

*На правах рукописи*



Постернак Евгений Валерьевич

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ОБЪЕМОВ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ УЩЕРБА ОТ  
ПРИРОДНЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С УЧЕТОМ  
СОЦИАЛЬНО-ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Специальность – 3.2.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях  
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном военном образовательном учреждении высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика».

Научный руководитель:	Рыбаков Анатолий Валерьевич, профессор, доктор технических наук, начальник научно-исследовательского центра ФГБВОУ ВО «Академия Гражданской Защиты МЧС России»
Официальные оппоненты:	Аникин Игорь Вячеславович доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем информационной безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева - КАИ  Белоусов Роман Леонидович кандидат технических наук, офицер отдела оперативного моделирования чрезвычайных ситуаций Главного управления «Национальный центр управления в кризисных ситуациях» МЧС России
Ведущая организация:	ФГБВОУ ВО Ивановская Пожарно-Спасательная Академия ГПС МЧС России, г. Иваново

Защита состоится «16» декабря 2025 года в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 99.2.118.02, созданного на базе ФГБВОУ ВО «КНИТУ-КАИ» и ФГБВОУ ВО «Академии гражданской защиты МЧС России» по адресу: 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10 (аудитория 217 ).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, Ученому секретарю диссертационного совета 99.2.118.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБВОУ ВО «КНИТУ-КАИ» и на сайте <https://kai.ru/dissertations>.

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2025 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 99.2.118.02,  
канд. техн. наук, доцент

А.И. Шакирова

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы наблюдается рост масштабов природных чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС), сопровождающихся значительными человеческими жертвами и экономическим ущербом. В 2021 году ущерб от природных ЧС в России составил 44,6 млрд. руб., пострадало 47,7 тыс. человек – показатели превысили данные 2020 года. При этом эффективность спасательных мероприятий снизилась, что указывает на недостаточность существующих мер защиты населения.

Снижение ущерба требует краткосрочного прогнозирования последствий и оперативного планирования инженерно-технических мероприятий (далее – ИТМ). Современные средства мониторинга позволяют заранее спрогнозировать параметры бедствия и выделить время для превентивных действий. Однако решения о масштабах ИТМ часто принимаются по усредненным нормативам или экспертно, без учета конкретных условий, что ведет к перерасходу ресурсов или недооценке угрозы.

Особую роль играет учет социально-демографических факторов. В уязвимых сообществах даже бедствия средней силы вызывают непропорционально большие потери, но традиционные модели риска концентрируются преимущественно на физических параметрах явления. Это снижает точность прогнозов и приводит к ошибкам в определении потребности в ресурсах.

Под уязвимостью территории в настоящем исследовании понимается совокупность социально-демографических, инфраструктурных и социально-экономических характеристик, определяющих степень подверженности населения последствиям чрезвычайных ситуаций.

Таким образом, актуально создание научно-методического аппарата, который, опираясь на краткосрочный прогноз ущерба и социально-демографические характеристики территории, позволит обосновывать рациональные объемы ИТМ для минимизации последствий ЧС в условиях ограниченных ресурсов.

Диссертационная работа посвящена разработке научно-методического аппарата обоснования рациональных объемов инженерно-технических мероприятий при краткосрочном прогнозировании ущерба от природных чрезвычайных ситуаций. Исследование ориентировано на интеграцию метеорологических данных и социально-демографических факторов уязвимости территории в модели прогнозирования последствий, а также на формализацию оптимизации объемов сил и средств реагирования в условиях ограниченных ресурсов.

Противоречие и научная гипотеза. В практике управления ЧС выявлено ключевое противоречие: с одной стороны, для минимизации ущерба теоретически следует применять максимально возможный комплекс мер защиты (полная эвакуация, мобилизация всех сил и средств и т.п.), но с другой – ресурсы всегда ограничены (финансы, время на подготовку, доступные люди и техника). Необходимо находить компромисс между уровнем защиты и доступными ресурсами. Для разрешения этого противоречия выдвинута научная гипотеза: рациональные (оптимальные) объемы ИТМ при угрозе природной ЧС могут быть обоснованы на основе кратко-

срочного прогноза ожидаемого ущерба, учитывающего ключевые социально-демографические факторы уязвимости территории. Интеграция характеристик населения (плотность, возрастная структура, подготовленность и др.) в модель прогнозирования последствий позволит повысить точность оценки ущерба. Таким образом, гипотеза утверждает, что совместное использование прогнозной модели ущерба и модели оптимизации мер реагирования обеспечивает достижение баланса между эффективной защитой и ресурсными ограничениями.

Объект исследования – чрезвычайные ситуации природного характера, вызванные опасными метеорологическими явлениями.

Предмет исследования – объемы ИТМ, направленных на предотвращение и ликвидацию последствий таких природных ЧС. Под объемами ИТМ понимаются количественные показатели реализуемых мер защиты: сколько сил и средств привлечено.

Цель исследования – снижение ущерба от природных катастроф за счет научно обоснованного определения рациональных объемов ИТМ с учетом социально-демографических факторов и существующих ресурсных ограничений.

Общая формулировка задачи – разработка научно-методического аппарата обоснования рациональных объемов инженерно-технических мероприятий при краткосрочном прогнозировании ущерба от природных чрезвычайных ситуаций с учетом социально-демографических факторов в условиях ограниченных ресурсов и вариативных характеристик территорий.

Для достижения указанной цели были сформулированы и решены следующие задачи исследования:

- проанализировать современные подходы к прогнозированию ущерба от природных ЧС и планированию ИТМ, выявить степень учета социально-демографических факторов и существующие недостатки;
- сформулировать и формализовать научную задачу обоснования рациональных объемов ИТМ в виде оптимизационной модели, учитывающей совокупные потери и ресурсные ограничения;
- разработать научно-методический аппарат, включающий модель краткосрочного прогноза ущерба и модели расчета потребности в силах и средствах, объединенные в единый комплекс;
- провести вычислительный эксперимент, оценить точность прогноза ущерба и эффективность планирования ИТМ по сравнению с традиционными методами;
- подготовить методические рекомендации по практическому применению результатов и внедрению риск-ориентированного планирования мероприятий гражданской защиты.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы прогнозирования ЧС и оценки ущерба рассмотрены в работах А.М. Гришечкина и С.О. Потапова по методам прогнозирования техногенных и природных ЧС с использованием статистических моделей и анализа тенденций. В трудах С.В. Горбунова, Ю.Д. Макиева и В.П. Малышева раскрыты технологии мониторинга и прогнозирования ЧС природного и техногенного характера. В области прогнозирования опасностей и оценки

рисков известна работа А.С. Хадзегова и В.П. Крейтора по методам прогнозирования природных и техногенных угроз и динамики их последствий.

В статьях Н.М. Поляковой анализируются вопросы оптимизации процессов оперативного реагирования сил и средств в чрезвычайных ситуациях, включая распределение ресурсов при условиях ограничений и организацию логистики реагирования, с учетом того, что своевременная поддержка решений особенно важна на начальных стадиях.

Эти результаты дают важный фундамент в части распределения ресурсов в условиях ограничений, однако они недостаточно охватывают интеграцию прогноза ущерба с учетом демографической уязвимости населения и формализацию оптимальных объемов ИТМ.

Методы исследования. Методологическую основу исследования составили современные методы системного анализа, математического моделирования и интеллектуальной обработки данных. В работе использованы алгоритмы машинного обучения для построения прогнозных моделей ущерба и потребных ресурсов. Применены статистические методы оценки качества моделей: метрики средней абсолютной ошибки (далее – MAE), коэффициент детерминации (далее –  $R^2$ ) и методы оптимизации для обоснования оптимальных решений. Выполнена программная реализация разработанных моделей; для обработки данных применялись методы предобработки данных, генерации синтетических выборок и интерпретации моделей (далее – SHAP-анализ значимости признаков). Также использовались методы имитационного моделирования для экспериментальной проверки полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в разработке и реализации нового подхода к прогнозированию ущерба и планированию защитных мероприятий при природных ЧС с учетом факторов уязвимости населения. В рамках исследования получены следующие новые научные результаты:

- сформулирована научная задача обоснования рационального объема ИТМ и предложена оптимизационная модель, учитывающая социально-демографические характеристики и ресурсные ограничения;
- разработан комплекс моделей, интегрирующий прогноз ущерба и планирование ресурсов на основе метеорологических и демографических данных;
- предложены новые алгоритмы и методики, обеспечивающие более высокую точность прогноза ущерба и расчета ресурсов по сравнению с традиционными подходами;
- создан алгоритм формирования исходных данных, объединяющий сведения из отечественных и международных источников в единый обучающий набор, обеспечивающий полноту и согласованность информации.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в развитии научных основ принятия решений при природных ЧС через интеграцию прогноза ущерба и планирования защитных мер, а именно:

- построение алгоритма формирования верифицированной выборки, объединяющей метеорологические и социально-демографические показатели;

- разработка моделей краткосрочного прогноза ущерба и расчета потребности в ресурсах, учитывающих демографическую уязвимость и ограничения;
- создание методики выбора и оценки алгоритмов машинного обучения, включая использование SHAP для анализа вклада факторов.

Практическая значимость работы заключается в создании научно-методического аппарата, позволяющего повысить эффективность планирования и проведения мероприятий по защите населения при природных ЧС. На его основе может быть реализован программный модуль, автоматически формирующий оптимальный план реагирования с учетом прогнозируемого ущерба и характеристик территории. Применение такого инструмента обеспечивает обоснованное распределение ограниченных ресурсов, снижает человеческие и материальные потери, а также может использоваться при разработке нормативных и методических документов, способствуя переходу к риск-ориентированному управлению в системе гражданской защиты.

Внедрение результатов. Результаты диссертационного исследования внедрены в практическую деятельность Главного управления МЧС России по Республике Татарстан, а также использованы в учебном процессе ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России».

Личный вклад автора заключается в разработке алгоритма формирования верифицированной пространственно-временной выборки, создании совокупности моделей прогнозирования ущерба и расчета потребностей в ресурсах с учетом демографической уязвимости, предложении методики выбора и оценки алгоритмов машинного обучения с использованием SHAP-интерпретации, проведении вычислительных экспериментов и сравнительного анализа с существующими подходами. Автором подготовлены публикации, осуществлена апробация разработанных моделей и даны рекомендации по внедрению результатов исследования.

Основные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм формирования исходных данных для модели краткосрочного прогноза ущерба, интегрирующий природные и социально-демографические показатели, включающий агрегацию и унификацию источников, пространственно-временное сопоставление событий, обработку пропусков и выбросов, а также генерацию синтетических наблюдений;
- научно-методический аппарат прогнозирования и планирования, включающий комплекс моделей. Он объединяет прогноз ущерба и расчет потребностей в силах и средствах, интегрируя социально-демографические факторы в процесс оперативного прогнозирования последствий ЧС;
- методические рекомендации для органов управления ЧС, описывающие порядок применения разработанного аппарата – от интеграции данных до расчета оптимального плана реагирования.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются:

- использованием обширной эмпирической базы данных о природных ЧС и их последствиях, обеспечивающей репрезентативность и адекватность моделей реальным условиям;

- применением апробированных методов анализа данных и прогнозирования и статистических критериев оценки качества;
- учетом комплекса факторов риска – метеорологических, социально-демографических, что обеспечивает высокую обобщающую способность моделей;
- проведенной валидацией: включение социально-демографических факторов повышает точность прогноза, а оптимизация объемов ИТМ снижает совокупные потери;
- корректностью постановки ограничений и допущений в оптимизационной модели;
- апробацией результатов в научном сообществе – докладами на конференциях и публикациями в рецензируемых изданиях.

Апробация результатов. Основные положения исследования обсуждались на трех международных и всероссийских научно-практических конференциях по проблемам безопасности и управления в ЧС. По теме диссертации опубликовано 6 работ, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК и 3 материала конференций.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационного исследования соответствует п. 6 – Разработка научных основ создания и совершенствования систем и методов прогнозирования и мониторинга источников чрезвычайных ситуаций; п. 23. – Научное обоснование и разработка моделей управления, алгоритмов принятия решений на объектовом, региональном и федеральном уровнях по обеспечению безопасности в чрезвычайных ситуациях; п. 25. – Разработка и совершенствование методов получения и обработки информации, новых информационных технологий для решения задач управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях паспорта специальности 3.2.6.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых источников информации и приложения. Общий объем работы составляет 132 страницы машинописного текста, включая 15 таблиц и 21 рисунок. Структура диссертации отражает логику проведенных исследований. Приложение содержит акты внедрения.

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы посвящена комплексному анализу статистики ЧС различного происхождения, обзору современных отечественных и зарубежных подходов к прогнозированию ущерба, а также исследованию существующей практики планирования ИТМ, направленных на снижение последствий ЧС. В рамках главы проведено обобщение многолетних статистических данных по динамике возникновения природных и техногенных чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации и за рубежом, а также рассмотрены тенденции изменения их частоты, масштабов последствий и социально-экономических последствий.

На основе анализа официальной статистики МЧС России и международных баз данных показано, что наибольшую долю в общей структуре чрезвычайных ситуаций занимают техногенные происшествия, доля которых, по состоянию на 2021

год, составила около 49 % от общего числа зарегистрированных событий. Технологические чрезвычайные ситуации, как правило, ограничиваются локальными зонами воздействия и относительно меньшими масштабами ущерба, тогда как природные катастрофы характеризуются пространственной распространенностью, затрагивают обширные территории и населенные пункты, что обуславливает значительные человеческие потери и высокий уровень экономического ущерба.

Анализ динамики показателей за 2020–2021 гг. демонстрирует резкое ухудшение ситуации по ряду ключевых параметров, что наглядно отражено в таблице 1. Прежде всего, отмечен почти одиннадцатикратный рост числа пострадавших: если в 2020 году их количество составляло 4 366 человек, то уже в 2021 году данный показатель достиг 47 716 человек. Такой скачок свидетельствует о высокой интенсивности и масштабности природных катастроф, затронувших значительную часть территорий, включая населенные пункты с высокой плотностью застройки и недостаточно развитой инженерной защитой. Помимо этого, фиксируется увеличение продолжительности восстановительного периода после ЧС, что указывает на нарастающую нагрузку на региональные системы жизнеобеспечения и экстренные службы. Таким образом, подобная динамика наглядно подтверждает тенденцию к возрастанию уязвимости населения при воздействии природных катастроф и подчеркивает необходимость совершенствования существующих моделей прогнозирования ущерба и планирования инженерно-технических мероприятий.

Таблица 1 – Сравнение показателей ЧС природного характера за 2020 и 2021 года

Параметры	2020 г.	2021 г.	Процентная динамика	Количественная динамика
Доля от общего числа ЧС	31,4%	28,5%	Снижение на 2,9%	-
Количество ЧС	104	110	Увеличение на 5,8%	Увеличение на 6 ед.
Число погибших людей	4	24	Увеличение на 500%	Увеличение на 20 ед.
Число пострадавших людей	4 366 ед.	47 716 ед.	Увеличение на 992,9%	Увеличение на 43 350 ед.
Число спасенных людей	1 768 ед.	1 005 ед.	Уменьшение на 43,2%	Уменьшение на 763 ед.
Общий материальный ущерб	12 389,434 млн. руб.	44 590,865 млн. руб.	Увеличение на 259,9%	Увеличение на 32 201,431 млн. руб.

Рассмотрены современные подходы к прогнозированию ущерба. Проанализированы статистические модели, физические симуляции, методы геоинформационного моделирования, интегральные модели риска и инструменты искусственного интеллекта. Показано, что:

- статистические модели опираются на ретроспективные данные, но плохо адаптируются к изменяющимся условиям и не учитывают социально-демографическую специфику;
- физические модели позволяют детально прогнозировать параметры опасного явления (траектория урагана, уровень паводка и др.), но сами по себе не дают оценки социально-экономического ущерба;
- геоинформационные системы (далее – ГИС) эффективно выделяют зоны потенциального воздействия, однако ограничены в учете характеристик населения;
- интегральные модели риска позволяют ранжировать угрозы, но чувствительны к неопределенности входных данных и не дают детализированного сценария развития событий;
- методы искусственного интеллекта (далее – ИИ) обладают высокой точностью при наличии больших массивов данных и способны интегрировать природные и социально-демографические факторы.

Проведенный сравнительный анализ, таблица 2, показал, что существующие прогнозы часто существенно расходятся с фактическими данными: ошибка по опасным метеорологическим явлениям достигала 70 %, по селям и оползням – 60 %, по землетрясениям и извержениям вулканов – 100 %.

Таблица 2 – Оценка качества прогноза на 2021 год

Виды природных ЧС	Прогнозируемое значение за рассматриваемый период (шт.)	Факт (шт.)	Прогноз (шт.)	Ошибка (%)
Общее количество природных ЧС	<100	105	99	6,1
Землетрясение, извержение вулканов	<5	0	4	100
Отрыв прибрежных льдов	<18	2	17	88,2
Опасные гидрологические явления	≤30	28	30	6,7
Опасные метеорологические явления (сильные осадки, сильные ветер, смерч, крупный град)	<35	10	34	70,6

(Продолжение таблицы 2)

Сели, оползни, обвалы	$\leq 5$	2	5	60
Снежные лавины	$\leq 3$	3	3	0
Крупные природные пожары (без учета переходов на население пунктов)	$< 25$	24	24	0

Это указывает на неполноту учета факторов риска и необходимость интеграции социально-демографических характеристик в прогнозные модели.

Рассмотрена практика планирования ИТМ в системе гражданской защиты. Анализ показал, что обоснование объемов ИТМ сталкивается с рядом проблем. В большинстве случаев решения принимаются на основе усредненных нормативов или прошлых сценариев, что приводит к неэффективному распределению ресурсов.

Подробно рассмотрено влияние социально-демографических факторов на ущерб от ЧС, рисунок 1.

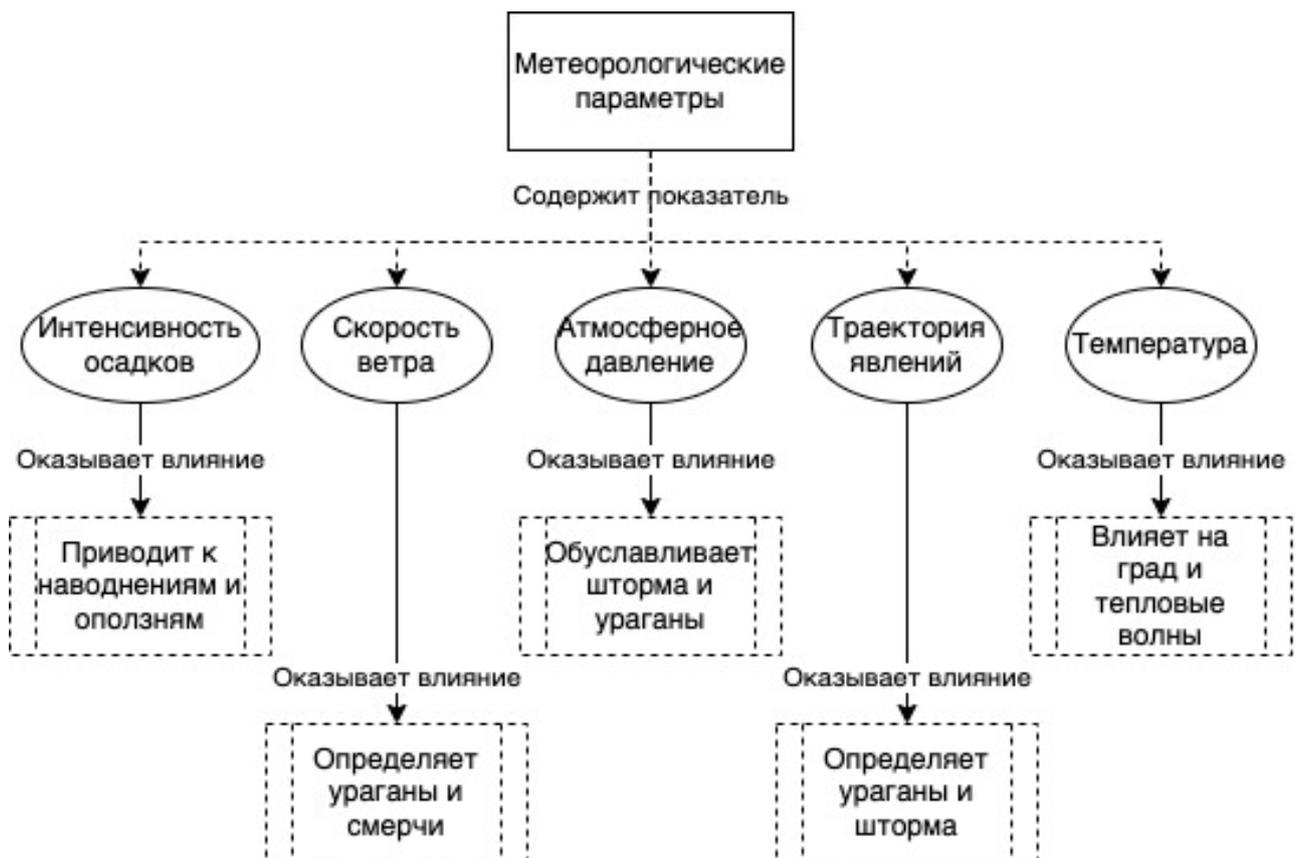


Рисунок 1 – Влияние метеорологических параметров на род и силу ЧС

Приведен обзор существующего научно-методического аппарата. Рассмотрены исследования в области анализа риска, оптимизации защитных мероприятий, мониторинга и поддержки принятия решений. Таким образом, выявлена научная

ниша: требуется методический аппарат, который интегрирует прогноз ущерба и оптимизацию защитных мер.

Формальная цель состоит в том, чтобы определить такие рациональные значения вектора  $R^* = (R_1^*, R_2^*, \dots, R_I^*)$ , при которых совокупный прогнозируемый ущерб минимизируется с учетом затрат на мероприятия. В виде оптимизационной модели задачу можно представить следующим образом, формула 1:

$$Z_{total}(M, A, t, R) = Z_{predicted}(M, A, t, R) + C(R, t) \xrightarrow{R} \min, \quad (1)$$

при ограничениях, формула 2:

$$\begin{cases} 0 \leq N_i \leq Z_{ri}, & i = 1, \dots, I \\ C(R, t) \leq C_{max} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $Z_{predicted}(M, A, t, R)$  – функция, выдающая прогнозируемый ущерб от ЧС при данных значениях факторов  $M, A$  и принятых мерах  $R$  (то есть модель ущерба, учитывающая влияние ИТМ) в момент времени  $t$ ;  $C(R, t)$  – совокупная стоимость выбранных мероприятий;  $Z_{ri}$  – верхняя граница ресурса для мероприятия  $i$  (например, максимум единиц, которые физически можно задействовать или максимальная реализуемая доля этого мероприятия);  $C_{max}$  – общий доступный объем финансовых ресурсов на все ИТМ.

В приведенной модели целевая функция  $Z_{total}$  состоит из прогнозируемых потерь и затрат на меры, фактически представляя суммарные издержки катастрофы. Критерий минимизации означает, что оптимальным признается такой вариант, где суммарный потенциальный ущерб минимален с учетом вложенных средств. Ограничения (2) накладывают естественные пределы:

- нельзя задействовать больше определенного количества каждого мероприятия ( $N_i \leq Z_{ri}$ );
- нельзя превысить общий бюджет  $C_{max}$ .

Таким образом, задача – найти  $R$  в допустимой области, минимизирующий  $Z_{total}$ .

В ходе исследования были сделаны следующие ключевые выводы и шаги:

- отмечено, что существующие методы прогнозирования и планирования не обеспечивают надлежащей точности и рациональности;
- выявлено ключевое противоречие между масштабом возможной защиты и ограниченностью ресурсов;
- обоснована гипотеза о возможности оптимизации объемов ИТМ на основе краткосрочного прогноза ущерба с учетом социально-демографических факторов;
- сформулирована основная научная задача исследования и ее оптимизационная модель.

Во второй главе представлен научно-методический аппарат обоснования объемов ИТМ при краткосрочном прогнозировании ущерба от природных ЧС с учетом социально-демографических факторов.

Разрабатываемый научно-методический аппарат основан на двухэтапном подходе, обеспечивающем последовательную взаимосвязь между прогнозом ущерба и планированием ИТМ для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного характера.

На первом этапе осуществляется краткосрочное прогнозирование ожидаемого ущерба от природной ЧС с применением методов машинного обучения, позволяющих интегрировать метеорологические, социально-демографические и инфраструктурные показатели. На втором этапе выполняется обоснование объемов ИТМ – расчет требуемых сил и технических средств, необходимых для минимизации прогнозируемого ущерба при заданных ресурсных ограничениях.

В состав рассматриваемой системы входят три взаимосвязанные модели:

- М-1 – модель краткосрочного прогноза прямого экономического ущерба;
- М-2 – модель оценки потребной численности сил реагирования;
- М-3 – модель определения необходимого количества технических средств.

Выходные данные модели М-1 служат входом для моделей М-2 и М-3. Такое построение обеспечивает последовательную передачу информации и формирует единый контур управления, в котором прогноз последствий напрямую определяет план реагирования.

На рисунке 2 представлена схема взаимодействия моделей. Она отражает последовательность вычислительных процедур: от поступления исходных данных и генерации прогноза ущерба до расчета оптимальных объемов сил и средств, необходимых для ликвидации последствий ЧС.

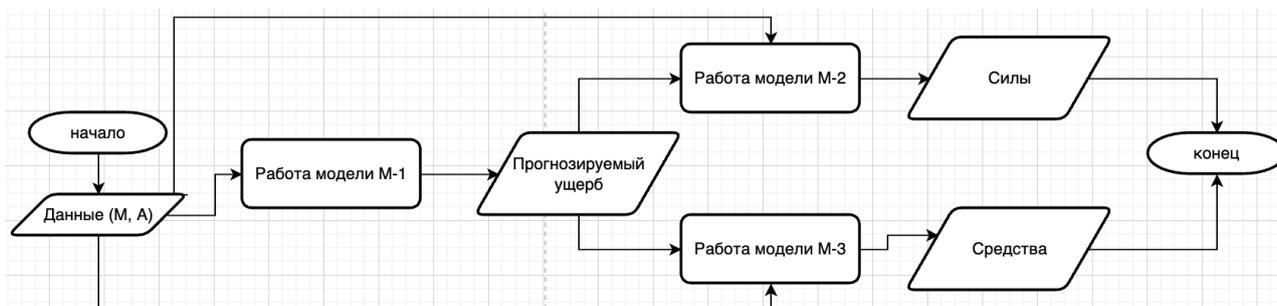


Рисунок 2 – Схема взаимодействия совокупности моделей М-1, М2-, М-3

На рисунке 3 показана логика функционирования полного научно-методического аппарата. Исходные данные из различных источников – оперативные сводки МЧС, метеорологические наблюдения, статистика EM-DAT, UNECE и социально-демографические показатели Росстата – поступают на этап интеграции и предобработки. Далее формируется унифицированный набор признаков, подаваемый в модель М-1, которая выдает прогноз ущерба. Полученное значение передается моделям М-2 и М-3 для расчета необходимых объемов сил и средств в соответствии с установленными ограничениями по ресурсам и времени реагирования. Процедура интеграции источников, выравнивания по региону и году.

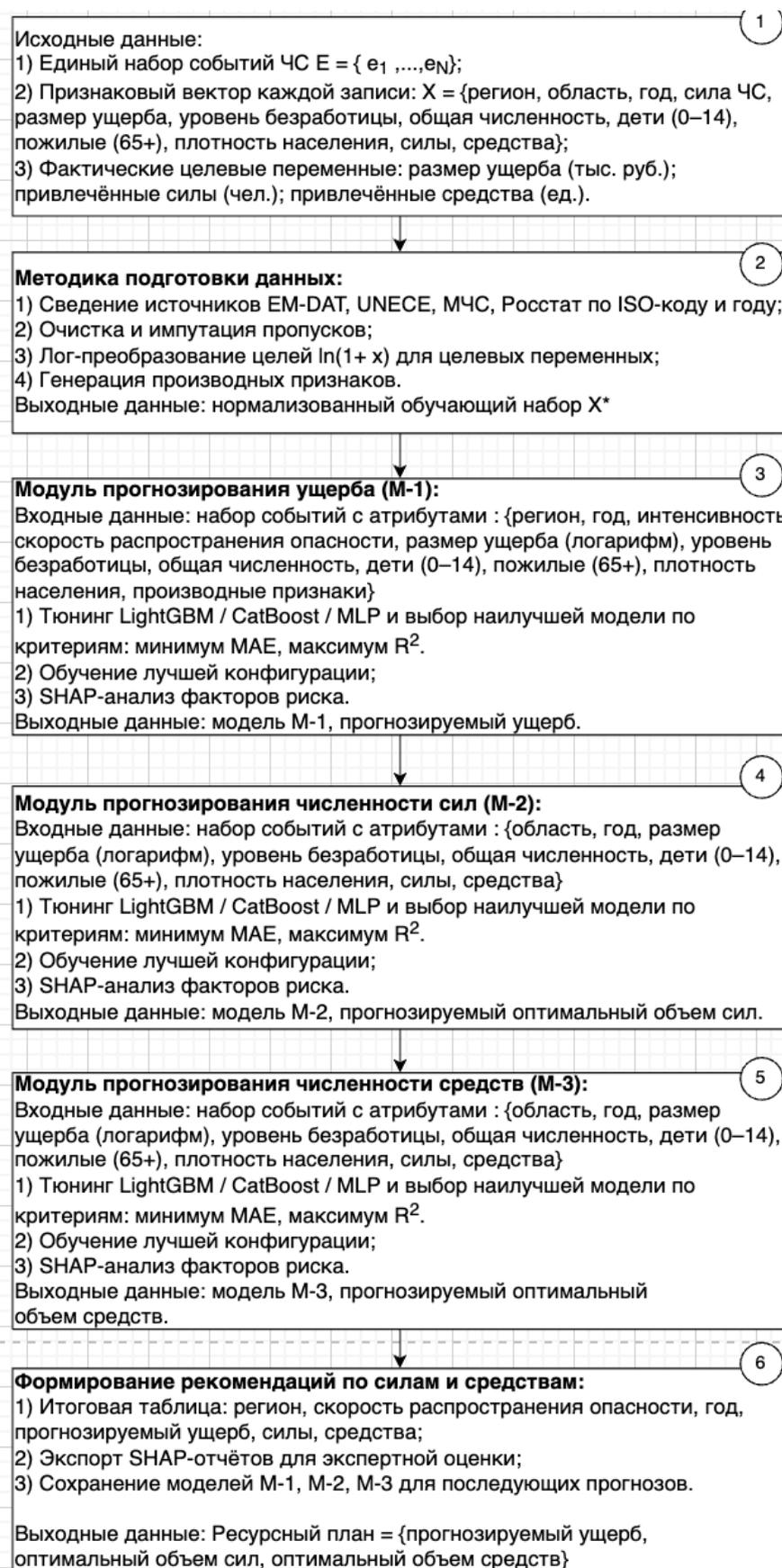


Рисунок 3 – Схема научно-методического аппарата краткосрочного прогнозирования ущерба от природных ЧС и обоснования объемов сил и средств с применением методов ML

Важным элементом является создание взаимодействующих признаков, отражающих нелинейные зависимости между природными и социально-демографическими факторами. Например, произведение интенсивности осадков на плотность населения позволяет выявить зоны потенциально наибольшего ущерба. Такие синтетические признаки формируют дополнительный слой данных, повышающий чувствительность модели к сложным эффектам взаимодействия факторов.

Алгоритм обработки данных включал несколько последовательных стадий:

- фильтрацию неполных и аномальных записей – удаление наблюдений с недостоверными или противоречивыми значениями, выявление выбросов по статистическим критериям;
- заполнение пропусков в допустимых пределах на основе средних значений по региону, временной интерполяции или генеративных методов синтетического дополнения;
- логарифмирование целевых переменных, что позволило снизить влияние экстремальных выбросов и приблизить распределение ущерба к нормальному виду;
- стандартизацию количественных признаков, обеспечившую сопоставимость масштабов показателей и устойчивость обучения моделей машинного обучения;
- разделение выборки на обучающую и тестовую части для проведения валидации и независимой оценки качества прогнозов.

Ограниченность наблюдений по редким и экстремальным событиям компенсирована синтетическим расширением выборки. Разработанная процедура предназначена для восполнения неполноты статистической выборки и повышения репрезентативности данных, используемых при обучении моделей М-1–М-3. Алгоритм включает следующие основные этапы: загрузку исходных реальных данных о ЧС, выбор и настройку модели генерации, обучение модели на реальных данных, последующую генерацию заданного числа синтетических записей, проверку согласованности распределений и формирование итогового массива данных. Контроль качества выполняется по критериям близости статистических характеристик и совместного распределения признаков.

Алгоритм генерации синтетических данных по чрезвычайным ситуациям приведен на рисунке 4.

Рассмотрены модели генерации табличных данных (далее – TVAE), Gaussian Copula и условная генеративно-сопоставительная сеть (далее – CTGAN). Сравнительная оценка качества воспроизведения многомерной структуры данных продемонстрировала преимущество CTGAN. Для записей, где известен ущерб, но отсутствуют сведения о фактических силах и средствах, сформирован вспомогательный регрессионный модуль на базе многослойного перцептрона (далее – MLP). В результате сформирован согласованный набор данных с единым составом признаков для всех подзадач.



Рисунок 4 – Алгоритм генерации синтетических данных по ЧС

Сводные результаты оценки качества моделей приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Оценка качества моделей для генерации синтетических данных по ущербу

Модель	Количество эпох, шт	Оценка формы распределения столбцов, %	Общий балл качества данных, %
TVAE	1000	53,99	46,92
TVAE	4000	49,61	43,35
GaussianCopula	1000	76,47	77,91
GaussianCopula	4000	76,50	77,92
CTGAN	1000	77,03	78,98
CTGAN	4000	78,65	79,58

Таблица 4 – Оценка качества моделей для генерации синтетических данных по силам и средствам

Модель	Количество эпох, шт	Оценка формы распределения столбцов, %	Общий балл качества данных, %
TVAE	4000	44,76	42,11
GaussianCopula	4000	75,23	74,22
CTGAN	4000	88,15	90,10

В результате выполнения всех этапов интеграции и генерации данных был сформирован итоговый обучающий набор, включающий несколько сотен наблюдений (с учетом синтетически дополненных записей) с унифицированным набором признаков. Каждая запись содержит совокупность параметров, описывающих природное явление, социально-демографические характеристики пострадавшей территории, а также сведения об инженерно-технических мероприятиях, задействованных при ликвидации последствий. Временной охват набора данных составляет порядка 30 лет, что обеспечивает статистическую устойчивость и репрезентативность выборки.

На рисунке 5 представлена схема алгоритма объединения записей о чрезвычайных ситуациях. В ней показано, как выполняется согласование и интеграция информации из различных источников – показателей самих ЧС (метеорологических и географических параметров), величин понесенного ущерба, социально-демографических характеристик территории и объемов реализованных ИТМ. Формирование итоговой выборки осуществлялось на основе пространственно-временного сопоставления событий, устранения дублирующих записей и нормализации атрибутов.

Для обучения моделей М-2 и М-3 была подготовлена отдельная выборка, в которой каждая запись соответствует конкретному случаю реагирования на природную чрезвычайную ситуацию. В неё включены данные о прогнозируемом и фактическом ущербе, числе задействованных сил, количестве технических средств. Такая структура выборки обеспечивает корректную связь между прогнозом ущерба (результатом модели М-1) и требуемыми ресурсами реагирования, что позволяет обучить группу моделей на единых данных и сформировать комплексную систему прогнозно-оптимизационного анализа.

Модель М-1 решает задачу краткосрочного прогноза прямого экономического ущерба  $Z_{\text{прогноз}}$ . Сравнение LightGBM, CatBoost и MLP показало преимущество MLP, обеспечившей минимальную среднюю абсолютную ошибку и наибольший коэффициент детерминации.

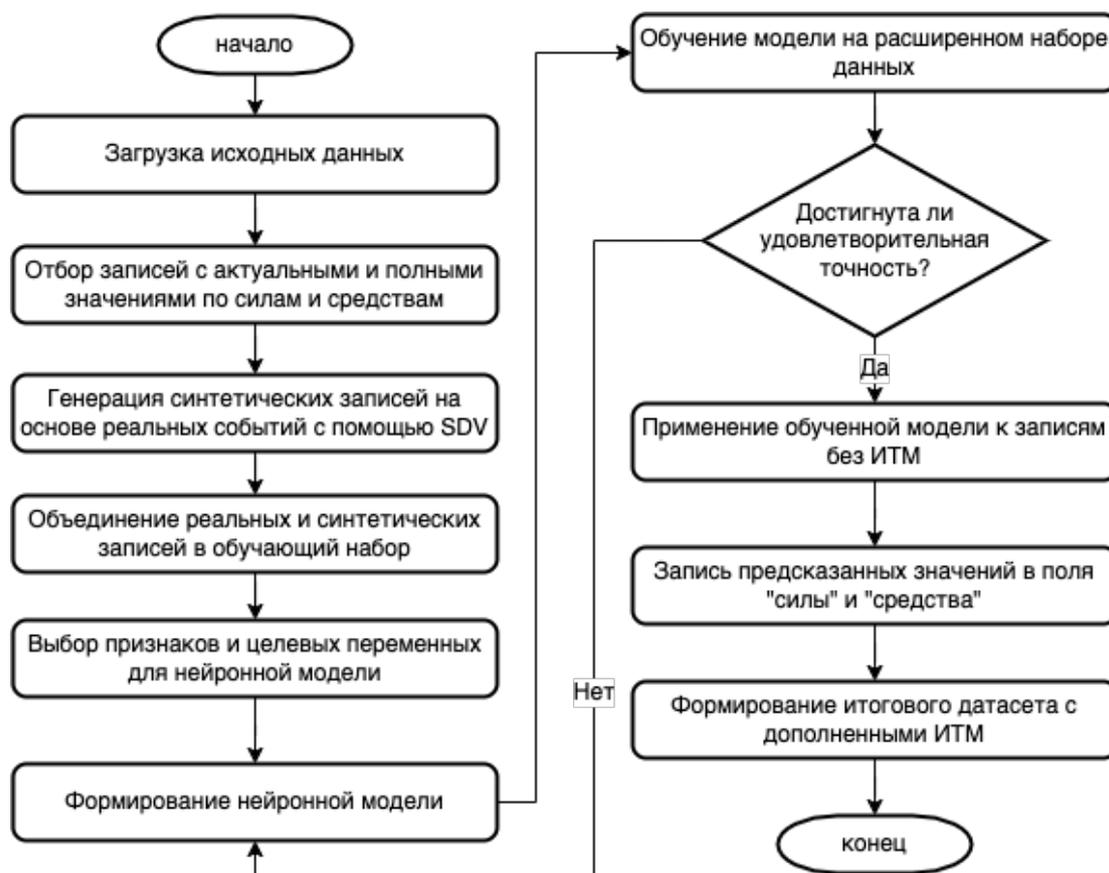


Рисунок 5 – Алгоритм восстановления пропущенных объемов ИТМ

Результаты сравнительного анализа трех алгоритмов машинного обучения, представленные в таблице 5, подтверждают преимущество нейронной сети MLP по ключевым метрикам качества прогнозирования. Средняя абсолютная ошибка составила 350 075 тыс. руб., что является наименьшим значением среди рассмотренных моделей. Для LightGBM и CatBoost этот показатель составил 351 866 и 351 520 тыс. руб. соответственно. При этом коэффициент детерминации логарифмированного ущерба для MLP достиг 0,35, что выше, чем у бустинговых моделей (0,25 и 0,34). Таким образом, нейросеть объясняет большую долю дисперсии логарифма ущерба и демонстрирует более устойчивое воспроизведение закономерностей между входными признаками и прогнозируемыми потерями. Эти результаты подтверждают, что MLP обеспечивает оптимальное сочетание точности и стабильности прогноза и целесообразна для использования в модели М-1.

Таблица 5 – Результаты качества модели М-1

Модель	MAE, тыс. руб.	$R_{log}^2$
LightGBM	351 866	0,25
CatBoost	351 520	0,34
MLP	350 075	0,35

Корреляционный анализ, рисунок 6, подтвердил содержательность выбранных признаков.

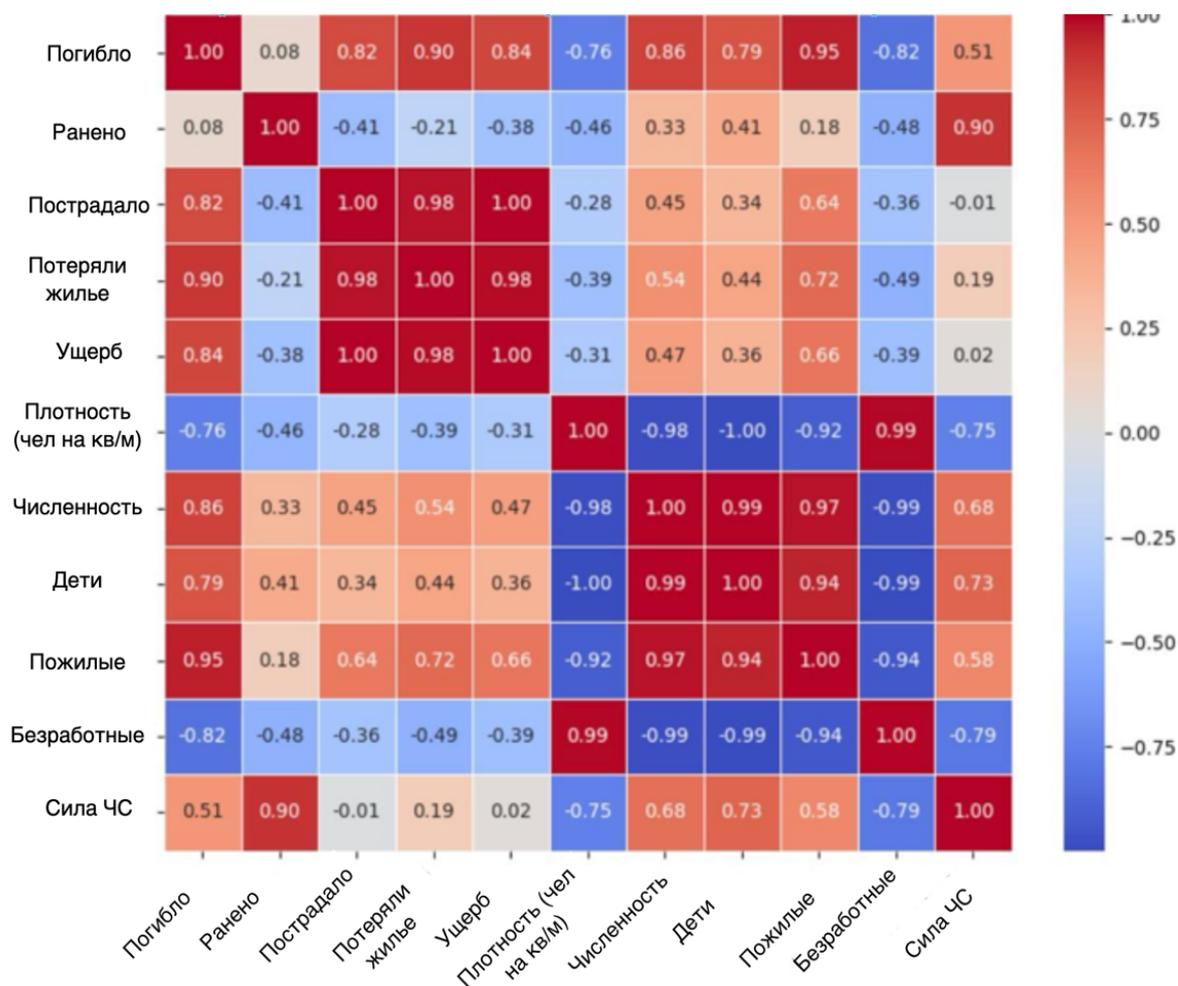


Рисунок 6 – Тепловая карта корреляции ущерба силы ЧС и социально-демографических факторов

Модели М-2 и М-3 определяют численность  $N_{\text{сил}}$  и количество средств  $N_{\text{средств}}$  на основе  $Z_{\text{прогноз}}$  и социально-демографических показателей.

Результаты тестирования моделей М-2 и М-3, представленные в таблицах 6 и 7, демонстрируют преимущество нейронной сети MLP по сравнению с бустинговыми алгоритмами.

Таблица 6 – Результаты качества модели М-2

Модель	Средняя абсолютная ошибка, чел.	Коэффициент детерминации, безразм.
LightGBM	111	0,02
CatBoost	108	0,09
MLP	32	0,12

Таблица 7 – Результаты качества модели М-3

Модель	Средняя абсолютная ошибка, ед.	Коэффициент детерминации, безразм.
LightGBM	62	0,03
CatBoost	41	0,08
MLP	14	0,21

Для задачи прогнозирования потребной численности сил (М-2) средняя абсолютная ошибка MLP составила 32 чел., что более чем в три раза ниже, чем у LightGBM (111 чел.) и CatBoost (108 чел.). При этом коэффициент детерминации логарифмированной ошибки достиг 0,12 против 0,02–0,09 у бустингов.

Аналогичная картина наблюдается и для модели М-3, прогнозирующей количество технических средств: MLP показала среднюю абсолютную ошибку 14 ед. против 62 (LightGBM) и 41 ед. (CatBoost), обеспечив рост точности примерно на 77 % и увеличение коэффициента детерминации до 0,21. Таким образом, нейронная сеть не только уменьшила среднюю ошибку, но и обеспечила лучшую устойчивость прогнозов при сохранении обобщающей способности.

В рамках первой подсистемы реализован прогноз ущерба, где сравнительный анализ алгоритмов показал преимущество нейросетевой модели, обеспечившей минимальные значения ошибок и наибольшую объясняющую способность. Вторая подсистема отвечает за расчет численности сил и объема технических средств, где также наилучшие результаты продемонстрировала нейронная сеть.

Дальнейший анализ выявил, что главным фактором для  $N_{\text{сил}}$   $N_{\text{средств}}$  является прогнозируемый ущерб, а также взаимодействия интенсивности события с плотностью населения и долей пожилых. Это подтверждает значимость учета социально-демографического блока.

Разработанный аппарат обладает модульностью, адаптируемостью к региональным условиям, обеспечивает объяснимость решений и реалистичность оценок благодаря обучению на исторических данных. Верификация на примерах показала соответствие фактическим значениям и способность выявлять недооценку ресурсов в прошлых кейсах.

В целом, предложенный подход формирует основу для перехода от нормативно-усредненных схем к риск-ориентированному планированию, где объемы сил и средств определяются в зависимости от прогнозируемых последствий и уязвимости конкретной территории.

Третья глава посвящена оценке эффективности разработанного научно-методического аппарата и формированию методических рекомендаций по выбору и применению алгоритмов машинного обучения в задачах прогнозирования ущерба и планирования инженерно-технических мероприятий.

В главе изложен план и методика вычислительного эксперимента, направленного на проверку работоспособности моделей М-1, М-2 и М-3. Для их обучения и

тестирования использованы исторические данные о чрезвычайных ситуациях природного характера. Точность прогнозов оценивалась с применением метрик средней абсолютной ошибки и коэффициента детерминации, что позволило сопоставить различные алгоритмические реализации.

Проведено сопоставление результатов с традиционной практикой планирования инженерно-технических мероприятий, основанной на нормативных подходах и экспертных оценках. На ретроспективных примерах установлено, что использование предложенных моделей позволяет как избежать избыточного расходования ресурсов, так и снизить риск недооценки потребности, что приводит к уменьшению совокупного ущерба в среднем на 5–20 % относительно фактических потерь.

Сформирован алгоритм выбора оптимального типа ML-модели для практического применения, учитывающий объем доступных данных, требования к точности и интерпретируемости результатов. Для малых выборок предпочтителен градиентный бустинг, для средних и больших – нейронные сети, особенно в задачах расчета ресурсов.

В заключительной части главы предложены методические рекомендации по внедрению разработанного аппарата в практику органов управления ЧС. Они включают: создание интегрированной базы данных, разработку программного модуля прогнозирования и планирования, использование методов интерпретации результатов для повышения доверия пользователей, подготовку персонала и адаптацию методики к различным видам чрезвычайных ситуаций.

Таким образом, третья глава подтверждает прикладную эффективность разработанных моделей и демонстрирует возможность их практического внедрения в систему поддержки принятия решений при чрезвычайных ситуациях.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполненного исследования решена научная задача по разработке научно-методического аппарата обоснования рациональных объемов ИТМ при краткосрочном прогнозировании ущерба от природных чрезвычайных ситуаций с учетом социально-демографических факторов.

Научная задача заключалась в интеграции методов анализа уязвимости населения и инфраструктуры с современными алгоритмами машинного обучения, обеспечивающими количественную оценку последствий ЧС и потребности в ресурсах реагирования в условиях неполноты и неоднородности исходных данных. Разработанный аппарат позволяет не только повысить точность и интерпретируемость прогнозов, но и формализовать процесс принятия решений при планировании инженерно-технических мероприятий, обеспечивая переход от экспертно-эмпирических подходов к объективной риск-ориентированной модели обоснования действий. Его практическая значимость заключается в возможности использования полученных результатов при оперативном и превентивном планировании мероприятий МЧС России, что способствует оптимизации распределения сил и средств, снижению потерь и повышению устойчивости территорий к воздействию опасных природных явлений.

Разработанный научно-методический аппарат включает:

– алгоритм формирования исходных данных, интегрирующий сведения из различных источников. Алгоритм обеспечивает пространственно-временное сопоставление событий, стандартизацию атрибутов и единиц измерения, обработку пропусков и выбросов, а также синтетическое расширение выборки методами генеративного моделирования. Его применение позволяет повысить полноту, согласованность и достоверность статистической базы, используемой для построения моделей;

– модель краткосрочного прогноза ущерба (М-1), учитывающую параметры опасного метеорологического явления и социально-демографические характеристики территории. В качестве наиболее эффективного решения обосновано применение многослойного перцептрона, продемонстрировавшего наименьшую среднюю абсолютную ошибку и наибольший коэффициент детерминации. Модель обеспечивает повышение точности оценки последствий ЧС по сравнению с традиционными методами, основанными исключительно на физических параметрах явления;

– модели расчета потребности в силах и средствах (М-2, М-3), связывающие прогнозируемый ущерб с ресурсными затратами на реагирование. Показано, что нейросетевые алгоритмы обеспечивают наибольшую точность прогноза численности личного состава и количества техники, а учет социально-демографических факторов (плотность и возрастная структура населения, уровень урбанизации, состояние инфраструктуры) существенно повышает качество решений.

– методику интерпретации и объяснения прогнозов, основанную на применении SHAP-анализа. В отличие от традиционных «черных ящиков» машинного обучения, предложенный подход позволяет оценить вклад каждого фактора в формирование прогнозного значения ущерба и в расчет необходимых ресурсов. Это обеспечивает возможность прозрачного применения результатов при поддержке управленческих решений.

– алгоритм выбора оптимального метода машинного обучения в зависимости от условий задачи: объема данных, требований к точности и интерпретируемости, ограничений по времени обучения и вычислительным ресурсам. Данный алгоритм формирует основу для практического применения результатов в различных сценариях прогнозирования и планирования мероприятий.

Результаты экспериментальной проверки подтвердили эффективность разработанного аппарата:

- средняя ошибка прогноза ущерба составила порядка 350 тыс. руб.;
- ошибка прогноза численности сил – около 32 человек;
- ошибка прогноза технических средств – около 14 единиц.

Практическая ценность работы заключается в возможности внедрения предложенного аппарата в систему поддержки принятия решений МЧС России. Его использование позволит:

- перейти от усредненных нормативных сценариев к риск-ориентированному планированию;
- учитывать специфику демографической и инфраструктурной уязвимости территории;

- повышать эффективность распределения ограниченных ресурсов;
- снижать масштабы ущерба и риски для населения.

Совокупность полученных результатов составляет научный вклад в развитие теории и практики обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях и формирует основу для дальнейшего совершенствования систем прогнозирования и управления.

Разработанные алгоритмы и модели вносят вклад в развитие научных представлений о комплексной оценке риска и уязвимости территорий, а также в методологию обоснования инженерно-технических мероприятий на основе количественных прогнозов ущерба. Полученные результаты расширяют инструментарий прикладных исследований в области безопасности, обеспечивая возможность интеграции методов машинного обучения, социо-демографического анализа и риск-ориентированного планирования в единую аналитическую среду.

Практическая применимость разработанного аппарата подтверждает его потенциал для использования в системах поддержки принятия решений МЧС России, региональных центрах и научных подразделениях, занимающихся оценкой последствий ЧС и управлением ресурсами.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием адаптивных моделей, учитывающих пространственно-временные зависимости и нелинейные эффекты взаимодействия факторов риска, а также с интеграцией предложенного подхода в цифровые платформы ситуационного анализа и мониторинга.

#### 4. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

4.1. Основные положения диссертации опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях из перечня ВАК:

1. Постернак, Е.В. Анализ проблемной ситуации в области обоснования объемов инженерно-технических мероприятий при прогнозировании ущерба от природных чрезвычайных ситуаций с учетом антропогенных факторов / А.В. Рыбаков, Е.В. Постернак // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 4(63). – С. 72-83.

2. Постернак, Е.В. Математическая модель обоснования объемов инженерно-технических мероприятий для минимизации ущерба от природных чрезвычайных ситуаций с учетом антропогенных факторов / А.В. Рыбаков, Е.В. Постернак // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2025. №. 1. С. 102-117.

3. Постернак, Е.В. Комплексный подход к формированию набора данных для прогнозирования ущерба от чрезвычайных ситуаций и оптимизации сил и средств / А.В. Рыбаков, Е.В. Постернак // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. № 9(3). – С. 310-324.

4.2. Публикации по теме диссертации:

1. Постернак, Е.В. Актуальность проблемы повышения качества прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера / А.В. Рыбаков, Е.В. Постернак // Моделирование технически сложных процессов и систем: Сборник трудов

XXXIII Международной научно-практической конференции, Химки, 01 марта 2023 года. – Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика. – 2023. – С. 40-44.

2. Постернак, Е.В. О некоторых проблемных вопросах разработки моделей прогнозирования чрезвычайных ситуаций на основе искусственного интеллекта / А.В. Рыбаков, Е.В. Постернак // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Воронеж, 17–18 мая 2023 года. – Воронеж: ФКОУ Воронежский институт ФСИН России, Строки. – 2023. – С. 261-265.

3. Постернак, Е.В. Об учете метеорологических и антропогенных факторов при прогнозировании ущерба от природных чрезвычайных ситуаций / А.В. Рыбаков, Е.В. Постернак // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Дню образования гражданской обороны Российской Федерации : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Химки, 03 октября 2024 года. – Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий им. генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика. – 2024. – С. 40-48.

Подписано в печать 15.10.2025  
Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Печать цифровая.  
Усл. печ. 1,34 л. Печ. 1.44 л. Тираж 100. Заказ № 216.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в редакционно-издательском центре «Школа»  
420111, Казань, Дзержинского, 9/1.  
Тел. сот.:8-9172-64-84-83  
E-mail: ric-school@yandex.ru

