

*На правах рукописи*



**Вилисов Валерий Яковлевич**

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНФОРМАЦИОННО-  
АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ И СРЕДСТВ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОЖАРОВ  
И ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

2.3.4. Управление в организационных системах  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Научный консультант: заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
**Топольский Николай Григорьевич**

Официальные оппоненты: **Порошин Александр Алексеевич**  
доктор технических наук, ФГБУ ВНИИПО МЧС России,  
научно-исследовательский центр организационно-  
управленческих проблем пожарной безопасности, главный  
научный сотрудник

**Колодкин Владимир Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Удмуртский государственный университет», кафедра  
общинженерных дисциплин, профессор

**Сидорин Виктор Викторович**  
доктор технических наук, профессор, Автономная  
некоммерческая организация «Институт испытаний и  
сертификации вооружения и военной техники», Учебный  
центр, руководитель

Ведущая организация: ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт  
по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных  
ситуаций МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких  
технологий)

Защита состоится «23» марта 2022 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного  
совета 04.2.002.01 (Д 205.002.01) созданного на базе Академии ГПС МЧС России по адресу:  
129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:  
<https://academygps.ru/upload/iblock/625/62520ece08ab7ac0ac593159c8af7a72.pdf>

Автореферат разослан «22» декабря 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Хабибулин Р.Ш.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** исследования обусловлена приоритетными направлениями развития науки, техники и технологий в МЧС РФ, определенными на перспективу до 2030 года. К числу основных приоритетных направлений отнесены: совершенствование организации обеспечения безопасности, развитие автоматизированных систем поддержки принятия решений в РСЧС, развитие цифровых технологий, разработка и внедрение новых образцов аварийно-спасательной техники, оборудования, робототехники, беспилотных авиационных систем и технологий. Многие из этих направлений, в той или иной степени, нашли отражение в данном исследовании, что и обуславливает актуальность исследования.

В современных условиях сложность задач управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуациях (ЧС) лишь возрастает. Значимый вклад в эту тенденцию вносят такие факторы как: рост сложности технологических объектов территориальной и экономической инфраструктуры; рост площади и плотности застройки городских и сельских поселений; рост количества потенциально опасных факторов – причин техногенных аварий; появление новых материалов, придающих непредсказуемые свойства пожарной нагрузке; рост потока данных. Как следствие - растет информационная нагрузка на лиц, управляющих ликвидацией пожаров и ЧС, ужесточаются нормативные показатели ликвидации пожаров и ЧС.

Статистические данные о пожарах свидетельствуют о все еще высоком уровне ущерба, наносимого гражданам, предприятиям и экологии. Сравнение с другими странами показывает, что у МЧС РФ еще есть потенциал повышения эффективности реагирования при ликвидации пожаров и ЧС.

Развитие инфокоммуникационных технологий и методов математического моделирования открывает новые возможности для оперативных служб МЧС при ликвидации пожаров и ЧС, в частности, за счет повышения оперативности получения необходимой информации, высокой скорости обработки больших объемов данных (практически в реальном времени), построения гибких и информативных интерфейсов для систем поддержки принятия управленческих решений и др.

Анализ статистических данных показывает, что ресурсов системы реагирования МЧС оказывается недостаточно в случаях повышенной плотности вызовов, что приводит к снижению эффективности реагирования и, как следствие, к увеличению ущерба, наносимого пожарами. Это и другие свидетельства указывают на то, что в настоящее время в системе МЧС существует ряд противоречий, порождающих некоторые проблемы, в частности, следующие.

При острой потребности в максимально полной информации о текущем состоянии объекта ЧС в условиях острого дефицита времени у оперативных руководителей ликвидацией пожаров и ЧС в недостаточной степени используются последние достижения в области инфокоммуникационных

технологий, в частности, методы искусственного интеллекта, которые могли бы повысить эффективность систем поддержки принятия управленческих решений в РСЧС. Данные методы позволяют организовать более гибкое, адаптивное управление распределением сил и средств в зависимости от обстановки, отойдя от существующей практики детерминированного расписания выездов. Кроме того, современные методы машинного обучения, основанные на использовании искусственных нейронных сетей и других алгоритмов, позволяют накапливать позитивный опыт принятия решений, который мог бы быть использован в человеко-машинном режиме как в системах управления в РСЧС, так и при обучении персонала.

Традиционная система обеспечения новой, а также инновационной техникой и оборудованием, в силу ее высокой инерционности и централизации, не позволяет организовать быстрое внедрение в практику ликвидации пожаров и ЧС и управления этими процессами. Российская и общемировая практика внедрения новых образцов, технологий и методов управления, в частности, в промышленности, заключается, в том числе, в создании стартапов, как отдельных, очень мобильных структур, способных принять на себя многие риски и вывести на внедрение новые образцы техники и технологии. Роль подобных стартапов в сфере МЧС могли бы сыграть небольшие коммерческие структуры, взявшие на себя функции внедрения в практику ликвидации пожаров и ЧС новых образцов и технологий.

Многие проблемы отрасли МЧС имеют финансовые корни. И в большей части это обусловлено тем, что МЧС находится на полном государственном обеспечении. Это делает очень инерционной систему отклика на текущие вызовы времени и новые возможности. В то время как есть прежний российский опыт и опыт других стран диверсификации финансирования противопожарной службы, в частности, путем привлечения страховых механизмов.

Существующая на сегодня практика возмещения ущерба, нанесенного пожарами, и другими чрезвычайными ситуациями, только за государственный счет, ставит разные по уровню состоятельности слои населения в неравные условия и создает для государства дополнительное обременение - возмещение ущерба. Страховые технологии могли бы устранить часть противоречий и в этой сфере.

Одна из важных проблем современного состояния противопожарных служб состоит в недостаточно высоком уровне готовности пожарной техники и оборудования, но, с другой стороны, в экономической практике накоплен достаточно большой опыт и существуют широко применяемые в различных отраслях технологии финансового и операционного менеджмента, такие, например, как лизинг и аутсорсинг.

В настоящее время, как отмечалось на разных уровнях государственного управления, существует проблема укомплектованности штата пожарно-спасательных подразделений (далее - подразделений). В большой степени это обусловлено низким уровнем денежного довольствия сотрудников. Эта

проблема также могла бы быть снята, в той или иной степени полноты, на пути привлечения страховых технологий.

Еще одно направление, получившее развитие в отечественной и зарубежной практике в различных отраслях экономики, это управление рисками. Построение систем внутреннего контроля и мониторинга позволяет часто использовать принципы превентивного (проактивного) управления по возмущениям, в отличие от традиционного управления по отклонениям конечных показателей от нормативных значений. Поэтому технологии управления рисками дают возможность дополнительного повышения эффективности реагирования при ликвидации пожаров и ЧС.

Указанные противоречия в существующей системе управления ликвидацией пожаров и ЧС позволяют сформулировать следующую актуальную **научную проблему**: *развитие теоретических принципов, моделей, методов и алгоритмов информационно-аналитической поддержки принятия решений по распределению сил и средств при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций на основе применения машинообучаемых оптимизационных моделей, организационных инноваций и с учетом факторов риска.*

Тема исследования посвящена разработке конструктивных информационно-аналитических инструментов подготовки вариантов управленческих решений, максимально адекватных предпочтениям опытного лица, принимающего решения (ЛПР).

**Степень разработанности темы.** В трудах ряда отечественных и зарубежных ученых заложены теоретические и методические основы, послужившие базой для выполненных в данной работе исследований и полученных решений.

Среди них следует выделить работы в области планирования, оперативного и адаптивного управления, принятия решений и выбора вариантов в организационных и экономических системах таких авторов как В.З. Беленький, А.Н. Борисов, В.Н. Бурков, Ю.Б. Гермейер, В.М. Глушков, В.И. Данилин, Л.В. Канторович, Л.Г. Лабскер, О.И. Ларичев, Б.Г. Миркин, Н.Н. Моисеев, А.В. Назин, А.Б. Петровский, В.В. Подиновский, А.С. Позняк, Б.Т. Поляк, Г.С. Поспелов, В.В. Сидорин, Я.З. Цыпкин, Р. Акофф, С. Бир, М. Де Гроот, Л. Заде, Р. Кини, Дж. фон Нейман, Т. Оно, Г. Оуэн, Г. Райфа, У.Р. Эшби и другие.

Идеи представления знаний, обучения, моделирования поведения лиц, принимающих решения, и экспертного оценивания в человеко-машинных и робототехнических системах нашли свое развитие в работах таких ученых как А.Р. Бахтизин, А.В. Борщев, Н.П. Бусленко, К.В. Воронцов, Л.Г. Емельянов, А.А. Жданов, И.А. Каляев, Ю.Г. Карпов, Г.Б. Клейнер, В.Л. Макаров, Б.З. Мильнер, В.Е. Павловский, Д.А. Поспелов, А.С. Ющенко, Р. Буш, Д. Канеман, М. Месарович, Д. Джарротано, У. Моррис, Ф. Мостеллер, К. Нейлор, П. Норвиг, С. Рассел, Ф. Розенблатт, Т. Саати, Г. Саймон, Дж. Форрестер и другие.

Важные инструментальные средства, способствовавшие решению рассматриваемых в данном исследовании проблемы, в области таких

статистических направлений как оценивание, идентификация, эконометрика, представление риска и планирование эксперимента развиты в трудах таких ученых как С.А. Айвазян, Е.С. Вентцель, Л.В. Колосов, Г.К. Круг, Ю.П. Лукашин, В.В. Налимов, А.И. Орлов, В.В. Федоров, М. Аоки, Р. Калман, Р. Ли, Дж. Медич, Ф. Найт, Дж. Себер, Э. Сейдж, Д. Тьюки, Д. Химмельблау и другие.

Большой вклад в развитие прикладных аспектов использования математического инструментария в области моделирования, управления силами и средствами при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций внесли такие ученые как Н.Н. Брушлинский, С.Ю. Бутузов, А.Н. Денисов, В.М. Климовцов, В.М. Колодкин, Ю.И. Коломиец, В.Б. Коробко, В.А. Ловчиков, А.В. Матюшин, Е.А. Мешалкин, В.А. Минаев, А.А. Порошин, Ю.В. Прус, В.А. Седнев В.Л. Семиков, С.В. Соколов, Д.В. Тараканов, А.А. Таранцев, Н.Г. Топольский, С.Г. Цариченко, А.Л. Холостов и другие. На полученных ими результатах во многом основано и настоящее исследование.

Несмотря на значительный объем научных исследований, выполненных в области поддержки принятия решений в различных сферах экономики, техники, в том числе, при обеспечении пожарной безопасности, все еще не сформирована целостная система научного знания в области построения эффективных механизмов принятия управленческих решений в информационной среде современных систем управления ликвидацией пожаров и ЧС.

Отличительной особенностью данного исследования является то, что модели, методы и алгоритмы принятия решений основываются на опыте лиц, принимающих решения, при управлении ликвидацией пожаров и ЧС, что позволяет строить адаптивные схемы управления, обеспечивающие согласованное взаимодействие быстропротекающих при пожарах и ЧС процессов с ограниченной и низкой пропускной способностью лиц, управляющих их ликвидацией.

Важными особенностями работы является и то, что, в отличие от традиционных, предложены подходы и методы риск-ориентированного управления процессами ликвидации пожаров и ЧС, страховые технологии возмещения ущерба и материально-технического обеспечения пожарно-спасательных подразделений в сочетании с механизмами лизинга и аутсорсинга, а также алгоритмы, модели и методы использования робототехнических систем (РТС) для обеспечения пожарной безопасности.

**Объектом исследования** является деятельность пожарно-спасательных подразделений при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций.

**Предметом исследования** являются модели, методы и алгоритмы информационно-аналитической поддержки принятия решений при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций.

**Цель исследования** – разработка моделей, методов и алгоритмов для повышения эффективности поддержки принятия решений по распределению сил и средств при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций, на основе

применения машинообучаемых оптимизационных моделей, организационных инноваций и с учетом факторов риска.

В соответствии с целью исследования в работе поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Анализ особенностей, противоречий и организационно-технических проблем информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений в информационной среде систем управления и организации в МЧС России.

2. Анализ математических моделей принятия управленческих решений, наиболее адекватных горизонту оперативного управления силами и средствами при ликвидации пожаров и ЧС.

3. Разработка принципов и методических основ эффективного согласованного человеко-машинного принятия решений при ликвидации пожаров и ЧС.

4. Развитие моделей, методов и алгоритмов выявления и представления реальных критериев ЛПР в повторяющихся процедурах формирования управленческих решений при ликвидации пожаров и ЧС.

5. Анализ подходов и методов эффективного применения автономных мобильных роботов и их групп для мониторинга и ликвидации последствий пожаров и ЧС на основе использования машинообучаемых моделей.

6. Формализация влияния степени риска в решениях ЛПР и его персональных характеристик на качество выбора управленческих решений и разработка методов их учета в практике принятия решений при ликвидации пожаров и ЧС.

7. Моделирование и апробация разработанных концепций, методов, моделей и алгоритмов для информационно-аналитической поддержки принятия решений при ликвидации пожаров и ЧС.

8. Анализ и оценивание возможности применения технологий страхования для возмещения ущерба от пожаров и материально-технического обеспечения пожарно-спасательных подразделений.

**Методологической основой исследования** являются принципы и подходы теории систем, системного анализа, исследования операций, теории принятия решений, заложенные в работах отечественных и зарубежных ученых.

**Методы исследования**, используемые в работе, включают такие направления прикладной математики как: теория сложных систем, системный анализ, аналитическое и имитационное моделирование, математическое программирование, скалярная и векторная оптимизация, теория множеств, управляемые марковские цепи, теория игр и статистических решений, теория случайных процессов, стохастическое и экспертное оценивание, планирование эксперимента, адаптивное управление и самообучение, экспертные системы, принятие решений в условиях риска и неопределенности, теория информации, человеко-машинные системы поддержки принятия решений.

Представленная в работе научно-техническая проблема и ее решение относятся к области исследований, выполняемых в рамках научной специальности 2.3.4. – Управление в организационных системах, отвечают требованиям формулы этой специальности, поскольку решение проблемы направлено на разработку новых и совершенствование существующих методов, моделей и алгоритмов поддержки принятия решений руководителями пожарно-спасательных подразделений при тушении пожаров на объектах экономики и социальной инфраструктуры в целях повышения безопасности их функционирования.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые предложена, разработана и всесторонне исследована системная совокупность инструментов повышения эффективности функционирования пожарно-спасательных подразделений, в частности:

1. Разработана методология построения моделей принятия решений при ликвидации пожаров и ЧС, в отличие от традиционных, основанная на использовании машинообучаемых моделей исследования операций (транспортного типа, марковских, игровых), обеспечивающих согласованное двухконтурное управление в человеко-машинном режиме, учитывающих системный характер управления организационно-техническими системами, высокую динамику протекающих процессов и аккумулирующих в своих структурах и параметрах опыт лиц, принимающих решения.

2. Разработаны методы и алгоритмы, обеспечивающие эффективную настройку (идентификацию) параметров моделей, адаптирующихся к целевым предпочтениям лиц, принимающих решения, которые, в отличие от традиционной «ручной» априорной технологии, состоят в автоматической настройке параметров моделей на основе текущих наблюдений за решениями ЛПР, что обеспечивает снятие априорной и текущей неопределенностей в условиях нестационарности среды и предпочтений ЛПР.

3. Разработан подход, модели и алгоритмы машинного обучения мультиагентных робототехнических систем, предназначенных для мониторинга и ликвидации последствий пожаров и ЧС, в отличие от традиционных, учитывающие опыт управления операторами и необходимость длительной эффективной автономной работы роботов.

4. Разработана совокупность инструментов для мониторинга готовности к выполнению боевых задач подразделениями пожарной охраны на разных уровнях иерархии управления, основанных на риск-ориентированной технологии внутреннего контроля, позволяющий, с учетом многокритериальности и динамики состояния, в отличие от традиционных подходов, получать более объективные текущие оценки готовности, обеспечивающие более обоснованный выбор управленческих решений.

5. Разработаны модели и варианты модификации организационной структуры ликвидации пожаров и ЧС, включающие страховые, лизинговые и аутсорсинговые элементы, позволяющие, в отличие от традиционных структур,



обеспечить более гибкое, динамичное и эффективное реагирование пожарных служб на вызовы.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** *Теоретическая значимость* работы заключается в развитии методологии информационно-аналитической поддержки принятия решений при ликвидации пожаров и ЧС на основе применения машинообучаемых моделей, построенных с привлечением опыта принятия решений ЛПР в аналогичных ситуациях в прошлом. Предложенный в работе подход позволяет обеспечить эффективное сопряжение, в рамках двухконтурной схемы, быстропротекающих процессов развития обстановки на пожаре или в ЧС с более медленными циклами анализа ситуации и выбора ЛПР наилучшего варианта решения на основе построения моделей, адекватных предпочтениям опытных ЛПР.

Комплекс исследований, выполненных в работе, соответствует основным директивным документам последнего времени, в частности, Указу Президента РФ № 2 от 01.01.2018 г. «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года», а также ряду пунктов перечня критических технологий и приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ.

*Практическая значимость* работы состоит в том, что предложены алгоритмы и процедуры, позволяющие решить ряд задач, актуальных для управления ликвидацией пожаров и ЧС, в частности:

- распределение СиС по одновременным вызовам;
- назначение оптимального ранга пожара;
- оценивание склонности ЛПР к риску;
- машинное обучение автономных роботов планированию операций;
- мониторинг готовности к выполнению боевых задач подразделений пожарной охраны на разных уровнях иерархии управления;
- оценивание потенциала увеличения эффективности управления силами и средствами;
- оценивание объема страхового возмещения ущерба от пожаров и величины страховой нагрузки на страхователей.

Апробация предложенных в работе подходов, методов, моделей и алгоритмов была выполнена на разнообразных исходных данных в рамках учебного процесса в Технологическом университете (МГОТУ) и в Академии ГПС МЧС России в таких дисциплинах бакалаврских, магистерских и аспирантских программ как «Методы оптимальных решений», «Методы, алгоритмы и системы интеллектуальной поддержки принятия решений», «Исследование операций», «Встраиваемые системы управления», «Методы скалярной и векторной оптимизации», «Экспертные системы», «Информационные системы поддержки принятия решений», «Управление силами и средствами на пожаре» и др. Методы и алгоритмы оценивания готовности подразделений, на основе применения разработанной технологии внутреннего контроля в иерархических организационных структурах, были

апробированы на уровне министерств в рамках НИР (госконтракты от 03.04.2012 г. № 02.169.11.0001 и от 22.04.2013 г. № 04.N20.11.0002).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Машинообучаемая модель распределения сил и средств при одновременных вызовах на пожары, построенная на основе транспортной задачи (ТЗ), в форме рекуррентной процедуры с применением методов экспертного оценивания и оптимального планирования эксперимента. ТЗ сводится к задаче линейного программирования и решается с помощью предложенного метода игровых итераций. Обучение модели производится на основе опыта принятия решений ЛПР.

2. Модель динамики стадий развития и тушения пожара в форме марковской цепи, позволяющей по информации о текущем состоянии оценить временные характеристики завершения как отдельных оставшихся стадий, так и ликвидации пожара в целом.

3. Алгоритм назначения оптимального ранга пожара, построенный на основе марковской цепи и байесовского оценивания ущерба с учетом построенных регрессионных зависимостей ущерба от продолжительности пожара.

4. Машинообучаемая, по опыту ЛПР, управляемая марковская цепь, позволяющая построить оптимальную стратегию выбора ранга пожара, с использованием экспертных процедур.

5. Машинообучаемая игровая модель принятия решений при эвакуации людей из горящего здания, где обучение модели выполняется на основе разработанного рекуррентного алгоритма оценивания элементов платежной матрицы игры.

6. Алгоритм оценивания склонности ЛПР к риску, позволяющий по наблюдениям за опытными ЛПР оценить допустимые уровни риска при принятии управленческих решений. Алгоритм позволяет оценивать уровень склонности к риску в режиме учений для всех ЛПР, что дает возможность контролировать уровень подготовки персонала.

7. Алгоритм мониторинга готовности к выполнению боевых задач подразделений пожарной охраны на разных уровнях иерархии управления на основе риск-ориентированных технологий внутреннего контроля, позволяющий получать более объективные текущие оценки готовности, что обеспечивает более обоснованный выбор управленческих решений.

8. Оценки потенциала повышения эффективности реагирования за счет снижения ущерба на основе применения машинообучаемых моделей, риск-ориентированного подхода и регрессионных зависимостей видов ущерба от временных характеристик реагирования.

9. Модель страхового возмещения ущерба от пожаров, учитывающая существующие нормативы и степень платежеспособности различных слоев населения РФ.

10. Варианты организационной структуры системы ликвидации пожаров и ЧС, включающие элементы страховой, лизинговой и аутсорсинговой

составляющих для обеспечения более гибкого, динамичного и эффективного реагирования пожарных служб на вызовы.

11. Машинообучаемая модель линейного программирования для планирования операций в группе автономных мобильных роботов, используемых для ликвидации последствий пожаров и ЧС.

12. Алгоритм концептуального проектирования мультиагентных систем мониторинга пожароопасного района на основе использования имитационного моделирования работы беспилотных летательных аппаратов с высокой степенью автономности.

**Степень достоверности результатов** исследования обеспечена применением многократно апробированных на практике подходов, методов и инструментальных средств, использованием для анализа официально опубликованных статистических данных о параметрах и показателях пожаров, о характеристиках используемой пожарной техники и оборудования, о структуре, составе, функциональных обязанностях пожарно-спасательных подразделений МЧС РФ, официально опубликованных нормативных актов о пожарной безопасности, соответствием полученных теоретических результатов модельным расчетам и эмпирическим данным.

**Апробация результатов.** Теоретические и практические результаты работы были представлены, докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на всероссийских и международных научных конференциях: III международная научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения безопасности» (Безопасность – 2021), Уфа, 2021 г.; XV международная научно-практическая конференция «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы», Минск, 2021 г.; VII международная научно-практическая конференция «Технологии ликвидации чрезвычайных ситуаций»; III всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», Железногорск, 2021 г.; международные научно-практические конференции по проблемам экологии и безопасности «Дальневосточная весна – 2021» и «Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности», Комсомольск-на-Амуре, 2021 г.; IV международная научно-практическая конференция «Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности», Санкт-Петербург, 2021 г.; XXV международная научно-техническая конференция «Системы безопасности» СБ-2016, Москва, 2016 г.; X международная научно-техническая конференция «Проблемы техносферной безопасности», Москва, 2021 г.; международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, 2013-2021 гг.; международные конференции «Управление развитием крупномасштабных систем», Москва, 2017-2019 гг. и «Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины», Курск, 2015-2016 гг. Материалы исследования обсуждались на научных семинарах УНК АСИТ Академии ГПС МЧС России, Москва, 2018 г., 2021 г.

Теоретические положения, модели и методы, разработанные автором, обсуждались на научных семинарах в ведущих институтах Российской академии наук: в лаборатории академика Я.З. Цыпкина в ИПУ РАН; в лаборатории академика О.И. Ларичева в ИСА РАН; на научных семинарах чл.-корр. Г.Б. Клейнера в ЦЭМИ РАН.

**Публикации.** Основные идеи и результаты исследования опубликованы в 67 работах, в том числе 22 в изданиях, рекомендованных ВАК, выполненных автором самостоятельно и в соавторстве, в 4 монографиях, 7 программах и программных комплексах для ЭВМ, зарегистрированных в Роспатенте и реализующих часть из предложенных алгоритмов. Общий объем авторских публикаций составляет более 60 п.л.

**Личный вклад автора.** Все результаты, выносимые на защиту получены автором лично, из публикаций, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены, в качестве личного вклада, только те результаты, которые принадлежат автору, на другие даны необходимые ссылки.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов по главам, заключения, списка литературы, содержащего 497 наименований, и приложения на 35 страницах. Работа изложена на 433 страницах, включая 58 таблиц и 122 рисунка.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования и разработок, сформулированы цель и задачи, определены объект, предмет исследования и основная решаемая научная проблема, приведены теоретические и методологические основы исследования, выделены основные элементы новизны, представлены новые научные результаты, теоретическая и практическая значимость, свидетельства апробации и количественные показатели объема работы.

**В главе 1 «Методы и технологии поддержки принятия решений при управлении силами и средствами в чрезвычайных ситуациях»** проведен анализ подходов, технологий, методов и моделей управления силами и средствами (СиС) на различных уровнях иерархии управления в Единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), и в частности, в Государственной противопожарной службе (ГПС).

В РСЧС и ГПС, как и во многих других иерархически организованных системах управления сложными объектами, чем ниже уровень иерархии управления, тем выше динамика протекающих процессов и принимаемых решений. Фактор времени играет существенную роль в процессах управления на нижнем уровне. Поэтому актуальной является задача обеспечения высокой эффективности реагирования на возникающие чрезвычайные ситуации (ЧС) в условиях острого дефицита времени.

Эффективность функционирования РСЧС характеризуется множеством показателей, основные из которых отражают величину ущерба, причиненного пожарами и другими ЧС. Важной их частью является количество погибших

( $R_2$ ) и травмированных ( $Q_2$ ) людей, а также величина прямого материального ущерба ( $u$ ). Эти показатели приняты в работе в качестве меры эффективности тех или иных мероприятий и/или принимаемых решений на разных уровнях управления.

Материал данной главы представлен двумя частями. В первой части выполнен анализ существующих в практике управления СиС в МЧС методов, моделей и алгоритмов оперативного управления на нижних уровнях иерархии управления, а также методы, модели и подходы, существующие в других сферах. Под *оперативным управлением* имеется в виду временной горизонт, измеряемый минутами (от долей до десятков). Предложены принципы адаптивного управления на основе машинного обучения моделей принятия решений путем решения обратных задач (традиционно в теории управления относящиеся к задачам идентификации).

Во второй части главы приведены результаты статистического анализа официальной статистики о пожарах, представленные в виде регрессионных моделей, отражающих взаимосвязи параметров и показателей процесса ликвидации пожара. Эти модели являются основой для анализа и исследования эффективности моделей и алгоритмов управления ликвидацией пожаров и ЧС, предлагаемых в следующих главах.

В последнее время, в связи с бурным развитием информационно-коммуникационных и программно-технических средств, а также комплектованием современными гаджетами не только рабочих мест ЛПР всех уровней управления РСЧС, но и исполнителей различных пожарных специальностей, информационные потоки в автоматизированной информационно-управляющей системе (АИУС) существенно возросли. Эти обстоятельства, с одной стороны, создают потенциал для принятия более обоснованных решений, а с другой стороны, в условиях острого дефицита времени и ограниченных возможностей человека по восприятию поступающего потока данных, не позволяют эффективно воспринимать неструктурированную информацию. Это приводит к нарушению одного из важных принципов автоматизации (выдвинутого В.М. Глушковым) - *пропускная способность ЛПР должна соответствовать* (быть сопряжена, согласована) *интенсивности поступающих данных, иначе система будет функционировать неэффективно*. Сопряженность должна быть предметом постоянного мониторинга, а в случае ее нарушения, должны меняться либо характеристики потока, либо характеристики человека, как «прибора», обрабатывающего этот поток.

На рисунке 1 приведен фрагмент иерархической структуры элементов поддержки ликвидации пожаров и ЧС, призванных повысить эффективность ликвидации. Тонированные модули отражают те *инновационные* элементы, которые послужили предметом разработки или анализа в работе. Модели, используемые для решения этих групп задач, традиционно относятся к «Исследованию операций» и развиваются в различных прикладных сферах в *прямой постановке* (*прямые задачи выбора решений*). Традиционная технология использования этих моделей предполагает, что имеется объект

анализа и цель исследования, в соответствии с которой аналитик (*не ЛПР*) выбирает целевой показатель (как правило, один) и строит целевую (платежную) функцию, связывающую целевой показатель с варьируемыми переменными.



Рисунок 1 - Инновационные элементы организации поддержки ликвидации пожаров и ЧС

Параметры целевой функции (ЦФ) задаются аналитиками из некоторых субъективных соображений. А затем решается задача поиска (выбора) таких значений переменных, которые доставили бы максимум или минимум целевой функции. Полученное решение является оптимальным *с точностью до структуры и параметров целевой функции*, заданных аналитиком. А поэтому подобная технология выбора решений очень часто оказывается нежизнеспособной, как и многие схемы управления без обратной связи. Такие модели принято называть *нормативными*.

Адаптация моделей к опыту ЛПР предложена в работе как один из вариантов обратной связи, обеспечивающей повышение адекватности моделей принятия решений, используемых в процедурах управления ликвидацией пожаров и ЧС. Это позволяет в ЦФ использовать параметры, выявленные по решениям ЛПР, несущего, в отличие от аналитика, ответственность за принятые и реализованные решения. Определение параметров ЦФ представляет собой *обратную задачу* принятия решений, замыкающую обратную связь, обеспечивающую адаптивность и текущую адекватность модели. Использование обратной задачи, как механизма машинного обучения параметров модели, реализует одну из адаптивных технологий принятия решений (рисунок 2а), различные аспекты которой разработаны и исследованы в данной работе.

Обученные модели могут использоваться в дальнейшем управлении. Основной режим приведен на рисунке 2б, где выделены два контура:

- контур 1 - управление объектом, в котором управляющее воздействие (решение) поступает на объект от модели через ЛПР;

- контур 2 - настройка (машинное обучение) параметров модели по возникавшим ситуациям, требующим принятия решений (СТПР) и соответствующим им решениям, принятым ЛПР.

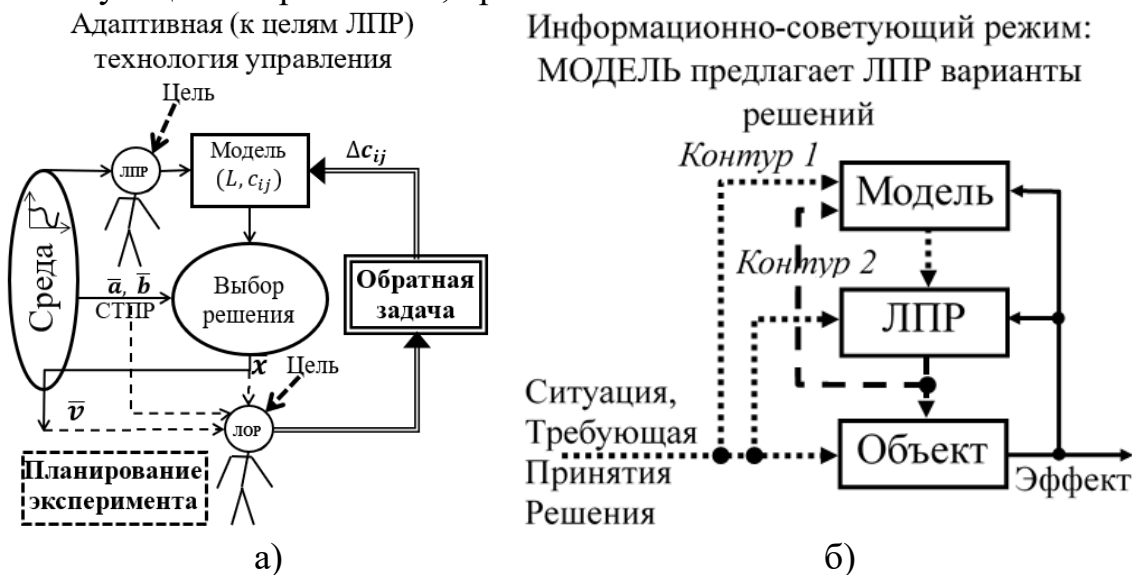


Рисунок 2 - Управление на основе применения адаптивных (машинообучаемых) моделей ИО

В информационно-советующем режиме модель непосредственно не управляет объектом, а варианты решений передаются ЛПР для того, чтобы он их принял или отклонил. Возможен и автоматический режим управления в тех случаях, когда у ЛПР нет сомнений в полной адекватности модели его предпочтениям, тогда решение от модели поступает непосредственно на объект.

Во второй части первой главы выполнен статистический анализ данных о пожарах, который показал, что весь массив данных является неоднородным по времени (нестационарным). При этом использовались показатели времени фаз ликвидации пожаров ( $\tau_{\text{сообщ}}$ ,  $\tau_{\text{приб}}$ ,  $\tau_{1 \text{ ств}}$ ,  $\tau_{\text{лок}}$ ,  $\tau_{\text{лик.откр}}$ ,  $\tau_{\text{лик.посл}}$ ) и показатели ущерба ( $u_d$ ,  $R_2$ ,  $Q_2$ ). Анализ позволил выявить два кластера. Поэтому в дальнейших исследованиях рассматривались лишь данные за 2011-2017 гг.

Выполнен регрессионный анализ зависимости показателей ущерба от временных характеристик реагирования (таблица 1). Построенные уравнения парной регрессии имеют следующий вид:

$$L^{\text{гр.дан}}(\tau_i) = c_0^{\text{гр.дан.}} + c_1^{\text{гр.дан.}} \tau_i^{\text{гр.дан.}}, \quad (1)$$

где: верхний индекс отражает принадлежность к группе данных (все, город, село);  $\tau_i$  -  $i$ -й показатель, отражающий время реагирования подразделений ( $\tau_{\text{сообщ}}$ ,  $\tau_{\text{приб}}$ ,  $\tau_{1 \text{ ств}}$ ,  $\tau_{\text{лок}}$ ,  $\tau_{\text{лик.откр}}$ ,  $\tau_{\text{лик.посл}}$ );  $c_j$  -  $j$ -й коэффициент уравнения парной регрессии,  $j \in \{0; 1\}$ .

**В главе 2 «Машинообучаемые модели, алгоритмы и методы распределения ресурсов при управлении ликвидацией пожаров» разработаны адаптивные (машинообучаемые) модели распределения СиС при одновременных вызовах, построенные на основе транспортной задачи (ТЗ) и**

учитывающие опыт принятия решений ЛПР. Статистический анализ данных за прошлые годы показал, что с ростом количества пожаров растут и все виды ущерба. Одной из причин этого может быть снижение эффективности реагирования пожарно-спасательных подразделений при одновременных вызовах в связи с ограниченностью ресурсов (СиС) и принятым в настоящее время детерминированным графиком выездов.

Таблица 1 - Коэффициенты и показатели уравнений парной регрессии (фрагмент из 54 уравнений, для которых  $R^2 \geq 0,7$ )

№ п/п	Группа данных	Функция взаимосвязи	Коэффициенты уравнений парной регрессии		Коэффициент детерминации, $R^2$	Значимость уравнения по $F$ -критерию
			$c_0$	$c_1$		
7	Все	$R_2(\tau_{\text{сообщ}})$	4,811	0,782	0,848	0,003245
9		$R_2(\tau_{1\text{ ств}})$	0,318	5,322	0,743	0,012629
10		$R_2(\tau_{\text{лок}})$	4,352	0,284	0,881	0,001749
11		$R_2(\tau_{\text{лик,откр}})$	3,772	0,283	0,872	0,002096
12		$R_2(\tau_{\text{лик,посл}})$	13,315	-0,210	0,865	0,002390
25	Город	$R_2(\tau_{\text{сообщ}})$	3,734	0,899	0,895	0,001258
26		$R_2(\tau_{\text{приб}})$	-3,992	1,506	0,808	0,005937
27		$R_2(\tau_{1\text{ ств}})$	0,760	3,898	0,784	0,008039
28		$R_2(\tau_{\text{лок}})$	3,664	0,251	0,894	0,001290
29		$R_2(\tau_{\text{лик,откр}})$	3,225	0,294	0,913	0,000793
30		$R_2(\tau_{\text{лик,посл}})$	10,284	-0,221	0,701	0,018687
43	Село	$R_2(\tau_{\text{сообщ}})$	6,241	0,755	0,833	0,004103
46		$R_2(\tau_{\text{лок}})$	5,426	0,346	0,870	0,002164
47		$R_2(\tau_{\text{лик,откр}})$	5,130	0,264	0,854	0,002934

В зависимости от продолжительности пожаров, количество одновременных пожаров может варьироваться (рисунок 3 - для средней продолжительности 0,68 час, и маловероятной (0,01) продолжительности в 1,48 час).

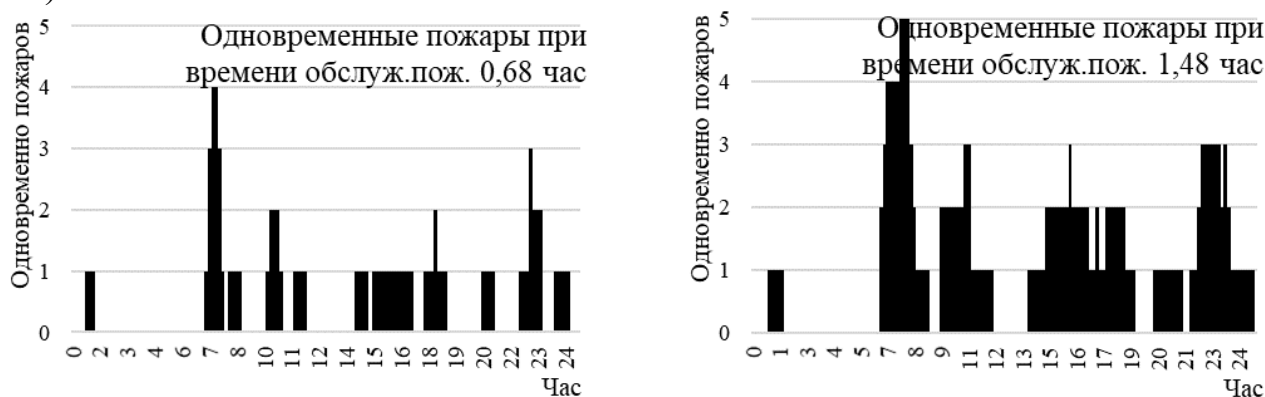


Рисунок 3 - Временная диаграмма кратности пожаров

Для повышения эффективности управления ликвидацией пожаров разработаны адаптивные оптимизационные модели математического



программирования, в частности, *машинообучаемая транспортная задача* (ТЗ), позволяющая ввести гибкий график выездов подразделений. Такая модель позволяет учесть позитивный опыт принятия решений ЛПР в прошлом.

В существующей практике использования оптимизационных моделей (в том числе ТЗ), в рамках традиционной нормативной парадигмы, практически всегда возникает *априорная неопределенность*, обусловленная необходимостью задать, адекватные реальным предпочтениям ЛПР, значения коэффициентов  $c_{ij}$  целевой (платежной) функции:  $L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$ . Здесь:  $L$  - целевой показатель, отражающий совокупные издержки, потери или эффекты;  $m$  - количество пожарно-спасательных частей (ПСЧ), ресурсы которых распределяются;  $n$  - количество одновременных вызовов;  $X = \|x_{ij}\|_{mn}$  - матрица искомым переменных задачи, где  $x_{ij}$  - количество единиц однородного ресурса (автоцистерна, автонасос, и др.), направляемого из  $i$ -ой ПСЧ на  $j$ -й вызов;  $C = \|c_{ij}\|_{mn}$  - матрица обобщенных издержек или эффектов (обычно называемых транспортными), где  $c_{ij}$  - издержки/эффекты связанные с передачей  $x_{ij}$  единиц ресурса из  $i$ -ой ПСЧ на  $j$ -й вызов.

Ситуация, требующая принятия решений (СТПР), определяется значениями *вектора запасов* (единиц имеющегося ресурса в каждой из  $m$  ПСЧ)  $\bar{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_m]^T$  и *вектора заказов* (единиц потребности в ресурсе для каждого из  $n$  вызовов)  $\bar{b} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T$ . Для ПСЧ и вызовов должны выполняться условия баланса:  $\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i$ ;  $\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j$ . *Критерий оптимальности* плана распределения заключается в минимизации суммы совокупных потерь для плана  $X$  распределения однородного ресурса.

Результатом решения *прямой ТЗ* является оптимальное распределение имеющихся ресурсов ПСЧ  $\bar{a}$  по вызовам, в необходимых им объемах  $\bar{b}$ . Прямая ТЗ в виде черного ящика приведена на рисунке 4, там же и *обратная ТЗ*.

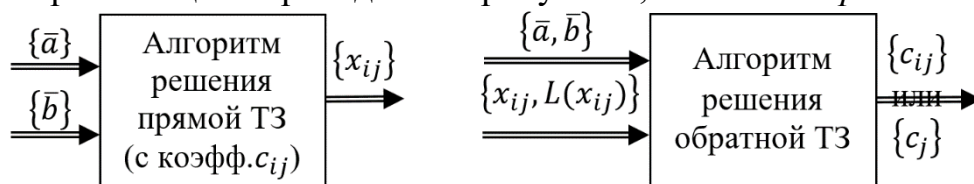


Рисунок 4 - Входные и выходные параметры прямой и обратной ТЗ

Целью решения *обратной ТЗ* является оценивание значений коэффициентов скалярной целевой функции  $c_{ij}$  (или  $c_j$  в одноиндексной форме - при сведении ТЗ к задаче линейного программирования - ЗЛП), по наблюдениям, в состав которых входят векторы СТПР ( $\bar{a}$  и  $\bar{b}$ ) и решения  $x_{ij}$ , принятые опытными ЛПР в каждой СТПР.

Для машинного обучения ТЗ она сводится к *ЗЛП на максимум*, в которой все ограничения представлены неравенствами типа ( $\leq$ ). Преобразование ТЗ в ЗЛП и обратно позволяет использовать для распределения ресурсов ПСЧ методы решения ЗЛП. В работе разработан и апробирован *метод игровых итераций*, обеспечивающий быстрый поиск решения ЗЛП, что очень важно для

систем поддержки принятия решений (СППР) в условиях острого дефицита времени.

Для решения обратной ТЗ предложена концепция спектров, отражающих расположение гиперплоскостей ограничений ЗЛП, при этом полигон является специально сконструированной областью допустимых решений (ОДР) задачи, позволяющей осуществлять мониторинг процесса сходимости оценок ЦФ ТЗ в процессе машинного обучения. Для ТЗ размерности  $2 \times 3$  (две ПСЧ и три вызова) спектр задачи, семейство *нормальных* (к гиперплоскостям ограничений) *векторов единичной длины* (НВЕД), вместе с *НВЕД целевой функции*, а также *ОДР-полигон* приведены на рисунке 5.

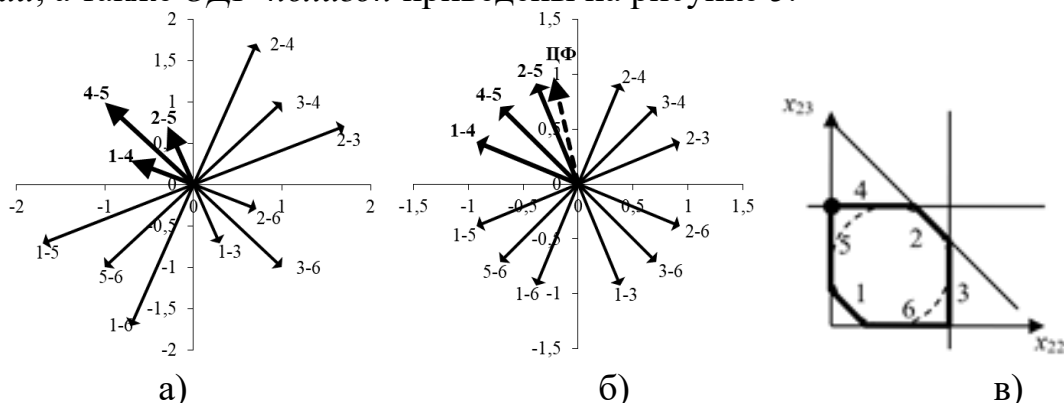


Рисунок 5 - Варианты векторов наблюдений и принятых решений (а); НВЕД наблюдений и целевой функции (б); ОДР-полигон (в)

То или иное решение, выбранное ЛПР, является одной из крайних точек ОДР, образованных соответствующими гиперплоскостями ограничений. Каждой гиперплоскости ставится в соответствие нормальный (ортогональный ей) вектор единичной длины (НВЕД). Принятому решению ставится в соответствие сумма НВЕД гиперплоскостей, образующих эту крайнюю точку. На рисунке 5а приведены все такие суммы НВЕД ТЗ размерности  $2 \times 3$  (обозначены в формате  $i-j$ , т.е. номеров пересекающихся гиперплоскостей). На рисунке 5б приведены нормированные (приведенные к единичной длине) суммарные векторы оценок ЦФ  $\bar{e}$ . Искомая ЦФ ЛПР  $\bar{c}$  также может быть представлена в виде НВЕД. Геометрически обратная ТЗ может быть интерпретирована как задача поиска по наблюдениям за решениями ЛПР такого НВЕД, который максимально близок к искомой НВЕД ЦФ ЛПР  $\bar{c}$  (рисунок 5б). Вектор оценки  $\bar{e}$  целевой функции  $\bar{c}$  может быть использован в качестве ЦФ для решения прямой ТЗ в целях распределения СиС при одновременных вызовах/пожарах.

Для решения обратной ТЗ разработаны алгоритмы (рисунок 6). Рекуррентная процедура оценивания реализуется на 4-ом этапе алгоритма по каждой  $j$ -й координате  $e_{ij}^k$   $i$ -го вектора спектра решений:

$$\tilde{c}_{i+1j}^k = \tilde{c}_{ij}^k + \tilde{Q}_{ij}^k (\tilde{Q}_{ij}^k + 1)^{-1} (e_{ij}^k - \tilde{c}_{ij}^k), \quad (2)$$

$$\tilde{Q}_{i+1j}^k = \tilde{Q}_{ij}^k - \tilde{Q}_{ij}^k (\tilde{Q}_{ij}^k + 1)^{-1} \tilde{Q}_{ij}^k. \quad (3)$$

Здесь рекурсивные итерации выполняются по множеству  $i$ -х векторов ( $i = 1, 2, \dots, M$ ), образующих спектр решения для  $k$ -го наблюдения. Текущие оценки помечены «тильдой», что отражает то обстоятельство, что результатом вычисления для  $k$ -го наблюдения будет совокупность координат  $\tilde{c}_{i+1j}^k$ . Здесь  $\tilde{Q}_{ij}^k$  имеет смысл дисперсии оценок  $\tilde{c}_{ij}^k$ , а  $\tilde{c}_{0j}^1$  и  $\tilde{Q}_{0j}^1$  - начальные значения в рекуррентной процедуре.

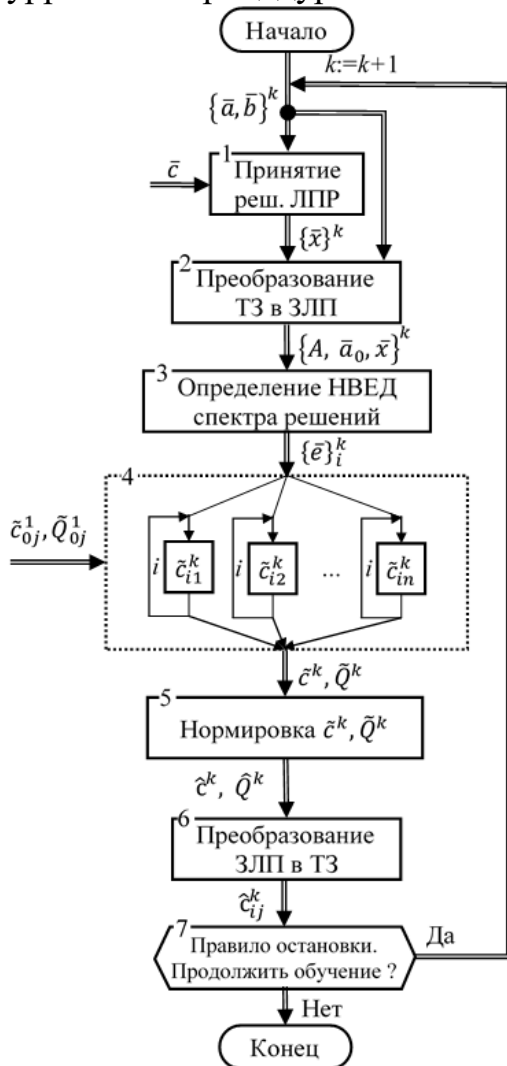


Рисунок 6 - Рекуррентный алгоритм вычисления оценок ЦФ ТЗ по наблюдениям за решениями ЛПР

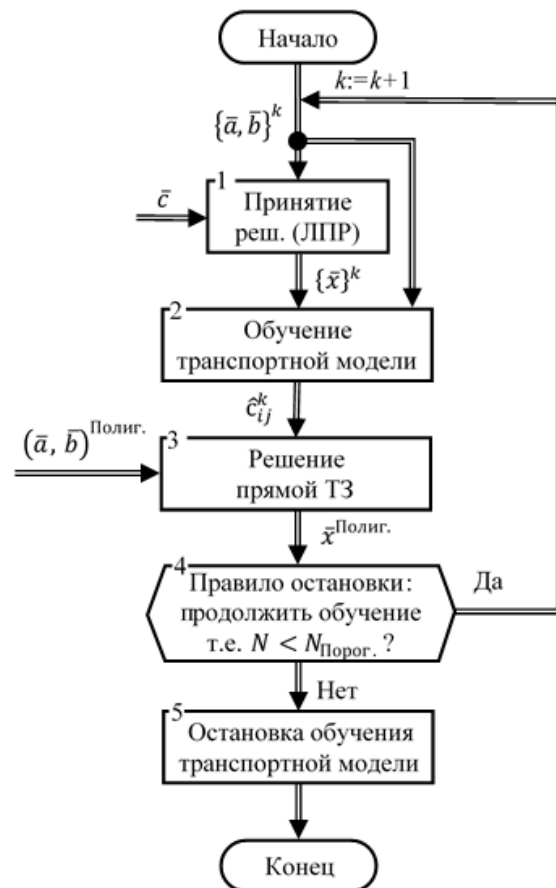


Рисунок 7 - Алгоритм Правила остановки с использованием СТПР-полигона

Правило остановки рекуррентной процедуры (рисунок 7) основано на использовании СТПР-полигона (рисунок 5в), где в качестве меры принята:

$$\delta_c^{k+1} = |\hat{c}^{k+1} - \hat{c}^k| \cdot 0,5, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Разработана технология применения инструментов *экспертного оценивания* и *оптимального планирования эксперимента* для выбора оптимального плана распределения СиС на основе использования ТЗ. Выполнены имитационные статистические исследования ее применения.

На основе построенных в первой главе регрессионных зависимостей видов удельного ущерба ( $u_d, R_2, Q_2$ ) от количества пожаров ( $n$ ), а также с

учетом статистических данных об ущербе от пожаров в городах, получены оценки потенциала повышения эффективности ликвидации пожара за счет применения машинообучаемых транспортных моделей в контуре управления, которые составили для разных видов ущерба от 1% до 23%.

В главе 3 «Многошаговые математические модели накопления знаний лиц, принимающих решения при ликвидации пожаров» разработаны адаптивные (машинообучаемые) варианты моделей выбора решений в системах управления ликвидацией пожаров на основе *марковских и игровых моделей*. Марковские модели рассмотрены двух типов - *марковские цепи* (с их помощью моделируются переходы между стадиями ликвидации пожара - для прогнозирования их параметров) и *марковские цепи с платежами* (*управляемые марковские цепи* - УМЦ), с помощью которых определяется оптимальная стратегия выбора ранга пожара.

В нормативных документах МЧС определены ключевые события, соответствующие им фазы и показатели ликвидации пожара. В рамках *первой из рассматриваемых марковских моделей*, процесс развития пожара представлен марковской цепью (МЦ), в которой *состояния* соответствуют укрупненным фазам развития пожара (*свободное горение, тушение, ликвидация последствий пожара, «нет пожара»*), а *время МЦ* - дискретные моменты времени наблюдения за состояниями пожара (например, с шагом 1 или 2 или 3, ... минуты). МЦ определяется матрицей вероятностей перехода за один шаг ( $P = \|p_{ij}\|_{mm}$ ) и вектором вероятностей начальных состояний ( $\bar{p}(0)$ ).

Графически МЦ представлена на рисунке 8.

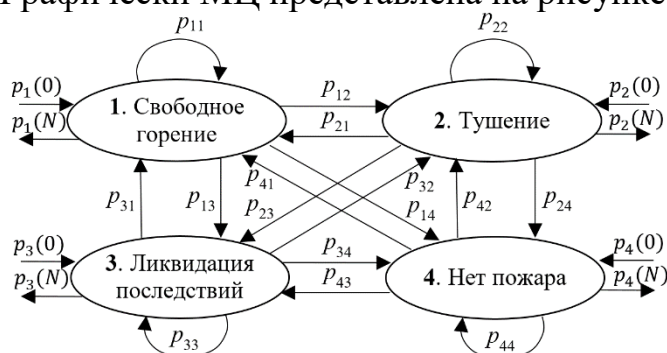


Рисунок 8 - Граф состояний МЦ ликвидации пожара

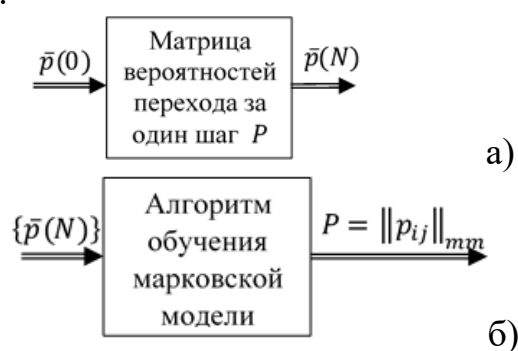


Рисунок 9 - Прямая и обратная задачи анализа МЦ

Важной характеристикой марковских цепей является вектор вероятностей предельных ( $N \rightarrow \infty$ ) состояний, отражающий установившийся режим МЦ. Он вычисляется как  $\bar{p}(N) = (P^N)^T \bar{p}(0)$ , где  $T$  - символ транспонирования;  $N$  - степень матрицы вероятностей перехода и номер шага процесса. В терминах прямой и обратной задач, взаимосвязь параметров МЦ отражена на рисунке 9.

В *обратной задаче вычисляется оценка матрицы P*, которая позволяет строить прогноз развития пожара при заданных вероятностях начальных состояний. На основе метода наименьших квадратов (МНК) разработан рекуррентный алгоритм оценивания элементов матрицы  $P$ :

$$\hat{p}_{k+1} = \hat{p}_k + Q_k \bar{x}_{k+1} (x_{k+1}^T Q_k \bar{x}_{k+1} + 1)^{-1} (y_{k+1} - x_{k+1}^T \hat{p}_k); \quad (5)$$

$$Q_{k+1} = Q_k - Q_k \bar{x}_{k+1} (x_{k+1}^T Q_k \bar{x}_{k+1} + 1)^{-1} x_{k+1}^T Q_k, \quad (6)$$

где вектор оценок  $\hat{p}_k$  представляет собой совокупность столбцов матрицы  $P$ , а матрица  $Q_k$  - дисперсионная матрица оценок. Рекуррентная схема расчетов носит двухуровневый характер т.к. здесь  $k$  — номер состояния, которые пробегаются для всякого нового  $(N+1)$ -го наблюдения.

Построен алгоритм обучения МЦ по наблюдениям для четырех состояний МЦ (рисунок 8), позволивший в режиме имитационного моделирования исследовать качество обучения в зависимости от различных факторов, в том числе, от точности измерений (величины ошибки). Эксперименты показали *слабую чувствительность алгоритма обучения к уровню ошибки измерения*.

На рисунке 10 приведены гистограммы распределения времени окончания каждой из трех рассматриваемых фаз развития пожара, построенные по официальным статистическим данным о пожарах в городах РФ в 2016 году.

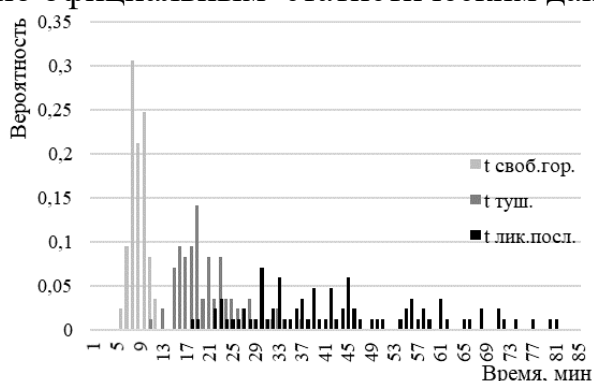


Рисунок 10 - Гистограммы моментов времени окончания фаз свободного горения ( $t_{\text{своб.гор.}}$ ), тушения ( $t_{\text{туш.}}$ ) и ликвидации последствий ( $t_{\text{лик.посл.}}$ )

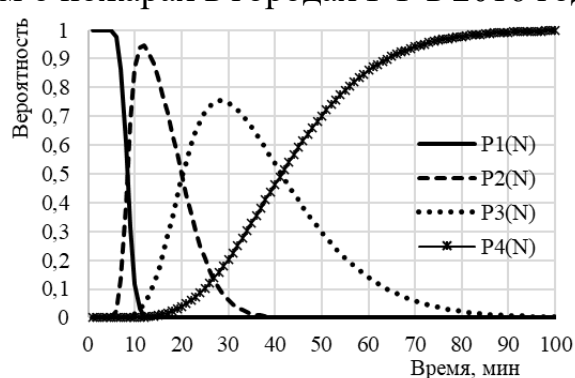


Рисунок 11 - Вероятности состояний процесса ликвидации пожара (по данным эмпирических наблюдений времени реагирования)

Гистограммы аппроксимированы гамма-распределением для дальнейшего построения модели. *Вероятности пребывания процесса в том или ином состоянии* (как элементы вектора текущего состояния процесса  $\bar{p}(N)$ ) в произвольный (текущий) момент времени  $t$  (или его дискретный аналог  $N$ ) представлены выражением (7).

$$\left. \begin{aligned} p_1(N) &= P(t < t_{\text{св.гор}}) = 1 - P_{\text{св.гор.}}(N) \\ p_2(N) &= P(t_{\text{св.гор}} < t < t_{\text{туш}}) = P_{\text{св.гор.}}(N) (1 - P_{\text{туш.}}(N)) \\ p_3(N) &= P(t_{\text{туш}} < t < t_{\text{лик.посл.}}) = P_{\text{туш.}}(N) (1 - P_{\text{лик.посл.}}(N)) \\ p_4(N) &= P(t > t_{\text{лик.посл.}}) = P_{\text{лик.посл.}}(N) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для шага МЦ в 1 мин. вероятности состояний приведены на рисунке 11. Получены значения вектора вероятностей пребывания МЦ в каждом из 4-х состояний в различные моменты времени  $N$ . Подобные построения могут быть выполнены по данным пожарно-спасательных подразделений (рисунок 10) любого уровня - ПСЧ, гарнизон и т.д. Эти значения необходимы для оценивания элементов матрицы вероятностей перехода МЦ.

В модельных расчетах построены матрицы вероятностей перехода для шага МЦ в 1, 3, 5, 10 минут, две из которых (для 1 и 10 минут) имеют вид (8). Соответствующие им прогнозные значения вероятностей состояний МЦ (фаз развития пожара) приведены на рисунке 12.

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,921 & 0,079 & 0 \\ 0 & 0 & 0,959 & 0,041 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; P_{10} = \begin{bmatrix} 0,141 & 0,859 & 0 & 0 \\ 0 & 0,331 & 0,669 & 0 \\ 0 & 0 & 0,576 & 0,424 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

На начальном шаге вектор вероятностей начальных состояний имеет вид  $\bar{p}(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . Это означает, что если в начальный момент пожар с вероятностью 1 находился в состоянии свободного горения, то вероятности его пребывания на следующих шагах в других состояниях определяются соответствующими графиками.

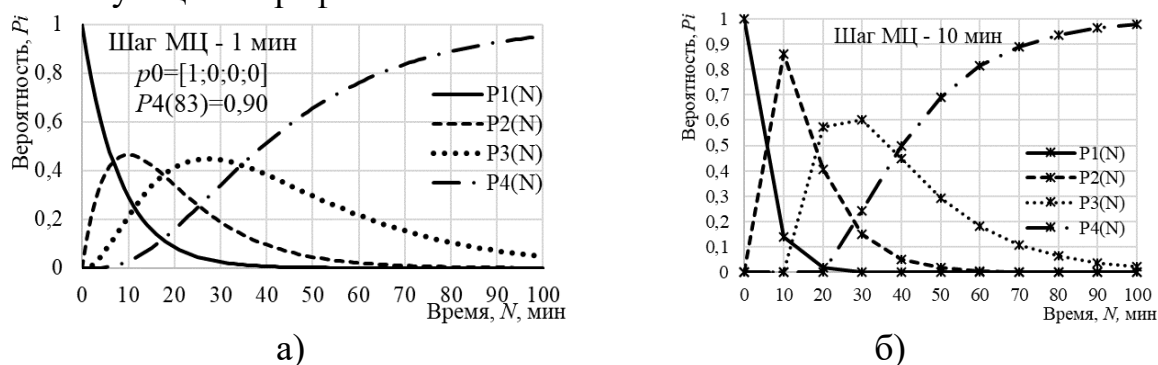


Рисунок 12 - Вероятности состояний процесса ликвидации пожара, вычисленные по обученной МЦ, для различной продолжительности шага МЦ

Показано, что для шага мониторинга в 1 минуту (рисунок 12а) и доверительной вероятности  $p_{\text{дов}} = 0,9$  пожар перейдет в состояние «нет пожара» на 83-й минуте. Матрицы вероятностей перехода МЦ по тем же статистическим данным были построены и для всех семи состояний (фаз развития пожара).

Алгоритм применения построенной марковской модели для вычисления вероятностно-временных характеристик ликвидации пожара приведена на рисунке 13. Марковская модель динамики состояний пожара позволила, на основе байесовских оценок, определить оптимальный ранг пожара.

В режиме имитационного эксперимента были построены матрицы вероятностей перехода для рангов пожара 1, 1 бис, 2, 3, 4. По вероятностям пребывания МЦ в состоянии «нет пожара» ( $P_4$ ) построены их плотности распределения и платежные функции, представляющие собой парные регрессионные зависимости видов ущерба ( $u_d, R_2, Q_2$ ) от продолжительности пожара (по статистическим данным о пожарах в городах в 2016 году).

С учетом того, что с ростом ранга стоимость издержек на ликвидацию пожара растет, а ущерб (возмещаемый из бюджета) снижается, существует оптимум (минимум общих издержек для госбюджета) по рангу пожара. Оптимальным для рассматриваемых данных стал ранг «1 бис».

**Второй разновидностью марковских моделей**, которая может быть использована для определения оптимального ранга пожара, являются **управляемые марковские цепи (УМЦ)**. В отличие от предыдущего подхода (где состоянием была фаза пожара), в УМЦ в качестве состояния используются показатели сложности и масштаба пожара, платежная функция (платежная матрица) является одним из элементов УМЦ.

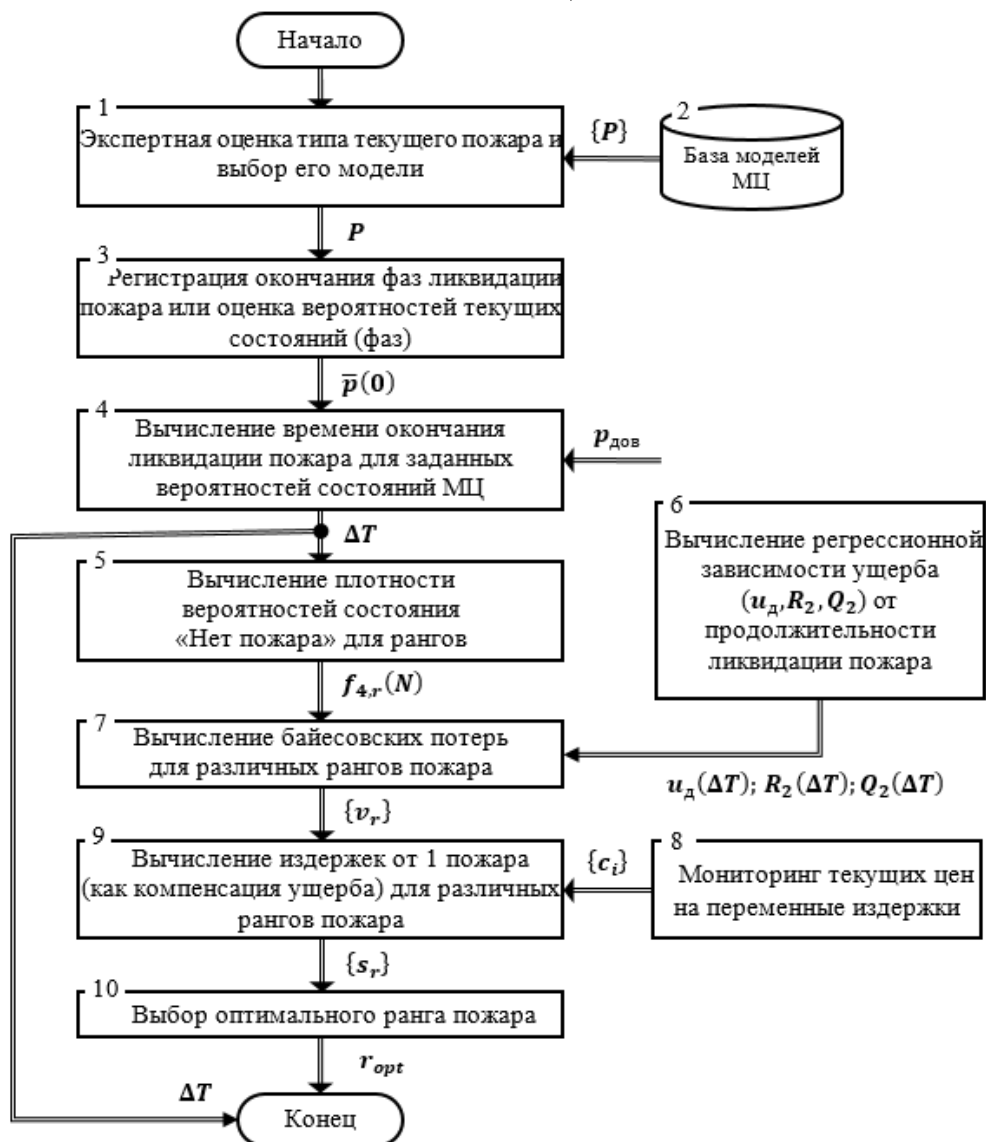


Рисунок 13 - Алгоритм применения марковской модели для прогнозирования окончания ликвидации пожара и выбора оптимального ранга

В основе разработанного алгоритма выбора ранга лежит та же методология построения машиннообучаемых моделей, адаптирующихся к целевым предпочтениям ЛПР путем решения обратной задачи по ретроспективным данным о решениях, принятых опытными ЛПР. Входные и выходные параметры прямой и обратной задач анализа УМЦ приведены на рисунке 14.

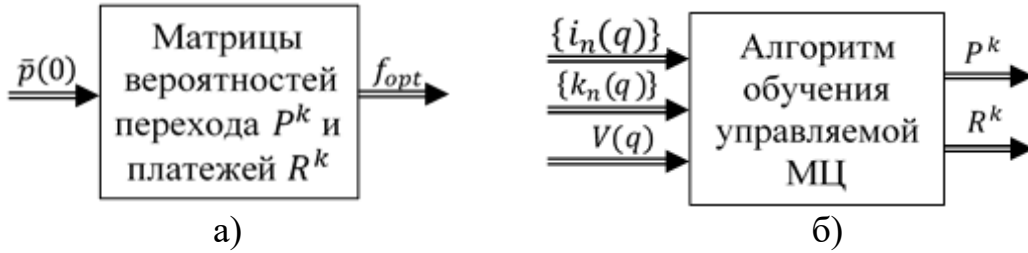


Рисунок 14 - Взаимосвязь параметров прямой и обратной задач анализа МЦ

Отличие УМЦ от обычных МЦ заключается в том, что: на каждом ( $N$ -ом) шаге процесса перед переходом на следующей ( $(N + 1)$ -й) шаг выбирается одна ( $k$ -ая) из множества  $K$  альтернатив (решений); для каждого ( $k$ -го) варианта решения задана своя *матрица условных вероятностей перехода* за один шаг  $P^k = \|p_{ij}^k\|_{mm}^K$  (под *условным* имеется в виду то, что  $p_{ij}^k$  - это вероятность перехода в состояние  $j$  на  $(N + 1)$  - ом шаге *при условии, что* на  $N$ - ом шаге процесс находился в состоянии  $i$ , если было принято решение  $k$ ); заданными должны быть и *матрицы условных платежей* за один шаг  $R^k = \|r_{ij}^k\|_{mm}^K$ , где  $r_{ij}^k$  - условный платеж, аналогично  $p_{ij}^k$ . Остальные элементы в УМЦ аналогичны обычным МЦ.

Предметом решения обратной задачи для УМЦ являются матрицы  $P^k$  и  $R^k$ , оцениваемые по множеству реализаций ( $q$ -х) о текущих состояниях ( $\{i_n(q)\}$ ), принятых ЛПР решениях ( $\{k_n(q)\}$ ) и платежах  $V(q)$ , где  $n = \overline{1, N}$  - номер шага УМЦ.

Разработаны алгоритмы решения прямой и обратной задач. Решение обратной задачи построено на основе метода наименьших квадратов (МНК), рекуррентная форма которого имеет следующий вид:

$$\hat{r}_{q+1} = \hat{r}_q + Q_q P_q [P_q^T Q_q P_q + 1]^{-1} [v_{q+1} - P_q^T \hat{r}_q]; \quad (9)$$

$$Q_{q+1} = Q_q - Q_q P_q [P_q^T Q_q P_q + 1]^{-1} P_q^T Q_q, \quad (10)$$

где:  $Q_q = (P_q^T P_q)^{-1}$ ;  $v_{q+1}$  - платеж в  $(q + 1)$ -м наблюдении;  $P_q$  - матрица перехода, оцененная в  $q$ -м наблюдении; шагом наблюдения  $q$  является реализация, а  $n$  - это шаг УМЦ в рамках  $q$ -ой реализации.

Алгоритм рекуррентного оценивания параметров УМЦ не только снимает априорную неопределенность, но позволяет адаптироваться и к дрейфу платежей, целей и предпочтений ЛПР (текущая неопределенность).

**Третьей группой машинообучаемых моделей в нормальной форме**, способных аккумулировать опыт принятия решений ЛПР при ликвидации пожара, это *игры с природой*, основными элементами которых являются: чистые стратегии ЛПР  $d_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ); состояния природы  $s_j$  ( $j = \overline{1, n}$ ); платежная матрица  $A = \|a_{ij}\|_{mn}$ , имеющая смысл выигрыша; вектор вероятностей состояний природы  $\bar{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ ; параметр смеси пары частных критериев в комбинированный -  $\lambda \in [0; 1]$ .



Из всех критериев выбора оптимального решения в условиях риска и неопределенности (для игр с природой) в работе рассмотрен только *критерий Вальда* т.к. он отражает позицию крайней осторожности (или гарантированного результата), которая в большей степени соответствует ситуации эвакуации или спасению людей. А поскольку модель выбор решений по критерию Вальда эквивалентна антагонистическим матричным играм (АМИ), то в работе использованы инструменты решения АМИ, в которых природа рассматривается как второй игрок (И2), а оперирующая сторона (подразделение ГПС, РТП) - первый игрок (И1). *Машинообучаемые игровые модели выбора решений* разработаны в рамках единой методологии построения алгоритмов адаптивного (к предпочтениям опытного ЛПР) управления.

Контекстом применения игровых моделей при ликвидации пожара является *эвакуация людей из горящего здания*. В этих задачах ЛПР (руководитель тушения пожара - РТП) стоит перед дилеммой – потратить часть времени на разведку (поиск людей, уточнение и прогнозирование ситуации) или, на основе своего опыта и интуиции, направлять силы и средства в конкретные места здания для эвакуации людей. На одном пожаре циклов «разведка и/или спасение» может быть несколько.

Эта задача формализована таким образом, что столбцы соответствуют состояниям природы  $s_j \in S$ , а строки – вариантам решений  $d_i \in D$ . Прямая задача выбора оптимального решения для АМИ заключается в максимизации целевой функции  $L(d_i)$ :

$$d_{opt} = \arg \max_{d_i \in D} L(d_i) = \arg \max_{d_i \in D} \min_{s_j \in S} c_{ij}. \quad (11).$$

Решить АМИ в смешанных стратегиях означает найти для игроков векторы вероятностей применения ими своих чистых стратегий  $\bar{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_m]^T$  и  $\bar{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$  и цену игры  $V = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} p_i q_j = \bar{p}^T A \bar{q}$ , имеющую смысл среднего выигрыша игрока И1 (при многократном повторении партий игры).

По аналогии с другими моделями, рассматриваемыми в работе, входные и выходные параметры прямой и обратной задач приведены на рисунке 15.

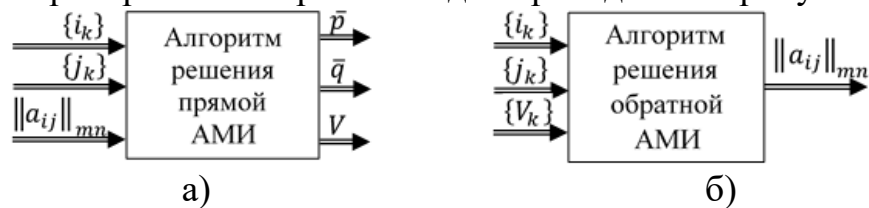


Рисунок 15 - Взаимосвязь параметров прямой и обратной задач АМИ

Разработан алгоритм решения обратной АМИ в форме рекуррентной процедуры оценивания:

$$\hat{a}_{N+1} = \hat{a}_N + Q_N \bar{r}_{N+1} [\bar{r}_{N+1}^T Q_N \bar{r}_{N+1} + 1]^{-1} [V_{N+1} - \bar{r}_{N+1}^T \hat{a}_N]; \quad (12)$$

$$Q_{N+1} = Q_N - Q_N \bar{r}_{N+1} [\bar{r}_{N+1}^T Q_N \bar{r}_{N+1} + 1]^{-1} \bar{r}_{N+1}^T Q_N, \quad (13)$$

где:  $N$  - номер шага наблюдений; вектор оценок  $\hat{a}_N$  сформирован из столбцов платежной матрицы;  $\bar{r}_k = [q_k^{(1)} \bar{p}_k^T \quad q_k^{(2)} \bar{p}_k^T \quad \dots \quad q_k^{(n)} \bar{p}_k^T]^T$ , где  $q_k^{(i)}$  - это  $i$ -й

элемент вектора  $\bar{q}_k$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $Q_N = (R_N^T R_N)^{-1}$ ;  $R_N = [\bar{r}_1^T \quad \bar{r}_2^T \quad \dots \quad \bar{r}_N^T]^T$ ;  $V_{N+1}$  - средний платеж на  $(N + 1)$ -м шаге наблюдений.

*Мерой сходимости* ( $\delta_a^{N+1} \in [0; 1]$ ) *служит* длина вектора разности двух векторов оценок платежей АМИ, вычисленных на  $(N+1)$  и  $N$ -ом шагах наблюдений:

$$\delta_a^{N+1} = |\hat{a}^{N+1} - \hat{a}^N| \cdot 0,5, \quad N = 1, 2, \dots \quad (14)$$

Правило остановки рекуррентного оценивания элементов платежной матрицы имеет вид:  $\delta_a \leq \delta_a^{\text{Порог}}$ . На модельном примере показана эффективная работа машинообучаемой АМИ.

**В главе 4 «Модели и алгоритмы машинного обучения робототехнических систем, применяемых при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций»** выполнен анализ текущего состояния применения робототехнических систем (РТС) при ликвидации пожаров и ЧС, выявивший высокую в них потребность в случаях ЧС повышенной опасности. Это приводит к необходимости использования при пожарах и ЧС РТС высокой степени автономности. Как правило, необходимы мультиагентные РТС (МРТС), укомплектованные однотипными (гомогенные МРТС) или разными (гетерогенные МРТС) роботами, как наземного типа различной функциональности, так и воздушные. Для эффективной работы таких групп роботов весьма актуальными становятся алгоритмы их машинного обучения по данным эксплуатации опытными операторами, что и соответствует основному направлению исследований в данной работе.

В рамках машинного обучения МРТС предложен ряд адаптивных машинообучаемых моделей управления, в том числе: модель оптимального объемного планирования работ на основе решения обратной задачи линейного программирования (ЗЛП); модель оптимального адаптивного распределения заданий в группе автономных роботов на основе транспортной задачи (ТЗ); модель оптимального управления роботом разведки на основе использования адаптивных управляемых марковских цепей (УМЦ). Разработан алгоритм оценивания степени склонности к риску ЛПР-оператора, обучающего РТС, что позволяет селективировать операторов - учителей роботов. Предложен алгоритм решения задач концептуального проектирования систем мониторинга пожароопасной обстановки на основе использования воздушных роботов - беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Основными целями применения РТС при ликвидации пожаров и ЧС являются: повышение боевых возможностей подразделений МЧС, а также снижение человеческих потерь и других видов ущерба. Эти цели порождают такие группы задач как: *разведка* (и мониторинг) зоны ЧС; *выполнение транспортно-логистических операций* по обеспечению работ в зоне ЧС; *выполнение работ на всех стадиях ликвидации пожаров и ЧС* и другие.

Контекстом применения машинообучаемых моделей для *оптимального планирования работ* в гетерогенной группе роботов, является ситуация, в которой имеется рабочая зона с очагами заражения или пожара. Цель использования роботов при этом состоит в исследовании рабочей зоны с

последующим определением маршрутов безопасной эвакуации людей и/или прохода спасателей. Для этого используется гетерогенная группа роботов, состоящая из подгрупп роботов, специализирующихся (для зон заражения) на выполнении таких частных задач, как: выявление очагов возгорания/заражения; измерение параметров очагов возгорания/заражения; маркировка эпицентров и границ допустимых уровней пожароопасности/заражения; и т.п.

Ограниченными ресурсами роботов являются энергозапас (заряд батареи), расходные материалы (маркеры) и др. Выполнение комплекса работ происходит в непрерывном режиме группой роботов переменного состава. Изменение состава обусловлено неравномерностью расходования ресурсов. Поэтому в случайные моменты времени отдельные роботы могут покидать рабочую зону (для пополнения ресурсов), а другие - возвращаться. В моменты изменения состава МРТС выполняется перепланирование работ с учетом текущего состояния ресурсов группы.

В состав МРТС входят роботы, оснащенные специализированным оборудованием различных типов. В качестве прототипов рассматриваются роботы среднего класса на платформах МРК-27 и МРК-46. Управление осуществляется из *центра супервизорного управления* (ЦСУ) группой роботов. ЦСУ формирует комплексное задание, которое затем разбивается на отдельные работы (задания), лежащие в «сфере компетенций» того или иного типа роботов. Одна из основных функций ЦСУ - оптимальное распределение заданий между роботами группы в целях эффективного решения комплексного задания. Таким образом, ЦСУ решает распределительные задачи и формирует команды управления группе роботов, а также обрабатывает информацию, получаемую роботами из рабочей зоны в процессе выполнения заданий.

Типовой сценарий управления МРТС включает две группы задач: 1) объемное планирование операций (сколько каких работ выполнять); 2) распределение заданий между роботами группы текущего состава.

Первая задача решена на основе *машинообучаемой формы задачи линейного программирования* (ЗЛП), вторая - на основе *машинообучаемой транспортной задачи* (ТЗ). Особенность использования этих моделей для планирования операций в адаптивной (машинообучаемой) форме заключается в том, что параметры целевой функции оптимального распределения заданий априори неизвестны. Поэтому, в рамках предложенного подхода, «боевой» работе МРТС должна предшествовать стадия обучения роботов опытным оператором в условиях полигона или на компьютерном симуляторе.

**В первой задаче** обучается обобщенная целевая функция (ЦФ) ЗЛП, представленная в виде линейной формы  $L(\bar{x}) = \sum_{j=1}^n c_j x_j$ , где  $L$  - целевой показатель;  $\bar{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$  - вектор переменных ЗЛП;  $\bar{c} = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n]^T$  - вектор коэффициентов целевой функции ЗЛП. Машинное обучение заключается в оценивании (настройке) элементов вектора ЦФ  $\bar{c}$  в соответствии с рекуррентным алгоритмом (2)-(3). Для мониторинга сходимости оценок использован модуль разности текущего и предыдущего векторов оценок (4). Этот показатель позволяет строить на каждом шаге

обучения прогноз необходимого для остановки количества предстоящих наблюдений. В модельном примере прогнозное выражение по нескольким первым  $k$  шагам аппроксимировано степенной функцией вида:  $\delta_c^k = 0,3504k^{-1,451}$ .

**Вторая задача** состоит в распределении заданий, определенных к выполнению в первой задаче, среди роботов группы текущего состава. Здесь в качестве модели для машинного обучения выступает транспортная задача (ТЗ). Ее обучение выполняется в рамках алгоритма, представленного на рисунке 6.

На модельном примере рассмотрена МРТС, состоящая из *трех типов* роботов  $R_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  ( $n = 3$ ). Каждый робот должен выполнять задания *двух типов*  $Z_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  ( $m = 2$ ). Моделировалось 50 циклограмм выполнения работ, в каждой из которых количество требуемых роботов того или иного типа (аналог спроса в ТЗ) варьировалось от 1 до 7, количество имеющихся в наличии роботов (аналог предложения в ТЗ) варьировалось в том же диапазоне. Коэффициенты платежной функции (элементов  $c_{ij}$  транспортной таблицы - рисунок 16а) имитировались с аддитивной нормально распределенной ошибкой (с параметрами  $N(0; 0,1 \times c_{ij})$ ). Несмотря на ошибку измерения алгоритм продемонстрировал достаточно высокую скорость обучения модели - сходимость оценок показана на рисунке 16б, а невязка - на рисунке 16в.

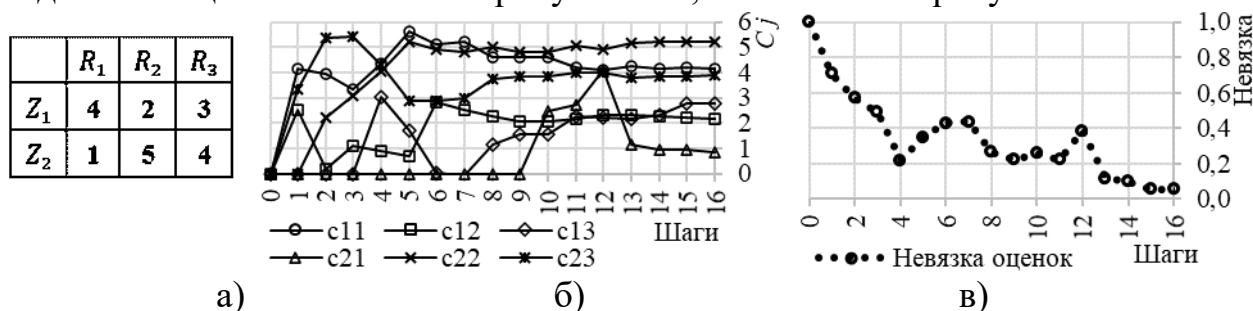


Рисунок 16 – Транспортная таблица (а) и результаты обучения - оценки коэффициентов (б) и нормированная невязка (в)

Еще одной важной задачей, которую следует решать роботами в составе гетерогенной МРТС — это **разведка в рабочей зоне**, в частности, сканирование автономным мобильным роботом границы области, обладающей заданными свойствами. Задача робота - двигаться вдоль границы области, картографируя ее с помощью навигационной системы. Это могут быть границы помещения, завалов, границы порогового уровня заражения или температуры. Регистрация выполняется с помощью специальных бортовых сенсоров.

Моделью, структурно адекватной этой задаче, является управляемая марковская цепь (УМЦ). Основные элементы прямой и обратной задач этого типа представлены на рисунке 14. Стратегия управления на основе УМЦ имеет структуру условного оператора «если ... то ...». Для построения оптимальной стратегии используется целевая функция, в которой, как и в других моделях выбора оптимального управления, существует априорная и текущая неопределенность в виде коэффициентов, которые и являются предметом машинного обучения УМЦ по данным управления опытным оператором.

Машинное обучение выполняется на основе решения обратной задачи, рекуррентная форма которой представлена выражениями (9)-(10).

В случае робота-разведчика на колесном или гусеничном ходу многократно повторяющаяся ситуация, требующая принятия решения (СТПР) состоит в срабатывании того или иного датчика (правый, левый, фронтальный, задний и др. при сканировании границы области). Решение при этом будет состоять в том, какую операцию движения выполнить - повернуть направо, налево, отехать назад и т.п. Особенность такого управления заключается в том, что интегральный эффект может быть измерен только в конце траектории объезда области. Он может выражаться в общей продолжительности выполнения операции, в точности построения траектории, в затратах электроэнергии робота как одного из его ресурсов, и т.п. Т.е. эффект является векторным, не представимым единственным показателем.

Если роботом управляет опытный ЛПР-оператор, то он все эти показатели учитывает в некотором обобщенном виде, действуя интуитивно, часто, даже не в состоянии их вербализовать. Поэтому для того, чтобы автономный робот мог действовать столь же эффективно, следует воспользоваться машинообучаемой моделью УМЦ, которая, будучи реализованной на борту автономного робота, позволит ему действовать с эффективностью, близкой к эффективности опытного оператора.

В традиционных сценариях использования роботов (в режиме дистанционных манипуляторов), управляемых операторами в условиях полной информации, эффективность выполнения работ зависит от опыта оператора. При этом и все последствия принятых им управленческих решений остаются на его ответственности. Но в условиях автономной работы РТС нет явных лиц, непосредственно отвечающих за решения, принимаемые роботом в той или иной ситуации. Поэтому, прежде чем доверить машинному обучению выборку, сформированную по действиям того или иного оператора, важным представляется **выявление его степень склонности к риску**.

В работе предложен подход и алгоритм, позволяющие по решениям, принятым ЛПР-оператором, оценить степень его склонности к риску на основании возникающих ситуаций и принятых им решений. Алгоритм построен на основе применения деревьев решений и критерия Гурвица в играх с природой. Позиция ЛПР по степени склонности к риску (показатель  $\gamma$ ) может варьироваться от крайней осторожности (пессимистическая позиция) до высокой рисковости (оптимистическая позиция).

**Совместная работа личного состава и роботов** в общей рабочей среде, при ликвидации пожаров, ЧС и их последствий, является еще одной важной сферой применения роботов. Роботы такого типа должны обладать специальными свойствами, сенсорным аппаратом, алгоритмами принятия решений и координации совместной работы, обеспечивающими безопасность людям, находящимся рядом. Такой класс роботов называют *коллаборативными роботами (коботами)*.

В рамках *концептуального проектирования МРТС* рассмотрена задача моделирования мониторинга пожарной обстановки коллаборативной группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Схема моделируемой ситуации представлена на рисунке 17.

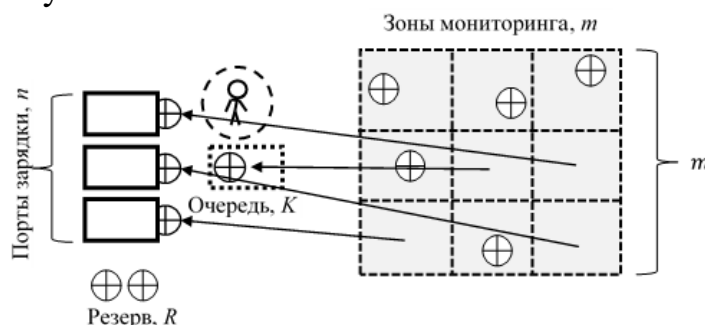


Рисунок 17 - Конфигурация системы мониторинга пожарной обстановки

Такая система относится к категории замкнутых систем массового обслуживания (СМО). В такой СМО заявки — это автономные БПЛА-роботы. Каждая свободная зона мониторинга является заявкой, обслуживаемой свободным роботом. Выработавшие свой энергоресурс роботы являются заявками для портала зарядки, где каждый порт — это обслуживающий прибор для робота.

Рассматривалась гомогенная МРТС, где в качестве прототипов приняты БПЛА типа *Inspider*, *Phantom* или *DJI Mavic 2 Pro* с временем автономной работы 15-25 минут (ими ныне оснащены некоторые подразделения МЧС России). Для патрулирования одной зоны требуется один робот. Имеется и очередь на зарядку с числом мест -  $K$  (при занятости всех мест в очереди робот покидает очередь и становится в резерв, а его место в мониторинге занимает готовый робот из резерва).

Коллаборативная часть представлена зоной безопасности вокруг человека, обслуживающего порты зарядки, устройства старта и приземления, в которую не должны залетать роботы.

В рамках технологии концептуального проектирования системы построена система имитационного моделирования (на примере узла зарядки роботов), позволяющая построить регрессионные зависимости выходных показателей системы (время занятости каждого терминала зарядки, среднее время ожидания в очереди и др. -  $y_1, \dots, y_9$ ) от варьируемых параметров (количество каналов портов зарядки -  $x_3$ , среднее время обслуживания -  $x_2$ , интенсивность поступления роботов на зарядку (определяется емкостью аккумулятора) -  $x_1$ ). Применение многокритериальной оптимизации на основе доминирования позволило для модельных исходных данных определить оптимальные параметры портала зарядки БПЛА:  $x_1^{opt} = 1,23$  1/час;  $x_2^{opt} = 1,18$  час;  $x_3^{opt} = 3$  шт.

В главе 5 «**Модели и алгоритмы контроля готовности и управления рисками в задачах поддержки принятия решений при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций**» разработаны практические методы и алгоритмы внутреннего контроля готовности подразделений в иерархической

системе управления, а также оценивания склонности ЛПР к риску в процедурах принятия решений.

Вопросы контроля готовности подразделений МЧС к выполнению задач ликвидации ЧС закреплены в нормативных правовых актах РФ, где, в частности отмечается: *«Готовность аварийно-спасательных служб к реагированию на ЧС проверяется в ходе проверок, осуществляемых в пределах своих полномочий МЧС, органами госнадзора и контроля, а также органами исполнительной власти ...»*. В данной главе предложены методы и алгоритмы обеспечения технологических процедур внутреннего контроля готовности к реагированию на ЧС на различных уровнях иерархии управления. Разработанные элементы технологии (методы и алгоритмы) внутреннего контроля основаны на риск-ориентированном подходе, позволяющем перейти от *управления по отклонениям* (выходных показателей от нормы) к *управлению по возмущениям* (факторов, влияющих на выходные показатели). Это требует применения моделей, увязывающих факторы с показателями.

Основой риск-ориентированного подхода в организационных системах в настоящее время являются инструменты внутреннего контроля (ВК), основные принципы которого закреплены в *Лимской декларации руководящих принципов контроля*. Все инструменты ВК реализуются в системах ВК (СВК).

В контексте пожарной безопасности в ряде работ развита концепция риска в составе триады *«опасность, риск, безопасность»*, в соответствии с которой - *«риск - это количественная характеристика возможности реализации конкретной опасности или ее последствий»*, а *«управление риском - это разработка комплекса мероприятий* (инженерно-технического, экономического, социального и иного характера), позволяющих снизить значение данного риска до допустимого уровня».

В работе, в качестве базового инструмента оценивания рисков, предложена система бинарных тестов, позволяющих тестировать подразделения пожарной охраны и сотрудников, как источники событий, повышающих риски организации. Все тесты представлены двумя группами: 1. R1-R20 - для оценивания рисков (20 тестов с общим количеством вопросов - 171); 2. S1-S4 - для оценивания состояния СВК (4 теста с общим количеством вопросов - 25). Разработаны алгоритмы и сценарии работы с тестами.

Тестирование выполняется в рамках СВК всеми подведомственными (нижележащего уровня) подразделениям (ПВП), конечные показатели передаются на вышележащие уровни, где добавляются свои показатели и свернутые оценки передаются выше. Оценки по R-тестам (*ключевые показатели риска* - КПР, отражают безрисковость  $U$ ) и по S-тестам (*ключевые показатели эффективности СВК* - КПЭ - отражают качество работы СВК  $V$ ) объединяются в единый *ключевой показатель контроля* (КПК -  $W$ ) на основе использования такого метода свертки векторных критериев, как *метод идеальной точки* ( $W_k = \sqrt{(U_k - U^*)^2 + (V_k - V^*)^2}$ , где  $(U^*, V^*)$  - координаты идеальной точки;  $k$  - номер ПВП). Полученные значения текущих оценок позволяют вышестоящим подразделениям осуществлять мониторинг текущего

состояния пожарно-спасательных частей (ПСЧ) при планировании ликвидации ЧС и распределении СиС с учетом динамики изменения показателей готовности (риска неготовности) ПСЧ.

Рассмотрены различные варианты организации тестирования и обработки результатов в иерархической системе - от полной децентрализации до полной централизации планирования проверок и обработки результатов.

С учетом текущих значений показателей риска может быть построен алгоритм планирования внешних проверок. Он позволит выбрать подмножество ПСЧ, обеспечивающее наименьшие совокупные потери (возмещение ущерба от пожаров и затраты на проверки).

Важным аспектом функционирования иерархических организационных систем является их работа в переходных (нестационарных) режимах. В работе рассмотрен пример моделирования показателей работы Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) с учетом функций и структуры, определенных в Постановлении Правительства РФ № 794 от 30.12.2003 г.

Эффективность реагирования РСЧС зависит как от функциональных возможностей подсистем (внутренние факторы), так и от возникающих ЧС (внешние факторы, природы), их масштабов и интенсивности. Стратегии природы представлены частными сценариями, соответствующими направлениям деятельности МЧС, например: пожары в городской и сельской местности; аварии и катастрофы техногенного или природного характера; эпидемии в отдельных регионах РФ или пандемии; и т.п. Каждый из сценариев имеет свои показатели, требующие соответствующего им ресурсного обеспечения из резервов и пополнения от производства. Ресурсы, как любые запасы, ограничены и пополняемы. Динамика пополнения ресурсов имеет свои ограничения, поэтому в тех случаях, когда потребности в ресурсах превышают имеющиеся текущие возможности обеспечения и пополнения, может возникать дефицит, приводящий к снижению эффективности функционирования РСЧС.

Различные сценарии требуют привлечения тех или иных ведомств, предоставляющих свои специфические ресурсы. В случаях, когда действует комбинированный сценарий (как смесь частных) возникает задача оптимального распределения ограниченных ресурсов с определенной потерей эффективности ведомств, получивших ограниченные ресурсы, а значит и интегральная эффективность функционирования системы снижается. Для эффективного управления РСЧС в подобных ситуациях необходимы модели, отражающие зависимость интегральных показателей РСЧС от частных показателей эффективности ведомств и их подсистем. На примере комбинированного сценария, состоящего из смеси трех частных, в работе проиллюстрирована технология построения таких моделей для иерархической системы.

Для оценивания качества аппроксимации зависимости межуровневых показателей  $y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$  по модельным данным построена (рисунок 18) искусственная нейронная сеть (ИНС).



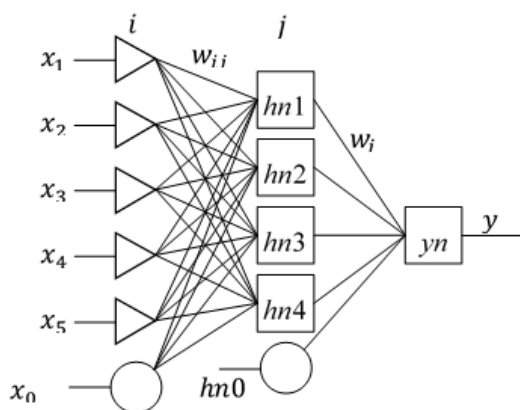


Рисунок 18 - ИНС MLP 5-4-1

Таблица 3 - Весовые коэффициенты нейронов и порога скрытого слоя

		Входы нейронов скрытого слоя			
		hn1	hn2	hn3	hn4
Порог	$x_0$	-1,480	-1,331	0,642	-6,176
Входные переменные	$x_1$	0,731	0,596	1,132	0,863
	$x_2$	1,101	1,466	2,388	1,121
	$x_3$	4,738	6,171	7,769	3,734
	$x_4$	0,237	0,147	1,359	1,397
	$x_5$	0,531	0,507	1,617	1,156

Функция, реализуемая данной ИНС, имеет следующий вид:

$$y = L_{yn} \left( \sum_{j=0}^4 w_j \cdot \left( L_{hn}^j \left( \sum_{i=0}^5 w_{ij} \cdot x_i \right) \right) \right). \quad (15)$$

Она нелинейна в силу нелинейности *логистических* функций активации, используемой как на скрытом ( $L_{hn}^j(z)$ ), так и на выходном ( $L_{yn}(z)$ ) слоях. Модель (15) необходима для решения прямой задачи - оценивания показателя эффективности на уровне РСЧС для соответствующего комплексного сценария функционирования.

В рамках реализации риск-ориентированного подхода к поддержке процедур принятия решений в МЧС **предложен метод оценивания уровня риска, возникающего при управлении** СиС в ЧС. Метод основан на использовании аппарата деревьев решений и матричных игр с природой. В качестве основного инструмента выбран критерий Гурвица принятия решений в условиях риска и неопределенности. Ключевым элементом метода, отражающим степень риска в принимаемых решениях, служит параметр пессимизма-оптимизма ( $\lambda$ ). Данная задача принятия решений относится к нижнему уровню иерархии системы управления и предназначена для включения ее в состав СППР, обеспечивающей выбор решений, имеющих уровень риска не хуже нормативного. Нормативный уровень риска определяется (в результате решения обратной задачи в рамках машинного обучения) по решениям, принятым ЛПР, имеющим допустимый уровень квалификации.

В качестве типовой ситуации рассматривается ликвидация пожара в многоэтажном здании, в котором участвуют звенья разведки и спасателей, осуществляющих эвакуацию людей. Задача представлена трехуровневым деревом решений, которое сведено к нормальной (матричной) форме со строками - решениями ЛПР, представленными стратегиями «если ... то ...» и столбцами - решениями природы, представленные различными сочетаниями исходов на первом и третьем шаге дерева. Выбор ЛПР представлен критерием Гурвица (*прямая задача*), согласно которому оптимальное решение выбирается из условия максимизации целевой функции  $L(d_i)$ :

$$d_{opt} = \arg \max_{d_i \in D} L(d_i) = \lambda \min_{s_j \in S} c_{ij} + (1 - \lambda) \max_{s_j \in S} c_{ij}. \quad (16).$$

Параметр пессимизма-оптимизма  $\lambda$  отражает степень склонности ЛПР к риску. В работе поставлена и *обратная задача*, как оценивание параметра  $\lambda$  по наблюдениям за решениями, принимаемыми ЛПР. Алгоритм решения обратной задачи оценивания параметра  $\lambda$ , как меры склонности ЛПР к риску, представлен в виде процедур точечного и интервального оценивания. На модельном примере показана работоспособность предложенного алгоритма.

Показано, что предложенные в данной главе методы снижения риска за счет проведения проверок способствуют улучшению временных показателей реагирования подразделений и повышению достоверности информации о состоянии сил и средств. На основании регрессионных зависимостей показателей ущерба от времени реагирования, построены косвенные оценки потенциала снижения показателей ущерба *относительно ныне существующих средних значений* в городах: для прямого материального ущерба  $u_d$  - на величину около 70% (на 37 тыс. руб. на один пожар); для количества погибших людей  $R_2$  - около 27% (на 3,6 человек на 100 пожаров); для количества травмированных  $Q_2$  - около 4% (на 7,8 человек на 100 пожаров).

**В главе 6 «Модели повышения эффективности ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций за счет организационных и инновационных факторов»** рассмотрены принципы и алгоритмы повышения эффективности функционирования подразделений пожарной охраны за счет управленческих инноваций, в числе которых страховые принципы возмещения ущерба и финансирования подразделений ГПС, привлечение инструментов лизинга и аутсорсинга. За основу моделирования влияния инновационных факторов на эффективность ликвидации пожаров в данной главе принята модель страхового обеспечения пожарно-спасательных подразделений, учитывающая страховую нагрузку на различные категории граждан. В расчетах и оценках использованы официальные данные пожарной статистики и Росстата.

В настоящее время издержки государства, связанные с возмещением гражданам РФ ущерба от пожаров, обусловлены необходимостью компенсации прямого материального ущерба ( $u$ ), родственникам за погибших в пожарах ( $R_2$  – количество людей, погибших в 100 пожарах) и людям, травмированным в пожарах ( $Q_2$  – количество людей, травмированных в 100 пожарах).

Используемые в оценках статистические данные показателей ущерба в сопоставимых ценах (с учетом дефлятора) приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Значения показателей ущерба по России в 2018 году

Прямой матер. ущерб в одном пожаре, тыс. руб.			Кол-во. погибших на 100 пожаров, чел			Кол-во. травм. на 100 пожаров, чел		
Все	Город	Село	Все	Город	Село	Все	Город	Село
<b>109,44</b>	124,28	88,26	<b>5,64</b>	4,63	7,07	<b>6,97</b>	8,05	5,46

Всего по России прямой материальный ущерб за 2018 год составил около 13777 млн. руб. Количество погибших в пожарах в 2018 г. составило около 7100 человек (всего), количество травмированных – 8774 человека. В работе принято (по прецедентам), что в среднем, компенсация за одного погибшего выплачивается, в размере 1 млн. руб. и 100 тыс. руб. - травмированному. С учетом этого, общая сумма необходимого возмещения составила 21,754 млн. руб. в год. Важным показателем, необходимым для оценивания, является уровень доходов различных категорий граждан (среднедушевой доход - СДД). Данные Росстата по СДД в работе аппроксимированы  $\gamma$ -распределением.

По данным Росстата: в 2018 году прожиточный минимум составил 9,691 тыс. руб.; численность трудоспособного населения – 82,2 млн. чел., откуда следует, что 14,2% (11,7 млн. чел.) имеют СДД ниже прожиточного минимума. Приведенные исходные данные послужили основой для построения страховой модели, позволившей получить оценки приемлемых страховых тарифов для различных конфигураций организации финансирования и использования инноваций при ликвидации пожаров и ЧС.

В модели предусмотрены два варианта схем страхования:

Вариант 1 - для всех страхователей тарифы одинаковы вне зависимости от их доходов;

Вариант 2 - страховую премию оплачивают не все (только та часть населения, чей СДД больше порога отсечения  $t = \tau$  на рисунке 19), а страховое возмещение получают все.

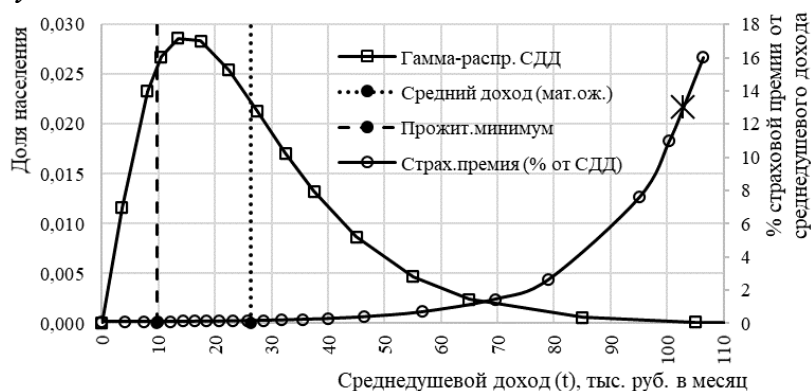


Рисунок 19 - Плотность распределения дохода по России в 2018 году (по данным Росстата) и размер доли страховой премии как % от СДД ( $\delta_M$ )

На рисунке 19 график «Страх. премия (% от СДД)»  $\delta_M(\tau)$  показывает, как % страховой премии в среднедушевом доходе зависит от значения отсечения ( $t = \tau$ ). Маркером «звездочка» отмечен некоторый «моральный барьер» - уровень в 13% (значение НДФЛ), для которого налог должны платить только граждане с доходом выше 103 тыс. руб. в месяц (их число - около 165 тыс. чел.). Зависимость  $\delta_M(\tau)$  аппроксимирована экспоненциальной функцией  $\delta_M(\tau) = 0,0578e^{0,0497\tau}$ . Так при пороге отсечения  $\tau = 9,934$  тыс. руб. (прожиточный минимум) количество плательщиков  $n = 70$  млн. чел., для которых доля ежемесячного платежа составляет 0,12% от среднедушевого дохода. Диапазон «не шокирующих» уровней отсечения, на наш взгляд,

находится в диапазоне от 0,18% до 2,65% от СДД, что соответствует количеству плательщиков от  $n = 30$  млн. чел. до  $n = 1$  млн. чел., имеющих средние доходы, соответственно, от 28,501 тыс. руб. до 79,041 тыс. руб. в месяц.

Приведенные в работе выкладки, отражают взаимосвязи основных элементов страховых расчетов и параметры процесса ликвидации пожара. На их основе выполнен ряд исследований, в которых выбирались, в качестве независимых переменных и показателей, те или иные группы переменных.

На основе построенной модели были получены оценки необходимых объемов страховых средств, построены зависимости показателей от параметров, в частности,  $\delta_M$  от  $S_{MTO}$ :

$$\delta_M(S_{MTO}) = 0,1322 + 0,006077S_{MTO}, \quad (17)$$

где  $S_{MTO}$  измеряется в млрд. руб., а  $\delta_M$  означает % среднего ежемесячного страхового платежа относительно среднего месячного среднедушевого дохода. Здесь предполагается, что страховой платеж (и соответствующий ему % в СДД -  $\delta_M$ ) включает  $S_y$  и  $S_{MTO}$ .

В работе рассмотрена возможность создания коммерческих пожарно-спасательных подразделений (КПП), обеспечивающих ликвидацию пожаров одновременно с традиционными ПСЧ, входящими в состав ГПС, с общей диспетчеризацией выездов. Рассмотрены возможности использования в составе СиС таких инновационных образцов пожарной техники и оборудования как пожарные роботы и квадрокоптеры, а также инновационных технологий финансового обеспечения работы пожарно-спасательных подразделений, таких как лизинг и аутсорсинг при страховом обеспечении финансирования.

Для получения оценок различных вариантов новых организационных конфигураций пожарно-спасательных подразделений выполнены оценки постоянных и переменных (зависящих от количества вызовов) затрат.

С учетом статистических или расчетных данных, модель платежей на содержание одной ПСЧ минимального состава имеет (соответственно в годовом и месячном исчислении) следующий вид:

$$S_r = 6075 + 3,2m_k, \quad [\text{тыс. руб.}]; \quad (18)$$

$$S_M = 506,25 + 3,2m_k, \quad [\text{тыс. руб.}], \quad (19)$$

где  $m_k$  - количество вызовов, обслуживаемых одной ПСЧ или КПП; первое слагаемое отражает постоянные издержки, второе - переменные, зависящие от количества обслуживаемых вызовов.

В работе рассмотрены 4 варианта использования страховых средств для материально-технического обеспечения пожарно-спасательных подразделений с привлечением лизинга и аутсорсинга:

Вариант 1: На страховые средства производится закупка новой пожарной техники (всего парка ГПС).

Вариант 2: На страховые средства производится переоснащение новой пожарной техникой (всего парка ГПС) по договорам лизинга.

Вариант 3: На страховые средства (в части  $S_{MTO}$ ), оснащаются КПП которые привлекаются на ликвидацию пожаров по аутсорсингу (для

реагирования по вызовам низкого ранга (ранг 1)), где поток вызовов ( $m$ ) распределяется между ГПС ( $m_r$ ) и КПП ( $m_k$ ).

**Вариант 4:** Он основан на использовании страховых средств как для обновления пожарной техники ГПС, так и на оснащение и обновление пожарной техники КПП, а также на обеспечение работоспособности КПП, в том числе на переменные издержки при обслуживании вызовов (рисунок 20). В организационной схеме этого варианта для обеспечения ликвидации пожаров используются технологии страхования, лизинга и аутсорсинга.

По полученным оценкам, для обеспечения  $S_{MTO} = 90$  млрд. руб. достаточно установить налог на обеспечение пожарной безопасности в объеме  $\delta_M = 0,679\%$  от среднедушевого дохода. Такой сбор будет обеспечен в течение одного года. На основании построенных моделей получено выражение для зависимости количества лет ( $G$ ), необходимых для получения суммы объемом  $S_{MTO}$  (графически представлено на рисунке 21):

$$G = \frac{S_{MTO}}{S_{MTO,Г}} = \frac{S_{MTO}}{-21,754 + 164,55\delta_M}. \quad (20)$$

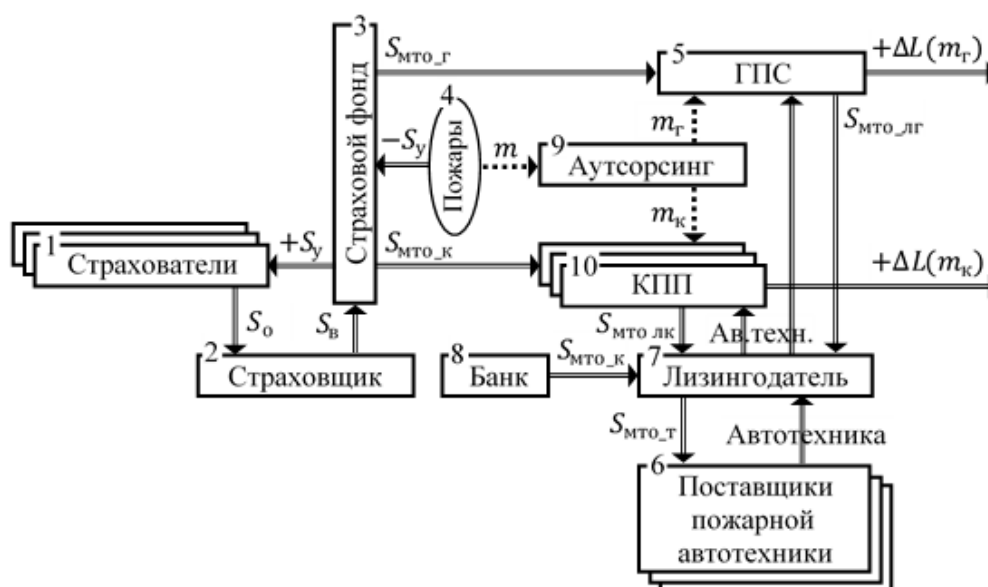


Рисунок 20 - Схема комплексного страхового обеспечения организации ликвидации пожара

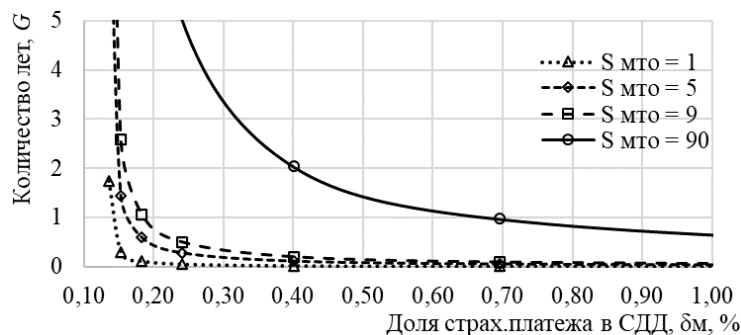


Рисунок 21 - Количество лет, необходимое для получения  $S_{MTO}$

Выражение (20) позволяет планировать страховые сборы в зависимости от необходимой суммы  $S_{\text{мто}}$  и допустимого уровня страховой нагрузки на страхователей  $\delta_{\text{м}}$ .

В Приложение вынесены исходные данные для моделирования транспортной задачи, алгоритм решения обратной задачи линейного программирования, акты о внедрении результатов исследования и свидетельства Роспатента о регистрации программ для ЭВМ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленной в работе научной проблемы получены следующие теоретические и практические результаты.

1. Выявлены ситуации, возникающие в процессе управления ликвидацией пожаров, в которых при формировании управленческих решений целесообразно использовать оптимизационные математические модели, которые, *в отличие от традиционных применений*, предложено обучать по данным эффективного принятия решений руководителями соответствующих уровней или группами экспертов. В качестве моделей, структурно адекватных процедурам принятия решений при управлении ликвидацией пожаров и ЧС, приняты: модели распределения ресурсов на основе задачи линейного программирования и транспортной задачи; управляемые марковские цепи; игры с природой; модели принятия решений в условиях риска и неопределенности. Предложенная двухконтурная схема принятия управленческих решений позволяет проводить обучение моделей как по размеченным ретроспективным данным, так и в режиме деловой игры или учений в темпе, удобном для ЛПР.

2. Обоснована необходимость использования обучаемых моделей в составе математического обеспечения систем поддержки принятия управленческих решений, где модели, *в отличие от традиционных технологий*, могут обеспечивать лицу, принимающему решения, функциональность в широком диапазоне – от мониторинга до автоматического управления.

3. Установлено, что важными элементами, определяющими эффективность выбора управленческих решений при распределении ограниченных ресурсов, являются персональные характеристики ЛПР, такие как разрешающая и пропускная способности, что позволяет в системах поддержки принятия решений, *в отличие от традиционных подходов*, выявлять и использовать эти персональные характеристики для обеспечения согласованного с предпочтениями ЛПР режима управления. Оценивать персональные характеристики ЛПР следует с использованием экспертных процедур и методов оптимального планирования эксперимента, что обеспечит максимально быструю сходимость оценок.

4. Предложено формировать управленческие решения по трехшаговой схеме: выявлять персональные характеристики ЛПР, идентифицировать предпочтения ЛПР, формировать варианты решений на основе обученных оптимизационных моделей (транспортных, марковских, игровых), что *в отличие от традиционного использования моделей* в системах управления, позволяет отделить управленческий опыт ЛПР от него самого и эффективно его

использовать другими лицами как для управления, так и для обучения и/или мониторинга уровня подготовки других ЛПР.

5. Обоснована необходимость двухконтурного управления с использованием машинообучаемых оптимизационных моделей в составе информационно-управляющих систем МЧС, что *в отличие от традиционных человеко-машинных систем*, позволяет использовать модель в качестве элемента, согласующего высокую скорость обработки данных информационно-вычислительной частью с низкой скоростью и ограниченной пропускной способностью ЛПР, что крайне важно при управлении быстропротекающими процессами развития пожара и ЧС.

6. Для задачи распределения сил и средств при одновременных вызовах на основе использования транспортной модели и методов экспертного оценивания вычислены оценки повышения эффективности управления ликвидацией пожаров *за счет применения машинообучаемых транспортных моделей* в контуре управления, которые составили для количества погибших в пожарах свыше 32% (т.е. сокращение на 1,76 человек погибших в 100 пожарах) и около 23% для прямого материального ущерба (т.е. сокращение на 36,48 тыс. руб. на один пожар).

7. Предложенный рекуррентный алгоритм обработки пожарной статистики, реализующий машинное обучение марковской модели фаз развития пожара, *позволил построить адекватную модель*, по которой появилась возможность оценивать как общую продолжительность ликвидации пожара, так и время завершения той или иной фазы для заданного уровня доверительной вероятности. В результате имитационных экспериментов на марковской модели, построенной по реальным статистическим данным о пожарах, показано, что наиболее эффективными интервалами контроля развития и управления ликвидацией пожара, являются интервалы от 1 до 5 минут.

8. Формализована задача управления выбором ранга пожара на основе расширенного вида марковских моделей - управляемых марковских цепей (УМЦ). Предложен алгоритм выбора оптимального ранга пожара на основе УМЦ, машинное обучения которых выполняется путем решения обратной задачи с использованием построенного рекуррентного алгоритма оценивания параметров модели. Предложенный алгоритм, *в отличие от других способов использования УМЦ*, позволяет учесть позитивный опыт ЛПР в управлении ликвидацией пожаров.

9. Разработан алгоритм машинного обучения матричных игр с природой, используемых для поддержки принятия решений при управлении эвакуацией людей из горящего здания. Алгоритм обучения игровых моделей построен на основе решения обратных задач, позволяющий, *в отличие от традиционных технологий использования моделей в системах поддержки принятия решений*, адаптироваться к системе предпочтений опытных ЛПР. Предложена рекуррентная процедура оценивания элементов платежных матриц игр с природой по статистическим данным наблюдений за принятием решений в аналогичных ситуациях в прошлом.

10. Анализ текущего состояния применения робототехнических систем при ликвидации пожаров и ЧС показал высокую в них потребность, вызванную необходимостью снижения риска травмирования или гибели личного состава в случаях пожаров или ЧС повышенной опасности при химическом или радиационном заражении зоны ликвидации.

Предложен ряд адаптивных машинообучаемых моделей управления мультиагентной робототехнической системой (МРТС), в том числе:

- модель оптимального планирования работ в МРТС, построенная на основе решения обратной задачи линейного программирования;
- модель оптимального адаптивного распределения заданий в группе автономных роботов;
- модель оптимального управления роботом разведки на основе использования адаптивных управляемых марковских цепей.

Предложен алгоритм оценивания степени склонности к риску ЛПР-оператора, обучающего РТС, что дает инструмент для селектирования операторов - учителей роботов, применяемых при ликвидации пожаров и ЧС.

Предложен подход и соответствующий алгоритм решения задач концептуального проектирования систем мониторинга пожароопасной обстановки на основе использования автономных БПЛА.

11. Предложен ряд инструментов, основанных на риск-ориентированном подходе и направленных на повышение эффективности мониторинга готовности к ликвидации пожаров и ЧС в РСЧС, как сложной организационно-техническими системе. В рамках такого подхода появляется возможность организации превентивного (проактивного) управления, направленного на предотвращение отклонения ключевых показателей от нормы - управление по возмущениям, *в отличие от традиционного управления по отклонениям*. Показано, что в структуре РСЧС таким инструментом может стать система внутреннего контроля (СВК), интегрированная в АИУС и позволяющая всем уровням иерархии управления иметь текущие оценки рисков и состояния элементов системы контроля. Предложена система тестов, выполняемых в форме экспертных процедур, с последующей обработкой с учетом многокритериальности показателей, свертку которых предложено выполнять на основе метода идеальной точки.

По результатам тестирования для некоторых сценариев реагирования построены регрессионные и нейросетевые модели показателей готовности.

В рамках риск-ориентированной технологии управления на основе моделей принятия решений в условиях риска и неопределенности, в частности модели Гурвица, предложен алгоритм выявления показателя склонности к риску ЛПР по наблюдениям за его решениями. Алгоритм может быть использован для мониторинга склонности к риску как в процессе управления, так и при обучении персонала.

12. Формализована задача страхового возмещения ущерба от пожаров. Приведенные оценочные расчеты, показывают, что страховое обременение даже всего трудоспособного населения России составит весьма незначительную



величину – 0,11% от среднедушевого дохода (по состоянию на конец 2018 года). Предложенная страховая схема возмещения позволит сэкономить государству в среднем около 22 млрд. руб. ежегодно. Для перевода на страховую модель механизмов государственной компенсации населению РФ ущерба от пожаров и ЧС, представляется целесообразным в дальнейшем расширить рассмотренную в работе страховую модель, добавив в нее, кроме пожаров и другие виды ЧС, придав ей комплексный характер. Подобные модели должны в дальнейшем стать составной частью и рабочим инструментом систем поддержки принятия решений на различных уровнях МЧС.

Кроме использования страховых механизмов для возмещения ущерба от пожаров предложены четыре варианта привлечения страховых средств и для материально-технического обеспечения деятельности пожарно-спасательных подразделений. В этих вариантах в разной степени используются механизмы страхования, лизинга и аутсорсинга. Показано, что в рамках приведенных вариантов страховая нагрузка на страхователей может быть существенно снижена (до десятых-сотых долей процента от величины среднедушевого дохода). Рассмотрены варианты обеспечения пожарно-спасательных подразделений не только традиционной автотехникой, но и современной инновационной техникой, материалами и технологиями, такими как пожарной робототехникой, беспилотными летательными аппаратами и др.

Таким образом, задачи разработки моделей и алгоритмов поддержки управления и организации ликвидации пожаров и ЧС решены и поставленные цели достигнуты.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Вилисов, В.Я. Система моделей для анализа и управления эффективностью реагирования подразделений противопожарной службы [Электронный ресурс] / В.Я. Вилисов, В.Л. Семиков, С.П. Алексеев // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 3 (85). – С. 65-76. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2019-3/04-03-19.ttb.pdf>.

2. Вилисов, В.Я. Статистический анализ зависимости показателей ущерба показателей ущерба от времени прибытия первого пожарного подразделения на пожар [Электронный ресурс] / В.Л. Семиков, С.П. Алексеев, В.Я. Вилисов // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 2 (84). – С. 72-83. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2019-2/02-02-19.ttb.pdf>.

3. Вилисов, В.Я. Нейросетевое моделирование эффективности реагирования на чрезвычайные ситуации в многоуровневой системе управления / Н.Г. Топольский, С.Ю. Бутузов, В.Я. Вилисов, В.Л. Семиков // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – № 2 (92). – С. 79-93. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2021-2/06-02-21.ttb.pdf>

4. Вилисов, В.Я. Применение марковских цепей для моделирования и прогнозирования развития пожара [Электронный ресурс] / В.Я. Вилисов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6881>.

5. Вилисов, В.Я. Оценка потенциала повышения эффективности реагирования пожарных подразделений за счет контроля их готовности [Электронный ресурс] / Н.Г. Топольский, В.Я. Вилисов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6895>.

6. Вилисов, В.Я. Применение экспертных оценок для распределения сил и средств на основе транспортной модели при одновременных вызовах на пожар [Электронный ресурс] / В.Я. Вилисов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6960>.

7. Вилисов, В.Я. Алгоритм оптимального планирования операций по ликвидации последствий пожаров и чрезвычайных ситуаций гетерогенной группой автономных мобильных роботов [Электронный ресурс] / Н.Г. Топольский, В.Я. Вилисов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6961>.

8. Вилисов, В.Я. Об оценивании эффективности применения транспортных моделей для управления ликвидацией пожаров [Электронный ресурс] / В.Я. Вилисов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 6. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7016>.

9. Вилисов, В.Я. Оценка вариантов применения страховых механизмов для повышения эффективности обеспечения пожарной безопасности [Электронный ресурс] / С.Ю. Бутузов, В.Я. Вилисов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 5. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6959>.

10. Вилисов, В.Я. Алгоритм концептуального проектирования системы мониторинга объекта коллаборативной мультиагентной робототехнической системой [Электронный ресурс] / Г.А. Филяев, В.Я. Вилисов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 5. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6965>.

11. Вилисов, В.Я. Алгоритм выявления предпочтений оператора, управляющего робототехнической системой в игровой среде / В.Я. Вилисов // Информационно-технологический вестник. – 2018. – № 1 (15). – С. 103-111.

12. Вилисов, В.Я. Машинное обучение распределению заданий в мультиагентной робототехнической системе при ликвидации чрезвычайных ситуаций / В.Я. Вилисов // Информационно-технологический вестник. – 2018. – № 2 (16). – С. 59-68.

13. Вилисов, В.Я. Транспортная модель, аппроксимирующая предпочтения ЛПР / В.Я. Вилисов // Прикладная информатика. – 2010. – № 6 (30). – С. 101-110.

14. Вилисов, В.Я. Анализ транспортной модели с аппроксимацией предпочтений ЛПП / В.Я. Вилисов // Прикладная информатика. – 2012. – № 3 (39). – С. 100-108.

15. Вилисов, В.Я. Применение принципов оптимального планирования эксперимента при разработке процедур выбора управленческих решений на предприятии / В.Я. Вилисов // Заводская лаборатория. – 2010. – № 5. – Т. 76. – С. 60-65.

16. Vilisov, V.Ya. Modelling the Risk Degree when Managing Emergency Situation Liquidation [Электронный ресурс] / V.Ya. Vilisov // Proceedings of the 2018 Eleventh International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). – М.: IEEE, 2018. – pp. 1-5. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551903>.

17. Vilisov, V.Ya. Internal control tools used within hierarchical organizational structures [Электронный ресурс] / V.Ya. Vilisov // Proceedings of the 10th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). – М.: IEEE. – 2017. – pp. 1-5. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8109705/>.

18. Vilisov, V.Ya. Risk Proneness Estimation Method Developed in Relation to the Decision Taker that Controls the Robotic System [Электронный ресурс] / V.Ya. Vilisov // N.Y.: Cornell University Library. – 2017. – Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1703/1703.06161.pdf>.

19. Vilisov, V.Ya. Analysis of Transport Model that Approximates Decision Taker's Preferences [Электронный ресурс] / V.Ya. Vilisov // N.Y.: Cornell University Library. – 2015. – Режим доступа: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1509/1509.01815.pdf>.

20. Vilisov, V.Ya. Learning Mobile Robot Based on Adaptive Controlled Markov Chains [Электронный ресурс] / V.Ya. Vilisov // N.Y.: Cornell University Library. – 2015. – Режим доступа: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1509/1509.01569.pdf>.

21. Vilisov, V.Ya. Research of the Robot's Learning Effectiveness in the Changing Environment [Электронный ресурс] / V.Ya. Vilisov // N.Y.: Cornell University Library. – 2015. – Режим доступа: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1509/1509.01553.pdf>.

22. Вилисов, В.Я. Моделирование уровня риска решений, принимаемых при управлении ликвидацией пожаров / В.Я. Вилисов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. – 2019. – № 28 (3). – С. 36-49.

### Монографии

23. Вилисов, В.Я. Информационно-аналитические модели поддержки управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций / Н.Г. Топольский, С.Ю. Бутузов, В.Я. Вилисов. – М.: АГПС МЧС России. – 2021. – 216 с.

24. Вилисов, В.Я. Методы, модели и алгоритмы в системах безопасности: машинное обучение, робототехника, страхование, риски, контроль / Н.Г. Топольский, В.Я. Вилисов. М.: РИОР. – 2021. – 475 с.

25. Вилисов, В.Я. Адаптивный выбор управленческих решений / В.Я. Вилисов. - Саарбрюкен. – LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2011. – 376 с.

26. Вилисов, В.Я. Инструменты внутреннего контроля / В.Я. Вилисов, И.Е. Суков. – М.: ИНФРА-М. – 2016. – 262 с.

#### **Программы для ЭВМ, зарегистрированные в Роспатенте**

27. Вилисов, В.Я. Программа машинного обучения марковской модели для прогнозирования развития пожара: Роспатент: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615411 от 07.04.2021 / Автор и правообладатель В.Я. Вилисов. – Заявка № 1122969616 от 28.03.2021.

28. Вилисов, В.Я. Искусственная нейронная сеть для оценки эффективности реагирования в многоуровневой системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: Роспатент: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615358 от 07.04.2021 / Автор и правообладатель В.Я. Вилисов. – Заявка № 2021614405 от 29.03.2021.

29. Вилисов, В.Я. Программный комплекс распределения ресурсов пожарных подразделений при одновременных вызовах, построенный на основе машинообучаемой транспортной модели: Роспатент: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615359 от 07.04.2021 / Автор и правообладатель В.Я. Вилисов. – Заявка № 2021614406 от 29.03.2021.

30. Вилисов, В.Я. Программный комплекс интерактивного тестирования готовности к реагированию пожарного подразделения: Роспатент: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615594 от 09.04.2021 / Автор и правообладатель В.Я. Вилисов. – Заявка № 2021614371 от 30.03.2021.

31. Вилисов, В.Я. Программа оценивания вариантов страхования пожарных рисков: Роспатент: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615455 от 08.04.2021 / Автор и правообладатель В.Я. Вилисов. – Заявка № 2021614586 от 30.03.2021.

32. Вилисов, В.Я. Программный комплекс выбора оптимальных параметров мультиагентной коллаборативной робототехнической системой на основе имитационного моделирования: Роспатент: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616709 от 26.04.2021 / Автор и правообладатель В.Я. Вилисов. – Заявка № 2021615863 от 17.04.2021.

33. Вилисов, В.Я. Программный комплекс концептуального проектирования системы мониторинга пожароопасного района мультиагентной робототехнической системой: Роспатент: свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ № 2021617292 от 13.05.2021 / Автор и правообладатель В.Я. Вилисов. – Заявка № 2021615869 от 16.04.2021.

### Публикации в других изданиях

34. Вилисов, В.Я. Алгоритм оптимального распределения ограниченных ресурсов на основе метода игровых итераций / В.Я. Вилисов // Информационно-технологический вестник. – 2019. – № 2 (20). – С. 89-99.

35. Вилисов, В.Я. Моделирование позиции оператора, управляющего роботом / В.Я. Вилисов // Информационно-технологический вестник. – 2016. – № 4 (10). – С. 48-55.

36. Вилисов, В.Я. Марковская модель обучения робота целесообразному поведению / В.Я. Вилисов // Информационно-технологический вестник. – 2015. – № 4 (6). – С. 11-18.

37. Вилисов, В.Я. Анализ динамики обучения робота в условиях нестационарности критериев / В.Я. Вилисов // Информационно-технологический вестник. – 2014. – № 2 (2). – С. 34-39.

38. Вилисов, В.Я. Адаптивная транспортная логистическая модель / В.Я. Вилисов, Сабо С.Е. // Информационно-технологический вестник. – 2014. – № 2 (2). – С. 40-45.

39. Вилисов, В.Я. Экономико-математические оценки концепции страхового обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях / В.Я. Вилисов, С.Ю. Бутузов // Вопросы региональной экономики. – 2019. – № 2 (39). – С. 149-157.

40. Вилисов, В.Я. Подходы и технологии хранения актуальных знаний в организационно-технических системах / В.Я. Вилисов, Б.А. Лагоша // Вопросы региональной экономики. – 2011. – № 1. – С. 51-63.

41. Вилисов, В.Я. Адаптивные модели как вариант хранения актуальных знаний в системе управления предприятием / В.Я. Вилисов, Б.А. Лагоша // Вопросы региональной экономики. – 2011. – № 2. – С. 65-73.

42. Вилисов, В.Я. Экспертные оценки в управлении аутсорсингом инновационного продукта / В.Я. Вилисов, С.В. Банк, Е.С. Сорокина // РИСК. – 2016. – № 1. – С. 81-84.

43. Вилисов, В.Я. Модели оптимального планирования проверок подведомственных организаций / В.Я. Вилисов // Russian Journal of Management. – 2017. – Вып. 2. – Т. 5. – С. 299-305.

44. Vilisov, V.Ya. Robot Training Under Conditions of Incomplete Information [Электронный ресурс] / V.Ya. Vilisov // N.Y.: Cornell University Library. – 2014. – Режим доступа: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1402/1402.2996.pdf>.

45. Vilisov, V.Ya. Limited Resource Optimal Distribution Algorithm Based on Game Iteration Method [Электронный ресурс] / V.Ya. Vilisov // N.Y.: Cornell University Library. – 2019. – Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1905/1905.05707.pdf>.

46. Вилисов, В.Я. Оценка страхового обеспечения пожарной безопасности / В.Я. Вилисов, Н.Г. Топольский // Матер. XV междунар. науч.-

практ. конф. «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы». – В 2-х томах. – Т. 1. – Ч.1. – Минск: УГЗ, 2021. – С. 49-52.

47. Вилисов, В.Я. Оптимальное распределение сил и средств при одновременных вызовах на пожары / В.Я. Вилисов // Матер. IV междунар. науч.-практ. конф. «Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности». – СПб.: ФГБОУ ВО СПб. ун-т ГПС МЧС России, 2021. – Т. 1. – С. 54-58.

48. Вилисов, В.Я. Имитационная модель взаимодействия двух роботов в общей операционной среде / В.Я. Вилисов, Б.Ю. Мурашкин, А.И. Куликов // Труды 30-й междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». – 2019. – СПб.: И-ПК Гангут. – С. 473-476.

49. Вилисов, В.Я. Обучение робототехнической системы оптимальному поведению в условиях противодействия // Труды 28-й междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». – 2017. – СПб.: И-ПК Гангут. – С. 52-55.

50. Вилисов, В.Я. Метод оценивания склонности к риску ЛПР, управляющего робототехнической системой / В.Я. Вилисов // Труды 27-й междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». – 2016. – СПб.: Политехника-Сервис. – С. 109-118.

51. Вилисов, В.Я. Обучение мобильного робота на основе адаптивных управляемых марковских цепей / В.Я. Вилисов // Труды 26-й междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». – СПб.: Политехника-Сервис. – 2015. – С. 94-104.

52. Вилисов, В.Я. Анализ эффективности обучения роботов в условиях целевой нестационарности / В.Я. Вилисов // Труды XI Международной науч.-техн. конф. «Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины»: сб. научн. ст. в 2 частях. – Ч. 2. – 2014. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – С. 282-287.

53. Вилисов, В.Я. Исследование эффективности обучения робота в условиях изменяющихся критериев / В.Я. Вилисов // Труды 25-й междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». – 2014. – СПб.: Политехника-Сервис. – С. 274-280.

54. Вилисов, В.Я. Обучение робота в условиях неполной информации / В.Я. Вилисов // Труды VII междунар. симпоз. «Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды». – 2013. – СПб.: Политехника-Сервис. – С. 342-354.

55. Вилисов, В.Я. Об алгоритмах адаптации робота к целевым предпочтениям ЛПР / В.Я. Вилисов // Труды 23-й Всероссийской науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». – 2012. – СПб.: Политехника-Сервис. – С. 120-126.

56. Vilisov, V.Ya. Simulation Model of Two-Robot Cooperation in Common Operating Environment / V.Ya. Vilisov, B.Yu. Murashkin, A.I. Kulikov // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. - SntPb.: IPK Gangut Publ., 2019. – pp. 535-541.

57. Вилисов, В.Я. Методология выбора управленческих решений в условиях неопределенности / В.Я. Вилисов // Матер. семинара «Проблемы моделирования развития производственных систем». – М.: ЦЭМИ РАН. – №. 3.– 2008. – С. 22-27.

58. Вилисов, В.Я. Об оценке уровня риска решений, принятых в чрезвычайных ситуациях / В.Я. Вилисов // Матер. XI междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2018»). – М.: ИПУ РАН. – 2018. – Т. 2. – С. 228-230.

59. Вилисов, В.Я. Применение марковских цепей для прогнозирования развития пожара / В.Я. Вилисов, А.В. Вилисова // Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы обеспечения безопасности» (Безопасность – 2021). – Уфа: РИК УГАТУ. – 2021. – Т. 1.– С. 103-108.

60. Вилисов, В.Я. Оценивание риска решений при ликвидации пожаров / Н.Г. Топольский, В.Я. Вилисов // Матер. 25-й междунар. науч.-техн. конф. «Системы безопасности – 2016». – М.: АГПС МЧС России, 2016. – С. 618-622.

61. Вилисов, В.Я. Прогнозирование фаз развития и тушения пожара на основе марковской цепи / Н.Г. Топольский, В.Я. Вилисов // Матер. 25-й междунар. науч.-техн. конф. «Системы безопасности – 2016». – М.: АГПС МЧС России, 2016. – С. 623-628.

62. Вилисов, В.Я. Статистический анализ взаимосвязей характеристик пожаров / В.Я. Вилисов // Матер. 19-й междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности «Дальневосточная весна – 2021». Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО КнАГУ. – 2021. – С. 233-235.

63. Вилисов, В.Я. Планирование операций по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций гетерогенной группой автономных мобильных роботов / Н.Г. Топольский, В.Я. Вилисов // Труды 32-й междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». – 2021. – СПб.: РА Фортуна. – С. 121-123.

64. Вилисов, В.Я. Технология концептуального проектирования системы мониторинга мультиагентной робототехнической системой / В.Я. Вилисов, Г.А. Филяев // Труды 32-й междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника». – 2021. – СПб.: РА Фортуна. – С. 123-125.

65. Вилисов, В.Я. Статистический анализ зависимости показателей удельного ущерба от интенсивности потока пожаров / В.Я. Вилисов // Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. – 2021. – г. Железногорск, 2021. – С. 303-309.

66. Вилисов В.Я. Планирование операций по ликвидации последствий пожаров и чрезвычайных ситуаций группой автономных мобильных роботов // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Технологии ликвидации чрезвычайных ситуаций». – Минск: УГЗ, 2021. – 206 с. – С. 21-22.

67. Вилисов В.Я., Топольский Н.Г. Модели, методы и алгоритмы информационно-аналитической поддержки принятия решений по распределению сил и средств при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций / В.Я. Вилисов, Н.Г. Топольский // Сб. научн. статей «Автоматизированные системы и средства предотвращения и ликвидации

пожаров и чрезвычайных ситуаций», под ред. В.С. Бутко, М.В. Алешкова, Н.Г. Топольского. – М.: АГПС МЧС России, 2020. – С. 512-527.