорость движения толпы. Начальное значение параметра СЭ было принято 1 м/с. Когда толпа будет постепенно переходить в состояние паники, то значение СЭ будет увеличиваться, в силу того что эвакуирующиеся будут в большей степени стремиться убежать из опасной зоны
Интенсивность эвакуации (ИЭ)	Параметр отражает количество людей, успешно переместившихся в безопасную зону через выход определенной ширины в единицу времени
Коэффициент эвакуации (КЭ)	Представляет собой соотношение людей, успешно эвакуировавшихся в безопасное место, к их общему количеству

Рассматриваемая структура системы позволяет нам только приблизительно знать механизм обратной связи между различными элементами через их причинно-следственные связи. Создание имитационной модели, реализующей системно-динамический подход, позволяет нам количественно описать эту обратную связь через систему дифференциальных уравнений и получить динамику процесса.

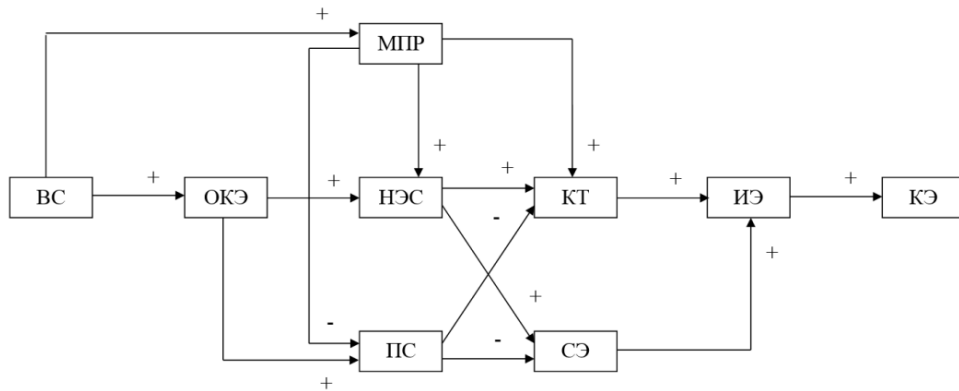


Рисунок 1 – Схема причинно-следственных связей процесса эвакуации

Применительно к системе имитационного моделирования AnyLogic, в которой была реализована предложенная системно-динамическая модель, мы оперируем тремя основными группами переменных:

- переменные, задающие значения уровня (накопители);
- переменные, отражающие скорости протекания процессов;
- вспомогательные переменные.

Переменные уровня используются для описания мгновенного состояния элемента в системе, они формируются под воздействием входных и выходных переменных скоростей протекания процессов. Вспомогательные переменные используются для выполнения дополнительных алгебраических операций или для описания нелинейных отношений некоторых переменных.

Параметры КТ, СЭ, ИЭ и КЭ в данной модели рассматривались в качестве переменных скорости протекания процесса. Переменные ОКЭ, НЭС, ПС являются фазовыми переменными, которые отражают изменения состояния системы во времени, то есть это переменные уровня (накопители). Параметры ВС и МПР, оказывающие влияние на состояния системы эвакуации, также рассматривались как переменные уровня.

При исследовании данной модели был проведен анализ зависимости между степенью распространения опасности и количеством людей, находящихся в ПС. В первом случае предполагалось, что отсутствует МПР, то есть не осуществлялось никакое регулирование потока эвакуирующихся и его оповещение (Рисунок 2). Результаты исследования показывают, что при отсутствии МПР паника в толпе будет постепенно распространяться с начального значения до некоторого уровня, а затем по мере распространения опасности при увеличении площади пожара в здании будет иметь экспоненциальный рост. То есть приходим к ситуации неконтролируемого состояния паники.

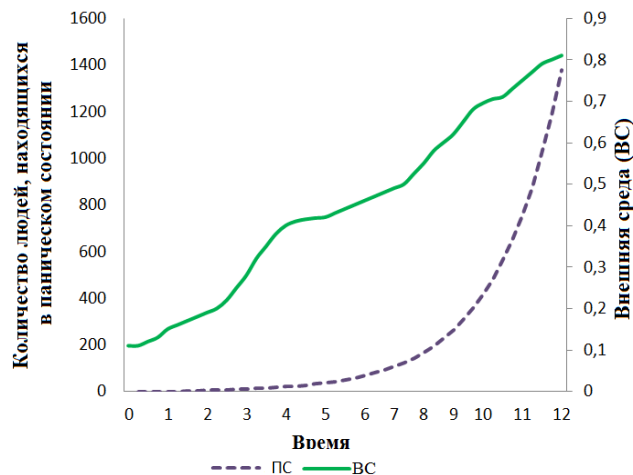


Рисунок 2 – Взаимосвязь между степенью распространения опасности и количеством людей в паническом состоянии (в отсутствии модуля поддержки решений)

При наличии МПР явно наблюдается сдерживающий эффект, не позволяющий развитию панического состояния перейти в неконтролируемое состояние (Рисунок 3). Результаты показывают, что количество людей, находящихся в ПС, будет постепенно снижаться до контролируемого уровня. Из-за взаимосвязи между степенью развития опасности, и уровнем оповещения и регулирования потока эвакуирующихся значение параметра МПР будет увеличиваться по мере роста параметра ВС. Если интенсивность оповещения и управления толпой будет увеличена, то это, несомненно, будет позитивно влиять на состояние толпы и обеспечивать ее адекватное поведение в процессе эвакуации. Данные факторы обосновывают соответствие полученных результатов реальной ситуации. Также по причине того, что во всей толпе в целом доля людей в ПС в начальный момент времени значительно меньше доли людей в НЭС ($\text{НЭС} \gg \text{ПС}$), то при качественном управлении и регулировании потока эвакуирующихся будет получена ситуация, когда большинство людей, находящихся в НЭС, поведут за собой паникующих людей, что постепенно приведет к снижению их количества. То есть в данном случае оказывается возможным управлять процессом распространения паники в толпе.

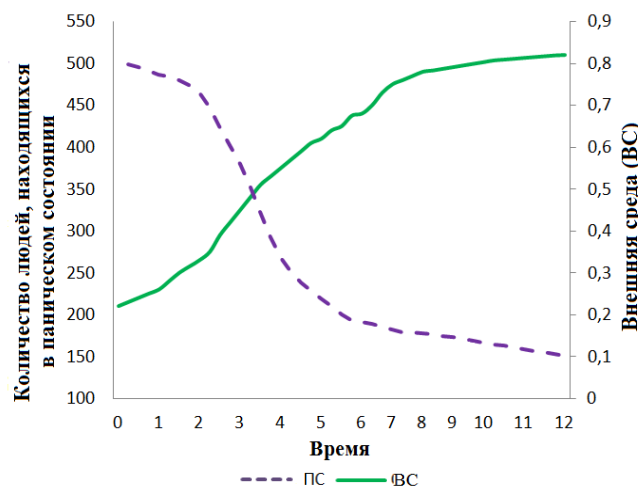


Рисунок 3 – Взаимосвязь между степенью распространения опасности и количеством людей в паническом состоянии (при наличии модуля поддержки решений)

Далее было проанализировано влияние распространения паники в толпе на эффективность эвакуации. Действительно, параметр ИЭ, отражающий интенсивность выхода толпы через эвакуационный выход в безопасную зону, в определенной степени может рассматриваться в качестве показателя эффективности эвакуации. В ПС, с одной стороны, у толпы в целом будет увеличиваться СЭ, с другой стороны, будет снижаться КТ направления движения толпы из здания. На Рисунке 4 представлены результаты взаимосвязи между СЭ и ИЭ.

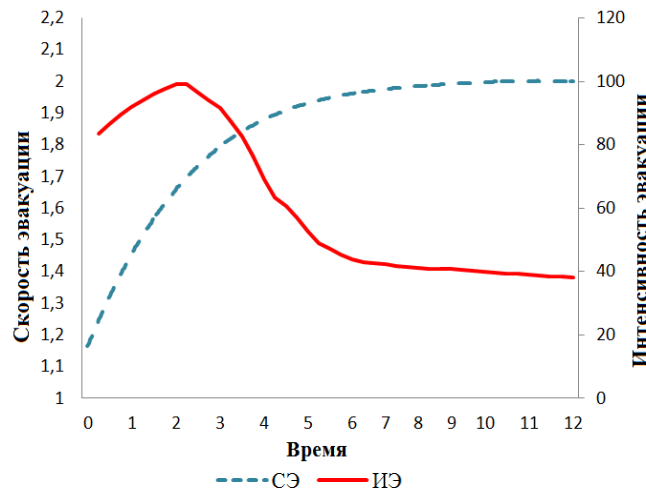


Рисунок 4 – Взаимосвязь между скоростью толпы и интенсивностью эвакуации

Полученные результаты показывают, когда значение СЭ находится в диапазоне от 1,5 до 1,7 м/с, значение показателя ИЭ является наиболее высоким. С дальнейшим ростом скорости эвакуации эффективность эвакуации будет уменьшаться. Обоснование данного результата состоит в следующем. Начальное значение скорости эвакуации составляло 1 м/с, что соответствует средней скорости ходьбы человека. По мере роста площади пожара в здании и опасности, люди будут стараться добраться до безопасной, зоны как можно быстрее, тем самым будет увеличиваться средняя скорость потока. Как результат – увеличится интенсивность эвакуации, достигая наибольшего значения при скорости потока 1,5–1,7 м/с. Однако дальнейшее увеличение СЭ будет приводить к росту паники в толпе, образованию скопления людей у эвакуационного выхода, что приведет к появлению конфликтов в толпе. В итоге ИЭ, напротив, начнет уменьшаться, что будет соответствовать снижению эффективности массовой эвакуации.

Существенным ограничением в разработанной модели является возможность оценить результаты исключительно на качественном уровне. Оценку достоверности полученных результатов модели разумно проводить в сравнении с известными результатами других исследований. Было получено, что результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с другими исследованиями, где делались предположения, что значительное увеличение скорости эвакуирующейся толпы приводит к снижению эффективности эвакуации. Полученные результаты подтверждают значительное влияние психоэмоционального состояния толпы на процесс эвакуации. Таким образом, очень важным является управление распространением паники в толпе, для контроля скорости и направления ее движения при пожаре в общественных зданиях для обеспечения своевременной и безопасной эвакуации.

В третьей главе «Моделирование эвакуации людей из общественных зданий» разработана имитационная модель эвакуации людей на примере одного из ТРЦ Санкт-Петербурга. Реализованная в среде Anylogic модель позволяет проводить эксперименты с моделью, рассматривая различные сценарии, с целью оценки эффективности организации эвакуации для каждого сценария.

Для количественного оценивания влияния паники на общее время эвакуации людей из общественного здания, рассматриваемого в качестве основного критерия эффективности организации эвакуации, предложено в разработанной имитационной модели, использующей реализованную в AnyLogic стандартную пешеходную библиотеку для моделирования людских потоков, дополнительно использовать агентно-ориентированный подход, позволяющий описать психоэмоциональное поведение каждого эвакуирующегося в отдельности и исследовать при этом глобальные закономерности в процессе эвакуации.

На процесс возникновения и распространения паники у людей в процессе эвакуации в случае пожара или ЧС может оказывать влияние внешняя среда, а также поведение других эвакуирующихся. В работе Д. Хелбинга ранее было показано, что уровень психоэмоционального состояния или степени паники эвакуирующихся может зависеть от трех основных факторов:

- время нахождения в здании t ;
- плотность скопления людей D ;
- расстояние до выхода l .

Воздействия данных факторов предлагается описать соответствующими монотонно возрастающими функциями $f_1(t)$, $f_2(D)$, $f_3(l)$, так как очевидно, что чувство страха, а значит и панического состояния у эвакуирующегося не уменьшается при развитии критической ситуации.

В данной модели предлагается сделать еще одно допущение, состоящее в том, что существует некое критическое время t_c с соответствующим значением функции $f_1(t_c)$, для которой в случае $t < t_c$ время пребывания людей в критической ситуации еще незначительно и недостаточно, чтобы они начали входить в паническое состояние и проявлять соответствующую реакцию. Если же $t > t_c$, то уже возможно проявление у эвакуирующихся

панического состояния. Время, когда начинает проявляться паническая реакция, может быть определено на основе порогового уровня паники P_L :

$$\begin{cases} P_L = \min(f_1(t_c), f_2(D_c), f_3(l_c)) \\ f_1(t) = (1 + e^{-(\frac{10.6t}{t_{max}} - 5.3)})^{-1}, \quad 0 \leq f_1(t) \leq 1 \\ f_2(D) = (1 + e^{-(\frac{10.6D}{D_{max}} - 5.3)})^{-1}, \quad 0 \leq f_2(D) \leq 1 \\ f_3(l) = (1 + e^{-(\frac{10.6l}{l_{max}} - 5.3)})^{-1}, \quad 0 \leq f_3(l) \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

где t_c – критическое время, значение которого равно 60 секундам, до которого не начинается процесс эвакуации и, следовательно, проявление возможной панической реакции у эвакуирующихся,

D_c – критическое значение плотности, которое устанавливается на уровне 3,33 (ч/м²),

l_c – критическое расстояние до выхода, т.е. расстояние от выхода до точки, от которой эвакуирующийся уже точно не заблудится и сможет гарантированно переместиться наружу,

t_{max} – максимально допустимое значение времени пребывания людей в здании, которое представляет собой прогнозируемое время до начала воздействия ОФП,

D_{max} – максимально допустимое значение плотности, которое установлено на уровне 5,0 (ч/м²).

l_{max} – максимально возможное значение расстояния до выхода, которое представляет собой расстояние от самой дальней точки в здании до выхода.

Для каждого эвакуирующегося значение степени паники P может быть определено на основе выражения:

$$P = a_1 \cdot f_1(t) + a_2 \cdot f_2(D) + a_3 \cdot f_3(l), \quad (2)$$

где a_1, a_2, a_3 – весовые коэффициенты, $a_1 + a_2 + a_3 = 1$.

Степень влияния фактора времени нахождения в зоне опасности при пожаре или ЧС в здании (I_t), фактора плотности скопления людей (I_D) и фактора расстояния до выхода (I_l) определяется следующим образом:

$$I_t = \left(\frac{|t - t_{max}|}{t_{max}} \right), \quad I_D = \left(\frac{|D - D_{max}|}{D_{max}} \right), \quad I_l = \left(\frac{|l - l_{max}|}{l_{max}} \right). \quad (3)$$

Весовые коэффициенты a_i в уравнении (3) будут определяться на основе выражений:

$$a_1 = \frac{I_t}{(I_t + I_D + I_l)}, \quad a_2 = \frac{I_D}{(I_t + I_D + I_l)}, \quad a_3 = \frac{I_l}{(I_t + I_D + I_l)}. \quad (4)$$

Степень паники P_i каждого i -го агента в программе AnyLogic вычисляется один раз в секунду. Агенты начинают проявлять паническую реакцию, когда значение P_i оказывается выше, чем P_L , а их скорость в этом случае будет определяться следующим образом:

$$V_i = (1 - P_i) \cdot V_0 + P_i \cdot V_{max}, \quad (5)$$

где V_0 – начальная скорость в условиях отсутствия паники для соответствующего участка эвакуационного пути,

V_{max} – максимальная скорость в условиях отсутствия паники для соответствующего участка эвакуационного пути.

Предложенные выше модели эвакуации (имитационная модель эвакуации без паники и агентная модель распространения паники) легли в основу метода оценки эффективности организации эвакуации людей в общественном здании при пожаре, структурная схема которого представлена на Рисунке 5.

Проведенные исследования показывают существенное влияние возможного панического состояния эвакуирующихся на общее время эвакуации при определенных сценариях (Таблица 2). Паническое состояние, возникающее у эвакуирующихся, приводит к изменению скорости их перемещения, что при реализации некоторых сценариев может привести к увеличению времени эвакуации и катастрофическим последствиям. В особенности в тех случаях, когда данные реакции будут приводить к увеличению плотности людей на определенных участках эвакуационных путей, созданию скопления людей и давки, а значит и к замедлению времени, необходимого на перемещение в безопасную зону.



Рисунок 5 – Схема метода оценки эффективности организации эвакуации

Таблица 2 – Элементы системно-динамической модели эвакуации

№ сценария	Время эвакуации без учета фактора паники, сек.	Время эвакуации при учете фактора паники, сек.	Изменение времени эвакуации, сек.	Влияние фактора паники, %
1	442	413	-29	6,56 %
2	687	765	78	-11,35 %
3	474	448	-26	5,49 %
4	563	583	20	-3,55 %
5	597	634	37	-6,20 %
6	875	965	90	-10,29 %
7	706	814	108	-15,3 %

В четвертой главе «Научно-методические средства интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению эвакуацией людей из общественных зданий» исследованы возможности применения методов имитационного моделирования и машинного обучения для решения задачи прогнозирования эффективности организации эвакуации при динамически меняющейся ситуации.

Обосновано, что имитационное моделирование представляет собой инструмент для прогнозирования, позволяющий провести оценку принимаемых решений до их непосредственной реализации. По сравнению с другими инструментами имитационное моделирование позволяет обрабатывать временные и причинно-следственные зависимости, кроме того, имитационное моделирование позволяет прогнозировать в условиях неопределенности, а также данный вид моделирования является достаточно наглядным, позволяя визуализировать результаты моделирования.

Для решения задачи оценки эффективности управления эвакуацией при пожарах или ЧС в общественных зданиях в качестве входных данных для имитационной модели могут использоваться: планы зданий с сформированными путями эвакуации; максимальная вместимость людей в здании; фактическое количество людей в здании с местами их размещения; скорость перемещения людей в здании; стадия пожара; время распространения ОФП (Рисунок 6).

На выходе модели могут быть получены результаты оценки: времени эвакуации людей из здания; количества эвакуировавшихся за заданный период времени; количества пострадавших.

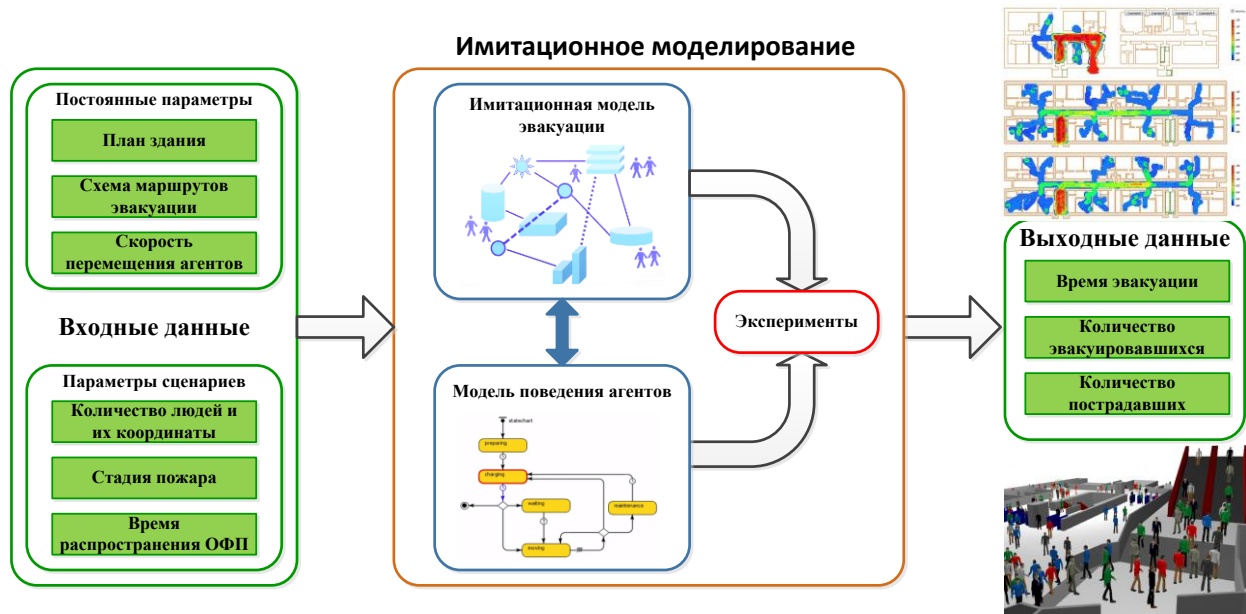


Рисунок 6 – Схема имитационного моделирования эвакуации

В диссертации рассмотрены пять вариантов объединения и совместного использования имитационного моделирования (ИМ) и машинного обучения (ML-моделей). Некоторые из них дают дополнительные возможности для разработчиков моделей, а некоторые для аналитиков данных. В решении задачи оценки эффективности организации эвакуации предложено использовать следующий подход. Сами по себе имитационные модели могут быть использованы в качестве виртуальной безрисковой среды для оценки последствий в каждой сложившейся ситуации, а также результата эффективности принятия альтернативных вариантов управленческих решений. Однако количество возможных сценариев в процессе эвакуации людей из здания в случае пожара или ЧС может быть настолько велико, что предусмотреть все из них фактически невозможно. В этих условиях предлагается выходные данные ИМ использовать в качестве обучающих данных для ML-модели, то есть будет решаться задача обучения по прецедентам. Есть две основные причины для реализации данного подхода:

1. ИМ является отличным средством для генерации необходимого количества размеченных данных, так как ИМ позволяют с наибольшей адекватностью отразить функционирование реальных систем. Множество новых сценариев может быть с успехом реализовано с использованием ИМ. Полученные новые размеченные входные данные совместно с результатами моделирования могут быть использованы для увеличения наборов данных, позволяя при этом протестировать различные алгоритмы машинного обучения для обоснования возможности их применения в реальных системах.

2. Преимущество использования такого подхода состоит в том, что построенная ML-модель будет аппроксимировать выходные данные ИМ, которая сама по себе является более сложной и ресурсоемкой. С использованием ML-модели можно значительно быстрее получать результаты оценки времени эвакуации и прогнозируемое количество пострадавших, что быстрее позволит принимать адекватные управленческие решения. При данном подходе будет отсутствовать необходимость моделировать и анализировать различные сценарии, соответствующие различным управленческим решениям. ML-модель сможет сама рекомендовать оптимальное решение при реализации ее взаимодействия с системой оповещения и управления эвакуацией.

Данный подход позволил разработать методику интеллектуального прогнозирования времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ в условиях сложившейся

ситуации с использованием ML-моделей и ИМ. Структурная схема предлагаемой методики представлена на Рисунке 7.

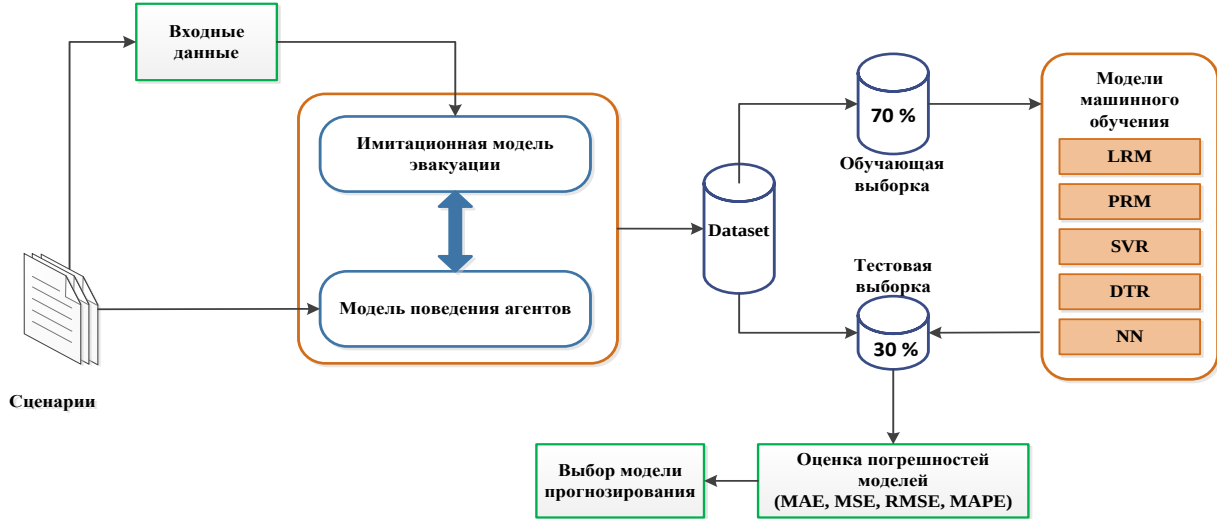


Рисунок 7 – Структурная схема методики интеллектуального прогнозирования времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ

Реализация данной методики может быть представлена следующей последовательностью этапов:

Этап 1. Формирование множества сценариев эвакуации S .

Входные данные для каждого сценария, реализуемого в имитационной модели, образуют множество признаков $d_1, d_2, \dots, d_n$. Вектор $(d_1(s), d_2(s), \dots, d_n(s))$ образует признаковое описание эксперимента $s \in S$.

Совокупность признаковых описаний всех сценариев эвакуации из обучающей выборки образует матрицу признаков сценариев:

$$D = \|d_i(s_j)\|_{k \times n} = \begin{pmatrix} d_1(s_1) & \dots & d_n(s_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_1(s_k) & \dots & d_n(s_k) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Этап 2. Проведение экспериментов с имитационной моделью.

При использовании разработанной ранее имитационной модели эвакуации проводятся эксперименты по реализации каждого из сформированных сценариев эвакуации $s \in S$ и формирование множества результатов W , (например, расчетное время эвакуации, количество пострадавших или эвакуировавшихся за заданное время).

Этап 3. Разделение всего набора данных на обучающую выборку (70%) и тестовую выборку (30%).

Из всего множества сценариев эвакуации S выбирается подмножество $S^m = (s_1, s_2, \dots, s_m) \subset S$, которое в совокупности с подмножеством ответов $W^m = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ будут формировать набор данных для обучения.

Этап 4. Обучение моделей.

По обучающей выборке $\{d_1(s_i), d_2(s_i), \dots, d_n(s_i), w_i\}_{i=1}^m$ строятся модели $M = \mu(S^m)$:

$$\begin{pmatrix} d_1(s_1) & \dots & d_n(s_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_1(s_m) & \dots & d_n(s_m) \end{pmatrix} \xrightarrow{f} \begin{pmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_m \end{pmatrix} \xrightarrow{\mu} M \quad (7)$$

В настоящем исследовании были использованы ML-модели, решающие задачу регрессии при оценивании количественных результатов эвакуации: линейная регрессия (Linear Regression Model, LRM), полиномиальная регрессия (Polynomial Regression Model, PRM), регрессия опорных векторов (Support Vector Regression, SVR), регрессия дерева решений (Decision Tree Regression, DTR), нейросеть (Neural Network, NN).

Этап 5. Оценка погрешностей моделей.

Модель M для новых сценариев $S^p = (s'_1, s'_2, \dots, s'_p) \in S$ выдает результаты $M(S^p)$:

$$\begin{pmatrix} d_1(s'_1) & \dots & d_n(s'_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_1(s'_p) & \dots & d_n(s'_p) \end{pmatrix} \xrightarrow{M} \begin{pmatrix} M(s'_1) \\ \dots \\ M(s'_p) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Производится оценка качества разработанных на предыдущем этапе моделей $Q(M(S^p), W^p)$, где Q – функционал качества ML-модели.

В качестве функционала качества моделей могут использоваться стандартные метрики для задач регрессии: средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическая ошибка (MSE), корень из среднеквадратической ошибки (RMSE), средняя процентная ошибка (MAPE).

Этап 6. Выбор наиболее точной модели для прогнозирования результатов эвакуации.

Критерием выбора модели для прогнозирования результатов эвакуации является минимизация функционала качества модели:

$$\mu(S^p) = \arg \min_{M \in M^\Sigma} Q(M(S^p), W^p), \quad (9)$$

где M^Σ – множество ML-моделей.

Этап 7. Прогнозирование результатов эвакуации людей при использовании выбранной ML-модели.

На основе предложенной методики была разработана программа «Система прогнозирования эффективности эвакуации из зданий с использованием нейронных сетей «Evoneural» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611075 от 19 января 2022 г.), которая предназначена для определения времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ, функциональная схема которой представлена на Рисунке 8.

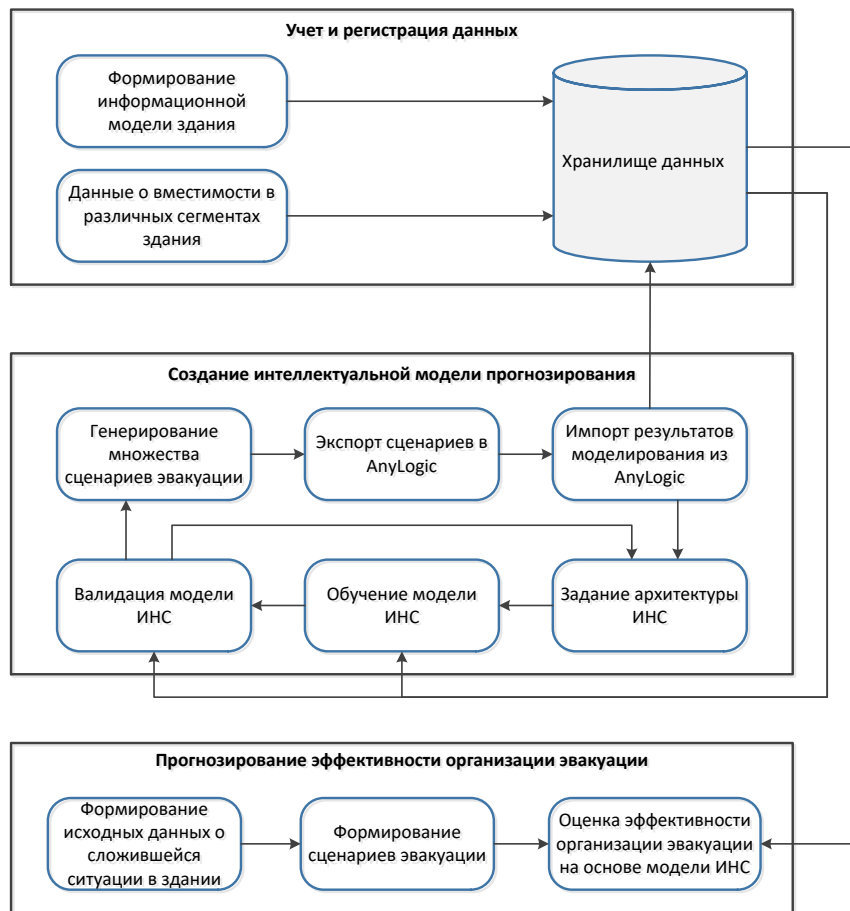


Рисунок 8 – Функциональная схема системы интеллектуального прогнозирования времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ

Предложена концептуальная схема системы интеллектуального управления эвакуацией, включающая в себя модуль интеллектуального прогнозирования эффективности организации эвакуации, реализованный в диссертации (Рисунок 9). Таким образом, определена роль и место разработанных авторских научно-методических средств в комплексной системе интеллектуального управления эвакуацией.

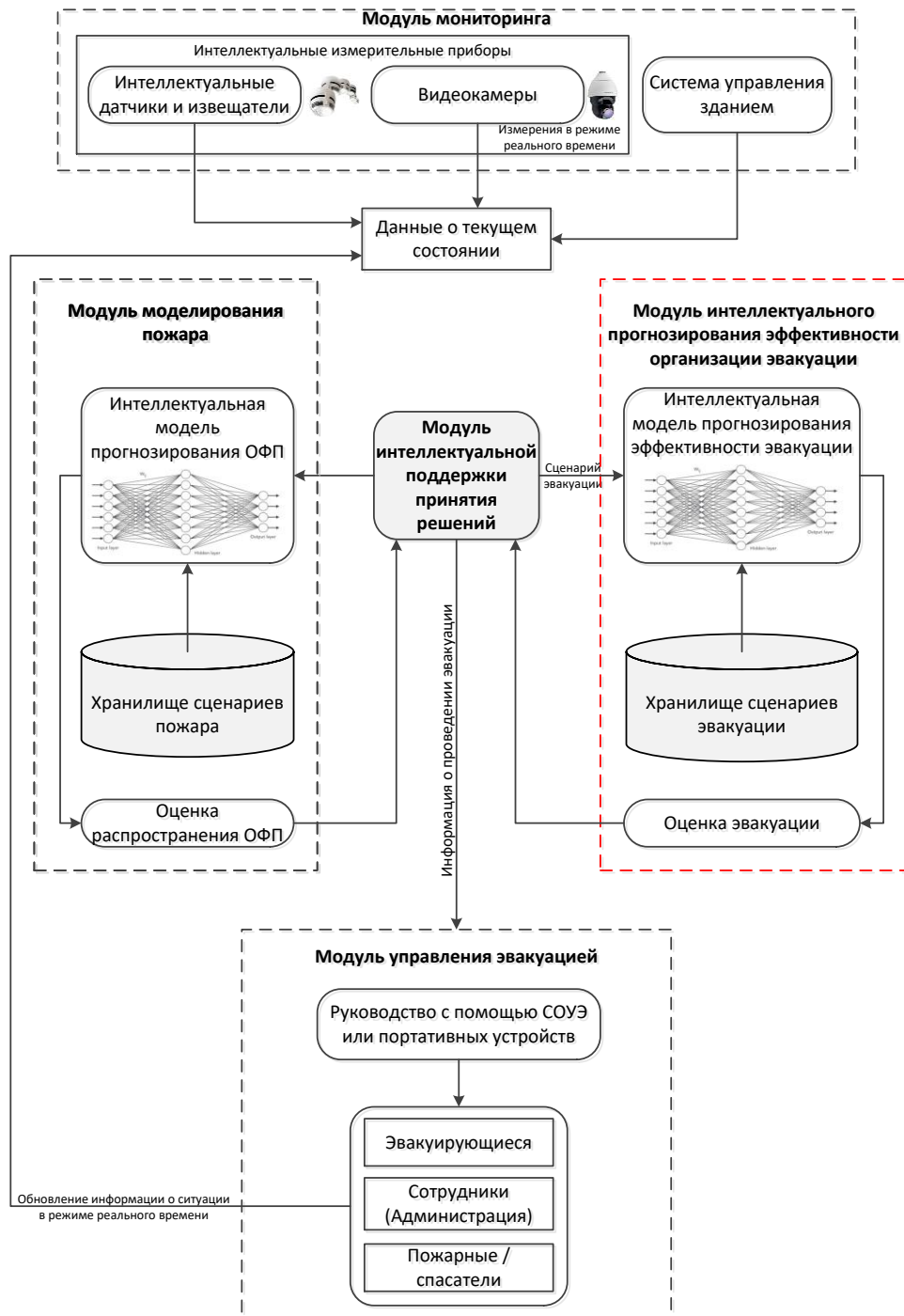


Рисунок 9 – Концептуальная схема системы интеллектуального управления эвакуацией

На основе использования стандартных метрик качества регрессии (MAE, MSE, RMSE, MAPE) была оценена точность результатов прогнозирования моделей машинного обучения (LRM, PRM, SVR, DTR, NN). Сравнительный анализ показал, что модель, построенная на основе нейронной сети (NN) обладает большей точностью и показывает наилучшие результаты по каждой из метрик (Таблица 3). В целом результат показывает, что применение модели на основе NN обладает практически такой же точностью, что и использование непосредственно ИМ при оценке того или иного сценария эвакуации (Рисунок 10).

Таблица 3 – Результаты расчета метрик качества ML-моделей

Модель	Метрика качества регрессии			
	MAE	MSE	RMSE	MAPE
LRM	0,337399	0,240225	0,490128	3,254 %
PRM	0,255806	0,193465	0,439847	2,58 %
SVR	0,102559	0,067892	0,260562	1,009 %
DTR	0,512295	0,412948	0,642610	5,02 %
NN	0,027356	0,003321	0,05763	0,372 %

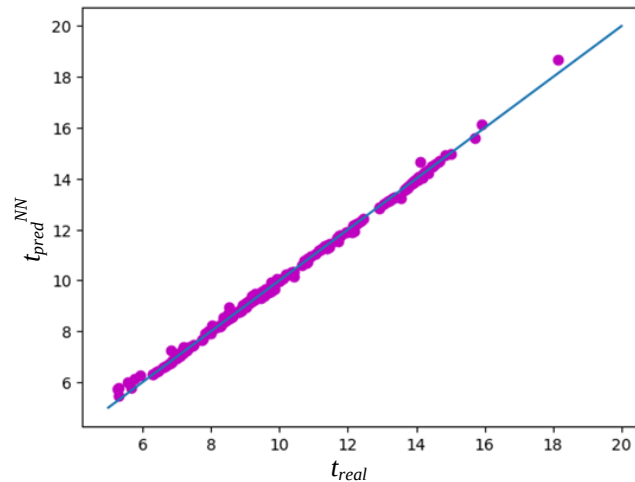


Рисунок 10 – Диаграмма рассеяния реальных и прогнозных значений для модели NN

Оценки качества применения разработанных в диссертации научно-методических средств проводилась в сравнении трех альтернативных вариантов к прогнозированию эффективности организации эвакуации в режиме реального времени на основе метода анализа иерархий по критериям точности, достоверности (обоснованности), оперативности.

Вариант 1. Экспертная оценка лицом, принимающим решения (ЛПР) в процессе организации эвакуации (вариант ЛПР).

Вариант 2. Оценка на основе применения имитационной модели, реализующей агентно-ориентированный подход, в составе системы интеллектуального управления эвакуацией (вариант ИМ).

Вариант 3. Оценка с использованием модуля интеллектуального прогнозирования эффективности эвакуации на основе разработанных научно-методических средств, в составе системы интеллектуального управления эвакуацией (вариант ML-модель).

Проведенный анализ показал, что применение разработанной методики интеллектуального прогнозирования времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ в условиях сложившейся ситуации позволяет в целом повысить качество прогнозирования, что подтверждает достижение цели диссертационного исследования (Рисунок 11).

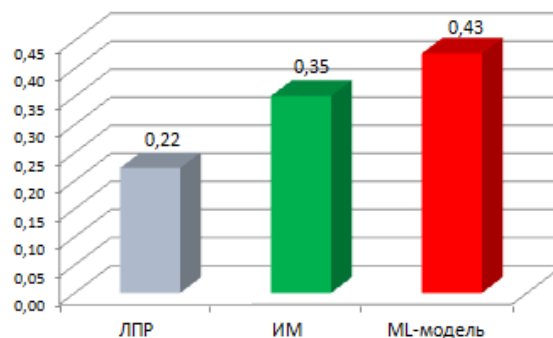


Рисунок 11 – Сравнительная оценка качества альтернативных вариантов прогнозирования эффективности организации эвакуации в режиме реального времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная **научная задача**, заключающаяся в разработке научно-методических средств оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий с учетом фактора паники в условиях динамически меняющейся ситуации.

Основные результаты проведенного исследования заключаются в следующем:

1. Проведено исследование процесса эвакуации людей при пожаре или ЧС в условиях паники. Построена системно-динамическая модель эвакуации из общественных зданий, заключающаяся в установлении существенной взаимосвязи между степенью распространения паники при пожаре и скоростью эвакуации из общественных зданий. Исследование модели позволило научно обосновать необходимость и возможность учета фактора распространения паники при моделировании процесса эвакуации людей.

2. Осуществлен синтез научно-методических средств оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий. Предложен метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественных зданий с использованием агентно-ориентированного подхода, который позволяет количественно оценивать время эвакуации людей из общественных зданий на примере ТРЦ в условиях распространения паники в социальной среде.

3. Разработана методика интеллектуального прогнозирования времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ, расширяющая границы применимости методов имитационного и нейросетевого моделирования в решении задачи организации эвакуации людей из общественных зданий. Данная методика позволяет решать задачу оперативного прогнозирования времени эвакуации в условиях динамически меняющейся ситуации при пожаре в общественных зданиях, а также рационального планирования путей эвакуации в темпе изменения обстановки при пожаре в общественном здании за счет повышения качества прогнозирования эффективности организации эвакуации.

4. Проведена оценка качества применения разработанных авторских научно-методических средств, которая показала, что результат применения модели прогнозирования на основе нейронной сети обладает практически такой же точностью, что и использование непосредственно ИМ при оценке того или иного сценария эвакуации. Предлагаемый в диссертации подход применения ML-моделей на основе данных, полученных из имитационных моделей, предлагает компромисс между точностью и оперативностью прогнозирования. Проведенный анализ показал, что применение разработанной методики интеллектуального прогнозирования времени эвакуации людей из общественных зданий типа ТРЦ в условиях сложившейся ситуации позволяет в целом повысить качество прогнозирования, что подтверждает достижение цели диссертационного исследования.

Предлагаемый в диссертации подход применения ML-моделей на основе данных, полученных из ИМ, предлагает компромисс между точностью и оперативностью прогнозирования. Результаты испытаний показали, что предлагаемый подход работает в 8–10 раз быстрее, чем существующее программное обеспечение и традиционные алгоритмы моделирования и поиска оптимального решения по выбору путей эвакуации.

Предложенные в работе научно-методические средства могут быть применены для различных общественных зданий в интересах научно обоснованных рекомендаций по обеспечению требуемого уровня индивидуального пожарного риска для их посетителей.

Перспективными направлениями дальнейшего развития результатов диссертационного исследования является применение разработанных научно-методических средств для решения задачи определения оптимальных планов эвакуации в условиях динамически меняющейся ситуации, а также их интегрирования в систему интеллектуального управления эвакуацией в режиме реального времени.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в базы Web of Science и Scopus:

1. Kotkova, E.A. Evaluation method for evacuation means use from high-rise building in fire case / E.A. Kotkova, A.V. Matveev, A.V. Maksimov // Contemporary Problems of Architecture and Construction: Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction (ICCPAC 2020), 25-26 November 2020, Saint Petersburg, Russia. – CRC Press, 2021. – P. 433. 0,7/0,3 п.л.

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

2. Коткова, Е.А. Метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественного здания при пожаре с использованием агентно-ориентированного подхода / Е.А. Коткова, А.В. Матвеев // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 8(104). – С. 231-243. 0,8/0,5 п.л.

3. Коткова, Е.А. Агентное моделирование процесса эвакуации людей при пожарах в зданиях: обзор подходов и исследований / Е.А. Коткова, А.В. Матвеев, С.А. Нефедьев, А.А. Таранцев // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 10. – С. 55-62. – DOI 10.17513/snt.39791. 1,0/0,4 п.л.

4. Коткова, Е.А. Системно-динамическая модель распространения паники при эвакуации из общественных зданий / Е.А. Коткова // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2022. – № 1. – С. 182-194. 0,9 п.л.

5. Коткова, Е.А. Методика интеллектуального прогнозирования эффективности управления эвакуацией людей из общественных зданий / Е.А. Коткова, А.В. Матвеев // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2021. – № 4. – С. 107-120. 1,2/0,7 п.л.

6. Коткова, Е.А. Модель оценки эффективности управления безопасностью людей в общественном здании при пожаре с использованием методов имитационного моделирования / Е.А. Коткова // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2021. – № 4. – С. 69-76. 0,7 п.л.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611075 Российская Федерация. Система прогнозирования эффективности эвакуации из зданий с использованием нейронных сетей "Evoneural" / Е.А. Коткова, А.В. Матвеев. – № 2022610416; заявл. 13.01.2022; опубл. 19.01.2022. – 1 с. 3,2/2,5 Мб.

В других изданиях:

8. Коткова, Е.А. Модель нейронной сети для прогнозирования предэвакуационного поведения людей при пожаре / Е.А. Коткова // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2022. – № 2(38). – С. 66-72. – DOI 10.37468/2307-1400-2022-2-66-72. 0,8 п.л.

9. Коткова, Е.А. Возможности агентного моделирования процесса эвакуации людей при пожаре / Е.А. Коткова // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26 апреля 2022 года. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – С. 55-56. 0,2 п.л.

10. Коткова, Е.А. Анализ пожаров в торгово-развлекательных центрах Российской Федерации / Е.А. Коткова, А.Н. Галичанин // Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности: материалы V Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23 марта 2022 года. – СПб: Санкт-Петербургский институт природопользования, промышленной безопасности и охраны окружающей среды, 2022. – С. 63-71. 0,6/0,3 п.л.

11. Коткова, Е.А. Анализ подходов к исследованию поведения людей при эвакуации в экстремальных ситуациях / Е.А. Коткова // Здоровье - основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2021. – Т. 16, № 4. – С. 1476-1479. 0,4 п.л.

12. Коткова, Е.А. Схема агентного моделирования эвакуации из общественных зданий / Е.А. Коткова // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 28 октября 2021 года. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2021. – С. 336-339. 0,2 п.л.

13. Коткова, Е.А. Архитектура сети Кохонена для решения задачи оценки времени эвакуации из здания с массовым пребыванием людей / Е.А. Коткова // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22 апреля 2021 года. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2021. – С. 186-188. 0,25 п.л.

14. Коткова, Е.А. Возможности агентного подхода при имитационном моделировании эвакуации людей во время пожаров в чрезвычайных ситуациях / Е.А. Коткова, А.Е. Куликов // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Научный и практический подходы к развитию и реализации технологий безопасности: материалы XVII Международной научно-практической конференции, Воронеж, 26 марта 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2021. – С. 533-536. 0,2/0,1 п.л.

15. Коткова, Е.А. Возможности иммерсивного моделирования эвакуации людей при пожаре / Е.А. Коткова, А.В. Матвеев // Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: материалы XI Международной научно-практической конференции, Москва, 15 октября 2020 года. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 214-219. 0,3/0,2 п.л.

16. Коткова, Е.А. Биомеханика и физиология движения: перспективы применения для моделирования эвакуации / Е.А. Коткова // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 30 ноября 2020 года. – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 75-79. 0,3 п.л.

17. Коткова, Е.А. Психофизиологические аспекты поведения людей при эвакуации в случае пожара / Е.А. Коткова, А.В. Матвеев // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России, Иваново, 15 октября 2020 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 379-381. 0,3/0,2 п.л.

18. Коткова, Е.А. Имитационное моделирование эвакуации при пожаре с использованием технологий виртуальной реальности / Е.А. Коткова, А.В. Матвеев // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 3–7 июня 2020 г. – Часть 1. – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2020. – С. 94-96. 0,2/0,1 п.л.

19. Коткова, Е. А. Методическая база в области защиты населения в ЧС, обеспечения безопасности людей / Е. А. Коткова // Школа молодых учёных и специалистов МЧС России: Материалы юбилейного X форума, Санкт-Петербург, 15 октября 2020 года. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России. – 2020. – С. 85-86. 0,15 п.л.

20. Коткова, Е.А. Возможности применения машинного обучения в исследовании поведения людей в процессе эвакуации / Е.А. Коткова, А.В. Матвеев // Пожарная безопасность объектов хозяйствования: материалы IX Международного научного семинара, Кокшетау, 22 мая 2020 г. – Кокшетау: Кокшетауский технический институт Комитета по ЧС МВД Республики Казахстан, 2020. – С. 41-43. 0,2/0,1 п.л.

21. Коткова, Е.А. Перспективы применения искусственных нейронных сетей при моделировании процесса эвакуации / Е.А. Коткова // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – № 1(5). – С. 359-361. 0,2 п.л.

22. Коткова, Е.А. Применение искусственных нейронных сетей для построения модели эвакуации на микроуровне / Е.А. Коткова // Безопасность человека и общества: совершенствование системы реагирования и управления защитой от чрезвычайных

ситуаций: материалы III Международной научно-практической конференции, Минск, 29 ноября 2019 года. – Минск: Университет гражданской защиты, 2019. – С. 146-148. 0,2 п.л.

23. Коткова, Е. А. Системный подход к оценке параметров сложных систем в сфере обеспечения безопасности при чрезвычайных ситуациях / Е. А. Коткова // Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности: материалы II Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14 марта 2019 года / Петровская академия наук и искусств. Том 2. – Санкт-Петербург: Петровская академия наук и искусств, 2019. – С. 26-30. 0,4 п.л.

Подписано в печать	18.07.2024	Формат 60×84 _{1/16}
Печать цифровая	Объем 1 п.л.	Тираж 100 экз.

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149