

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 004.032.26:614.849:004.021; DOI: 10.61260/2218-13X-2025-2-35-48

## АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ УГРОЗАХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

✉ Медведев Дмитрий Валерьевич;  
Матвеев Александр Владимирович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ [meedvedevdv@mail.ru](mailto:meedvedevdv@mail.ru)

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения обоснованности и эффективности управлеченческих решений при реагировании на угрозы лесных пожаров в условиях высокой степени неопределенности и динамичного развития пожароопасной обстановки. Существующие подходы, основанные преимущественно на экспертных методах, не всегда позволяют оперативно и точно учитывать весь спектр факторов, влияющих на выбор управлеченческих решений, что требует внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

В работе использован гибридный подход, сочетающий методы глубоких нейронных деревьев и нечеткой логики, реализованный в виде алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений на стратегическом и тактическом уровнях управления. Методы машинного обучения применены для прогнозирования ключевых параметров лесных пожаров (площадь, длительность ликвидации, расстояние до населенных пунктов, количество привлекаемых сил и средств), а аппарат нечеткой логики – для формирования обоснованных управлеченческих рекомендаций на основе прогнозных данных.

Основные результаты исследования заключаются в разработке и реализации алгоритмов, обеспечивающих автоматизацию обработки исходных данных, прогнозирование целевых показателей и определение рекомендуемых управлеченческих решений для Комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности. Приведены примеры реализации алгоритмов, продемонстрированы высокие значения метрик качества моделей машинного обучения и работоспособность предложенных решений на тестовых данных.

Научная новизна работы состоит в интеграции методов глубоких нейронных деревьев с нечетким выводом Такэги-Сугено в единую систему, предназначенную для поддержки лиц, принимающих решения, при реагировании на угрозы лесных пожаров. Предложены блок-схемы алгоритмов, позволяющие формализовать процесс выбора решений и повысить их интерпретируемость.

Практическая значимость результатов заключается в возможности использования предложенных алгоритмов в составе интеллектуальных систем поддержки принятия решений органов управления при ЧС для повышения обоснованности, своевременности и качества управлеченческих решений, а также оптимизации временных и человеческих ресурсов при реагировании на угрозы лесных пожаров.

**Ключевые слова:** интеллектуальная поддержка принятия решений, алгоритм, лесные пожары, машинное обучение, нечеткая логика

**Для цитирования:** Медведев Д.В., Матвеев А.В. Алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия управлеченческих решений при угрозах лесных пожаров // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербург. ун-та ГПС МЧС России». 2025. № 2. С. 35–48. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-2-35-48.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2025

Scientific article

## ALGORITHMS FOR INTELLIGENT SUPPORT OF MANAGEMENT DECISIONS IN CASE OF THREATS FROM FOREST FIRES

✉ Medvedev Dmitry V.;

Matveev Alexander V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ [meedvedevdv@mail.ru](mailto:meedvedevdv@mail.ru)

*Abstract.* The relevance of the study is due to the need to improve the validity and effectiveness of management decisions when responding to forest fire threats in conditions of high uncertainty and dynamic development of fire hazard situations. Existing approaches, based mainly on expert methods, do not always allow for prompt and accurate consideration of the entire range of factors influencing the choice of management decisions, which requires the implementation of intelligent decision support systems.

The work uses a hybrid approach combining deep neural tree and fuzzy logic methods, implemented in the form of algorithms for intelligent decision support at the strategic and tactical levels of management. Machine learning methods are used to predict key parameters of forest fires (area, duration of liquidation, distance to settlements, number of forces and means involved), and the fuzzy logic apparatus is used to generate sound management recommendations based on forecast data.

The main results of the study are the development and implementation of algorithms that automate the processing of initial data, forecast target indicators and determine recommended management decisions for the Commission for the Prevention and Elimination of Emergencies and Fire Safety. Examples of the implementation of algorithms are given, high values of the quality metrics of machine learning models and the performance of the proposed solutions on test data are demonstrated.

The scientific novelty of the work lies in the integration of deep neural tree methods with Takegi-Sugeno fuzzy inference into a single system designed to support decision makers in responding to forest fire threats. Flowcharts of algorithms are proposed that allow formalizing the decision-making process and increasing their interpretability.

The practical significance of the results lies in the possibility of using the proposed algorithms as part of intelligent decision support systems for government agencies in emergency situations to improve the validity, timeliness and quality of management decisions, as well as optimize time and human resources in responding to forest fire threats.

**Keywords:** intelligent decision support, algorithm, forest fires, machine learning, fuzzy logic

**For citation:** Medvedev D.V., Matveev A.V. Algorithms for intelligent support of management decisions in case of threats from forest fires // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2025. № 2. P. 35–48. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-2-35-48.

### Введение

Принятие решений по организации процесса реагирования на угрозы лесных пожаров характеризуется высокой степенью сложности и неопределенности, особенно на стратегическом (во время подготовки к пожароопасному периоду) и тактическом (на начальной стадии действующих пожаров) уровнях управления. В настоящее время возможные решения Комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности (КЧС и ОПБ), в том числе введение уровней реагирования, введение чрезвычайных ситуаций (ЧС) осуществляется преимущественно с использованием экспертных методов. Роль человеческого фактора остается существенной и незаменимой. Эксперты и лица, принимающие решения (ЛПР), играют ключевую роль в разработке стратегий реагирования и координации действий в случае лесных пожаров.

Динамичный и непредсказуемый характер развития крупных пожаров предполагает, что использование в качестве основы исключительно экспертных методов может быть не столь эффективным. Переход от экспертных методов к более структурированным формам принятия решений позволяет повысить их обоснованность за счет эффективного сбора/обработки информации и уточнения целей и альтернатив по реагированию на лесные пожары посредством совершенствования информационно-аналитической деятельности.

Поддержка принятия управленческих решений в процессе реагирования на угрозы лесных пожаров возможна за счет применения средств и технологий машинного обучения, в том числе нейронных сетей, с целью выявления закономерностей при формировании адекватных действия для ЛПР.

В настоящей работе предлагаются алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений при реагировании на лесные пожары на двух уровнях управления: стратегическом и тактическом.

## Методы исследования

Применение для поддержки принятия решений методов искусственного интеллекта в настоящее время широко используется в различных направлениях сферы безопасности, в том числе в медицине, военных системах, в области обеспечения безопасности при ЧС, получены некоторые результаты в сфере интеллектуального анализа данных при реагировании на лесные пожары [1–8]. Наличие данных, обладающих высокой размерностью, развитие механизмов интеллектуального анализа данных и необходимость принятия своевременных и обоснованных управленческих решений стали определяющими факторами при разработке алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений при угрозах лесных пожаров.

Общая схема процесса принятия управленческих решений ЛПР включает в себя ряд этапов, основанных на замене последовательных логических рассуждений человека посредством использования методов интеллектуального анализа данных в совокупности с подходами нечеткой логики (рис. 1):

- К1. Исследование предметной области, включающее в себя выявление проблем и поиск возможных решений, определение информационной потребности для разрешения проблем;
- К2. Определение критериев и ограничений для принятия управленческих решений, включающих в себя выбор целевых и независимых переменных, установление зависимостей между ними, определение используемых моделей;
- К3. Построение альтернативных вариантов решений проблемы;
- К4. Выбор решений на основании выделенных критериев и ограничений;
- К5. Принятие ЛПР одного из управленческих решений, включающее предварительную оценку возможных последствий и составление плана реализации решения, необходимых ресурсов и порядка получения обратной связи о фактической эффективности реализации решения.

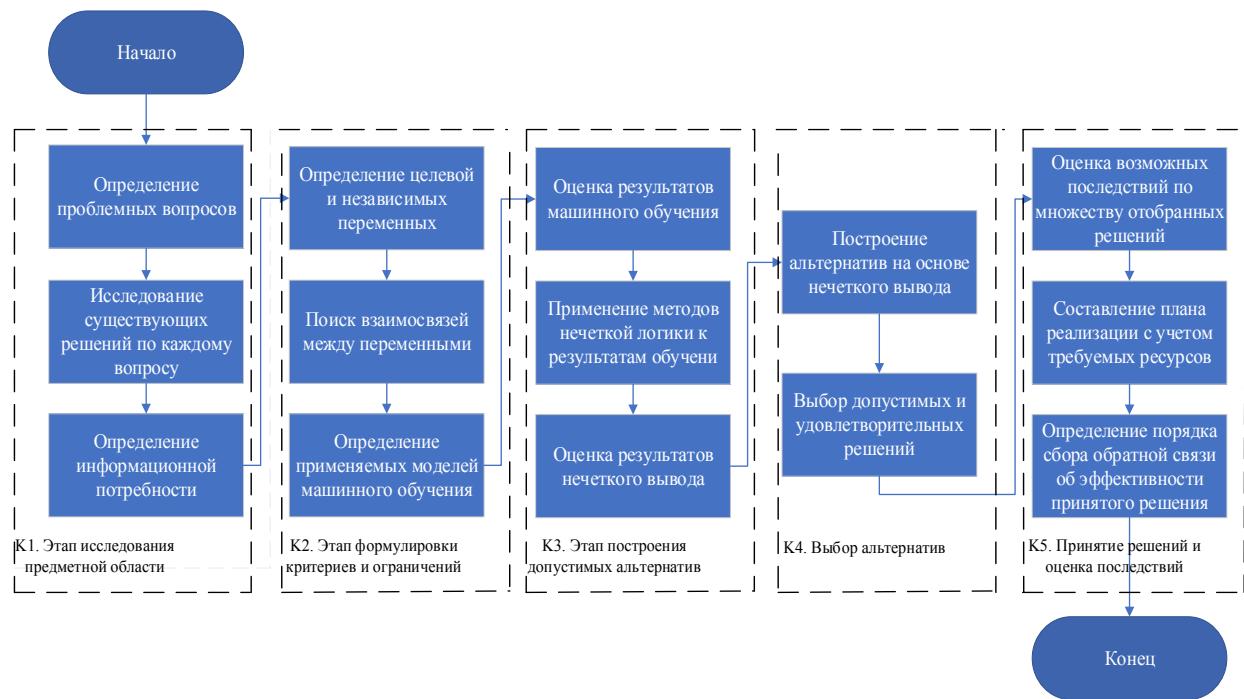


Рис.1. Этапы управления процессом принятия решений

Одним из ключевых этапов является процесс принятия управленческих решений на основании данных, полученных в результате машинного обучения [9–10].

Реализацию алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений предлагается осуществлять с применением метода глубоких нейронных деревьев, а также нечеткой логики.

Глубокие нейронные деревья представляют собой гибридный подход, сочетающий сильные стороны глубоких нейронных сетей и деревьев решений. Главная идея заключается в том, чтобы использовать структуру дерева решений (или ансамбля деревьев), но с параметризованными ветвлениями и листами, обучать дерево методом градиентного спуска, как в нейронных сетях, обеспечивать дифференцируемость, чтобы использовать стандартные методы оптимизации, применяемые для глубоких нейронных сетей [11]. Узлы дерева представляются нейронными слоями, которые принимают решения на основе взвешенных комбинаций признаков. Таким образом, глубокие нейронные деревья представляют собой компромисс между интерпретируемостью деревьев и гибкостью нейросетей. Они особенно полезны в задачах, где важно объяснять предсказания, но при этом нужна высокая точность [12].

Применяемый аппарат нечеткой логики позволяет формализовать рассуждения с неопределенностью и нечеткими понятиями. В работе применяется метод нечеткого вывода Такэги-Сугено. Достоинством применения данного подхода является возможность работы с неточными и качественными данными, моделирования экспертных знаний, хорошая интерпретируемость решений, гибкость и адаптивность по сравнению с применением жестких алгоритмов [13].

Деятельность КЧС и ОПБ, осуществляемая на муниципальном, региональном и федеральном уровнях при подготовке к пожароопасному периоду, организуется заблаговременно на основании климатических особенностей защищаемых территорий [14]. Порядок работы утверждается соответствующим документом, а именно планом работы КЧС и ОПБ.

Возможность применения предлагаемого в настоящем исследовании подхода рассматривается на двух стадиях:

1. В процессе планирования на стратегическом уровне при подготовке КЧС и ОПБ к пожароопасному сезону, в рамках которого происходит оценка готовности территорий, а также планирование сил и средств.

2. На тактическом уровне управления в процессе принятия решений во время действующих пожаров, когда требуется установить уровень реагирования на пожар и необходимость введения режима ЧС.

В табл. 1 представлены блоки решений, а также возможные решения по каждому из них, которые необходимо рассмотреть на стадии действующих пожаров и планирования при ежегодном собрании КЧС и ОПБ. Каждое из решений в базе знаний содержит описание о типовых особенностях реализации.

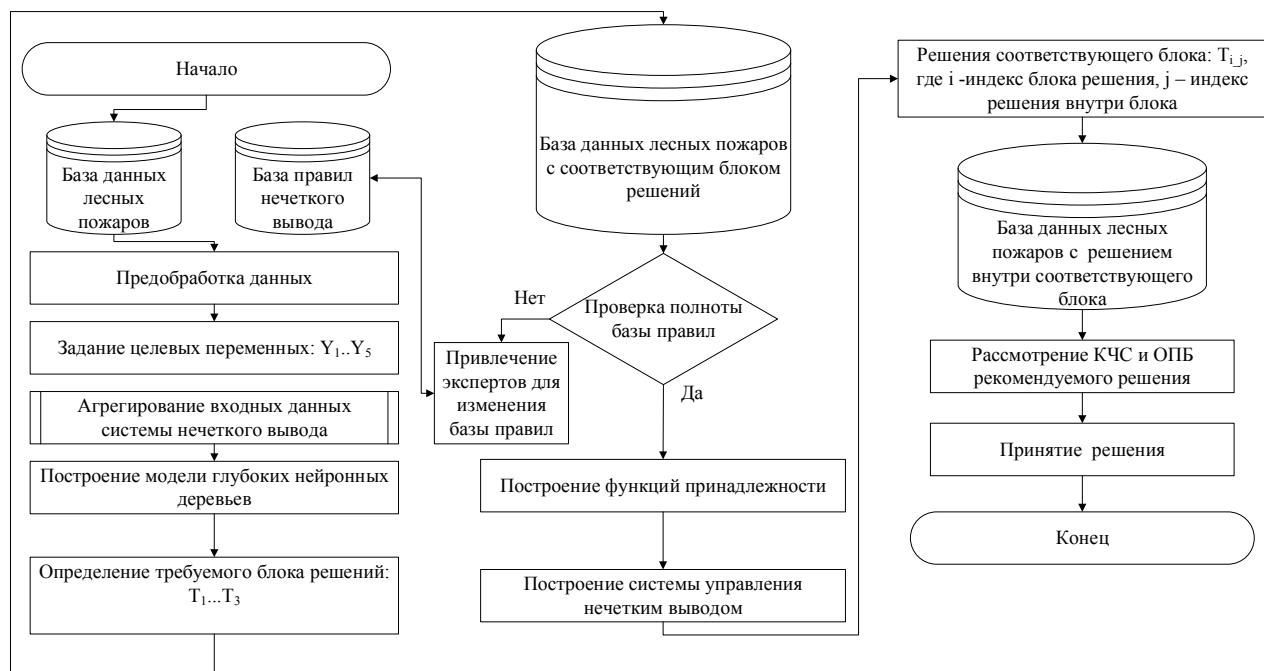
Таблица 1  
Блоки управленческих решений

№	Наименование блока	Возможные решения
Стратегический уровень (этап планирования)		
1.	Решения в области распределения сил, средств и прочих ресурсов при реагировании на лесные пожары – Т <sub>1</sub>	T <sub>1_1</sub> , T <sub>1_2</sub> , T <sub>1_3</sub> , T <sub>1_4</sub> , T <sub>1_5</sub>
	T <sub>1_1</sub> – рассмотрение мест дислокации лесопожарных станций; T <sub>1_2</sub> – рассмотрение вопроса привлекаемых сил и средств МЧС России; T <sub>1_3</sub> – рассмотрение привлекаемых территориальных органов МЧС России; T <sub>1_4</sub> – оценка достаточности соглашений с привлекаемыми органами; T <sub>1_5</sub> – оценка количества пожарно-технического вооружения	
2.	Решение в области проведения превентивных мероприятий – Т <sub>2</sub>	T <sub>2_1</sub> , T <sub>2_2</sub> , T <sub>2_3</sub> , T <sub>2_4</sub>
	T <sub>2_1</sub> – Рассмотрение вопроса о принятии решения об ограничении нахождения в лесу T <sub>2_2</sub> – Рассмотрение вопроса о необходимости актуализации маршрутов патрулирования T <sub>2_3</sub> – Рассмотрение вопроса о необходимости проведения дополнительного информирования населения T <sub>2_4</sub> – Рассмотрение превентивных мероприятий по защите населенных пунктов (НП), подверженных угрозам лесных пожаров	
3.	Решение по априорному установлению особого противопожарного режима – Т <sub>3</sub>	T <sub>3_1</sub> , T <sub>3_2</sub>
	T <sub>3_1</sub> – Принятие решения о введение особого противопожарного режима T <sub>3_2</sub> – Принятие решения об отсутствии необходимости введения особого противопожарного режима	
Тактический уровень (начальный этап пожаров)		
1.	Решение об установлении уровня реагирования на пожар – О <sub>1</sub>	O <sub>1_1</sub> , O <sub>1_2</sub> , O <sub>1_3</sub> , O <sub>1_4</sub>
	O <sub>1_1</sub> – Рассмотрение КЧС и ОПБ рекомендуемого уровня реагирования O <sub>1_2</sub> – Оповещение задействованных органов согласно планам тушения пожара соответствующего уровня O <sub>1_3</sub> – Рассмотрение вопроса необходимости создания штаба тушения пожара для руководителя тушения пожара O <sub>1_4</sub> – Принятие дополнительных (вспомогательных) мер по организации работ по тушению лесных пожаров в целях исключения угрозы НП	
2.	Решение о введении режима ЧС – О <sub>2</sub>	O <sub>2_1</sub> , O <sub>2_2</sub> , O <sub>2_3</sub>
	O <sub>2_1</sub> – Рассмотрение КЧС и ОПБ необходимости введения ЧС O <sub>2_2</sub> – Оповещение руководителей заинтересованных федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления и организаций, а также населения о возникшей ЧС в лесах O <sub>2_3</sub> – Принятие дополнительных (вспомогательных) мер по организации работ по тушению лесных пожаров в целях исключения угрозы НП	
3.	Отсутствие необходимости принятия решений со стороны органов управления – О <sub>3</sub>	–

## Результаты исследования

На рис. 2, 3 представлены блок-схемы алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений на стратегическом и тактическом уровнях управления соответственно.

На стратегическом уровне управления используется база данных лесных пожаров и база правил нечеткого вывода. Алгоритм предусматривает агрегирование исходных данных по административно-территориальным единицам или территории лесничества. Агрегированные данные подаются в модель глубоких нейронных деревьев для определения блока решений  $T_1 \dots T_3$ . Объединение данных с соответствующим блоком решений подаются в систему управления нечетким выводом, определяющую предполагаемое управленческое решение, подлежащее рассмотрению КЧС и ОПБ.



**Рис. 2. Блок-схема алгоритма интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений на стратегическом уровне управления**

На тактическом уровне управления алгоритм позволяет на основании исходных данных провести их предобработку, задать и спрогнозировать целевые переменные (показатели эффективности управленческих решений) на основании моделей машинного обучения. Результаты прогнозирования сохраняются в базе данных и передаются в модель нейронных глубоких деревьев, позволяющих определить требуемый блок решений  $O_1 \dots O_3$ . На основании результатов определения требуемого блока решений и базы правил нечеткого вывода конкретных решений внутри блока система нечеткого вывода позволяет определить управленческое решение. ЛПР проводит оценку предлагаемого решения и определяет необходимость его выполнения.

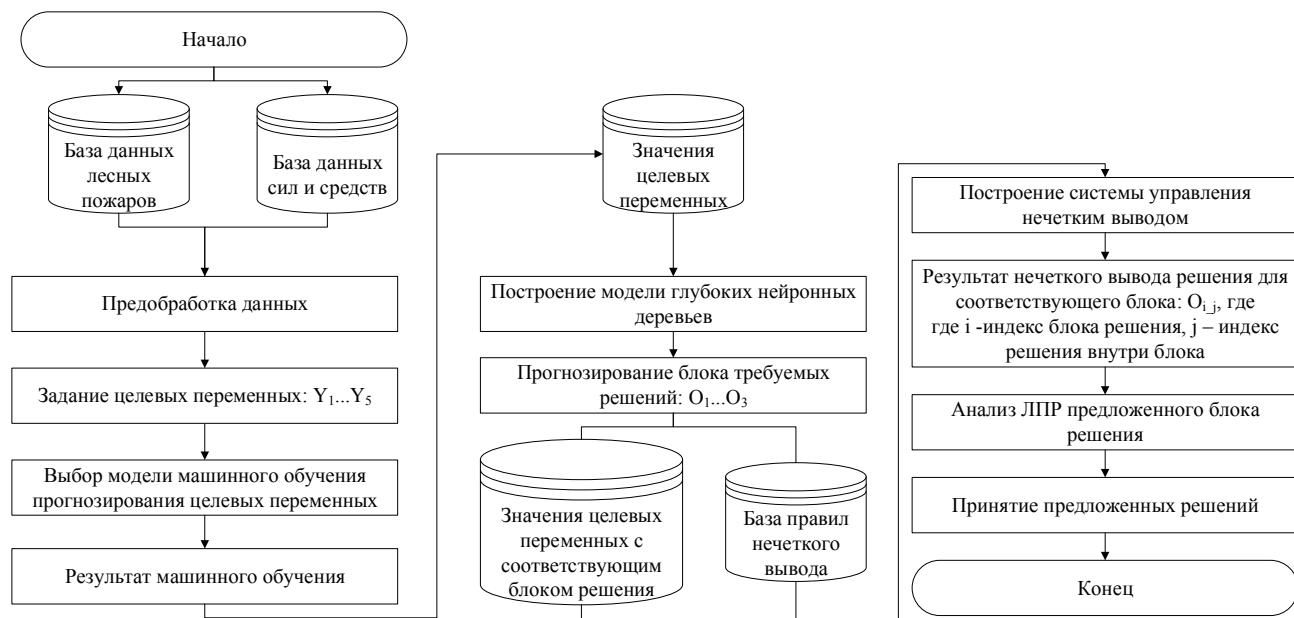


Рис. 3. Блок-схема алгоритма интеллектуальной поддержки принятия решений на тактическом уровне управления

Пример реализации алгоритма интеллектуальной поддержки принятия решений на тактическом уровне управления включает этапы с инициализации данных до вывода рекомендаций по управлению решению. На вход поступают данные, представленные в работе [8] и дополненные сведения о лесопожарных станциях, расположенных на территории исследуемого региона.

Предобработка данных заключалась в поиске выбросов, очистке от дубликатов, заполнении пропусков. Результатом предобработки данных является визуализация и отбор необходимых признаков (примеры представлены на рис. 4, 5 соответственно).

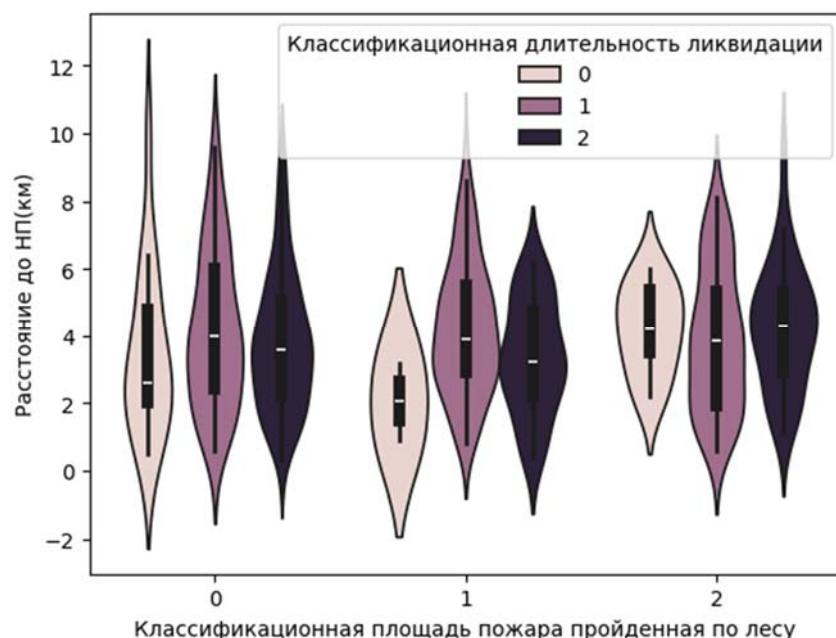
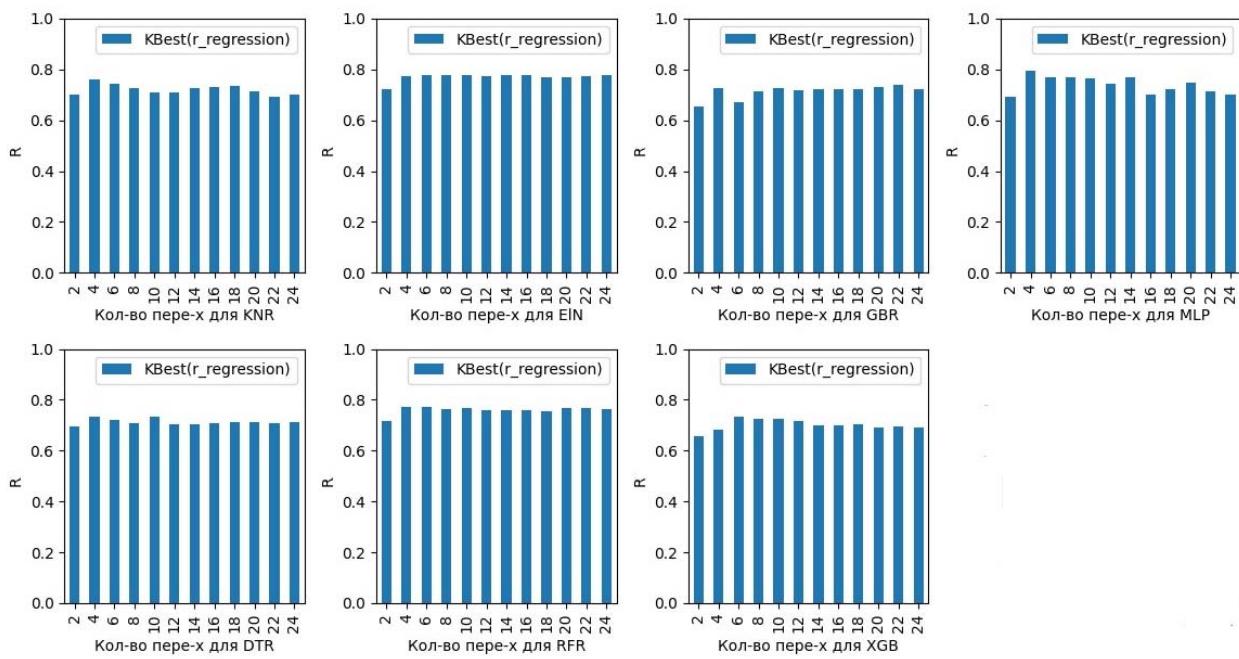


Рис. 4. Распределение целевой переменной расстояния до НП (км) в зависимости от двух переменных



**Рис. 5. Отбор признаков для различных элементов при прогнозировании целевых переменных**

После этапа предобработки данных проведено обучение моделей с использованием методов машинного обучения, результаты оценки обучения представлены в табл. 2. В качестве прогнозируемых целевых параметров, используемых далее в системе управления нечетким выводом при обосновании решения, рассматривались:  $Y_1$  – площадь пожара;  $Y_2$  – длительность ликвидации;  $Y_3$  – расстояние до ближайшего населенного пункта;  $Y_4$  – количество привлечённых сил;  $Y_5$  – количество привлеченных средств.

При прогнозировании целевых параметров использовались следующие методы регрессии (M) и классификации (N): KNeighborsClassifier (N<sub>1</sub>), GaussianNB (N<sub>2</sub>); DecisionTreeClassifier (N<sub>3</sub>); RandomForestClassifier (N<sub>4</sub>); GradientBoostingClassifier (N<sub>5</sub>); XGBClassifier (N<sub>6</sub>); ExtraTreesClassifier (N<sub>7</sub>); GradientBoostingRegressor (M<sub>1</sub>); DecisionTreeRegressor (M<sub>2</sub>); XGBRegressor (M<sub>3</sub>); ElasticNet (M<sub>4</sub>); KNeighborsRegressor (M<sub>5</sub>); RandomForestRegressor (M<sub>6</sub>); ExtraTreesRegressor (M<sub>7</sub>).

Таблица 2

**Результаты машинного обучения на валидационном наборе**

Показатель эффективности	Результаты регрессии ( $R^2$ )							Результаты классификации RocAuc (micro/macro)						
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>
$Y_1$	0,45	0,34	0,43	0,40	0,33	0,41	0,54	0,96/ 0,94	0,93/ 0,87	0,91/ 0,92	0,90/ 0,91	0,92/ 0,91	0,88/ 0,90	0,90/ 0,92
$Y_2$	0,98	0,88	0,96	0,97	0,97	0,94	0,85	0,95/ 0,92	0,92/ 0,91	0,94/ 0,90	0,90/ 0,88	0,91/ 0,90	0,92/ 0,92	0,92/ 0,90
$Y_3$	0,98	0,89	0,95	0,98	0,92	0,98	0,86	0,89/ 0,90	0,92/ 0,90	0,85/ 0,88	0,94/ 0,91	0,90/ 0,91	0,91/ 0,92	0,90/ 0,90
$Y_4$	0,10	0,01	0,02	0,01	0,004	0,11	0,08	0,82/ 0,84	0,77/ 0,76	0,85/ 0,79	0,98/ 0,98	0,97/ 0,98	0,96/ 0,97	0,96/ 0,96
$Y_5$	0,94	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,91	0,84/ 0,84	0,72/ 0,72	0,92/ 0,92	0,92/ 0,94	0,95/ 0,95	0,95/ 0,93	0,94/ 0,92

Визуализация результатов прогнозирования целевой переменной  $Y_1$  при использовании методов регрессии представлена на рис. 6.

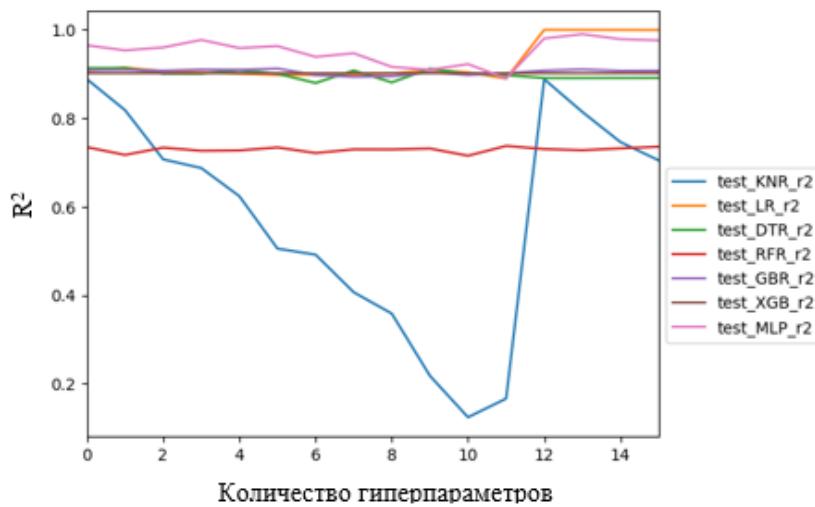


Рис. 6. Результаты машинного обучения для моделей прогнозирования целевой переменной  $Y_1$

Спрогнозированные значения целевых переменных сохраняются в базе данных и передаются в модель глубоких нейронных деревьев, предназначенную для определения требуемого блока решения. Структура построенной модели представлена на рис. 7.

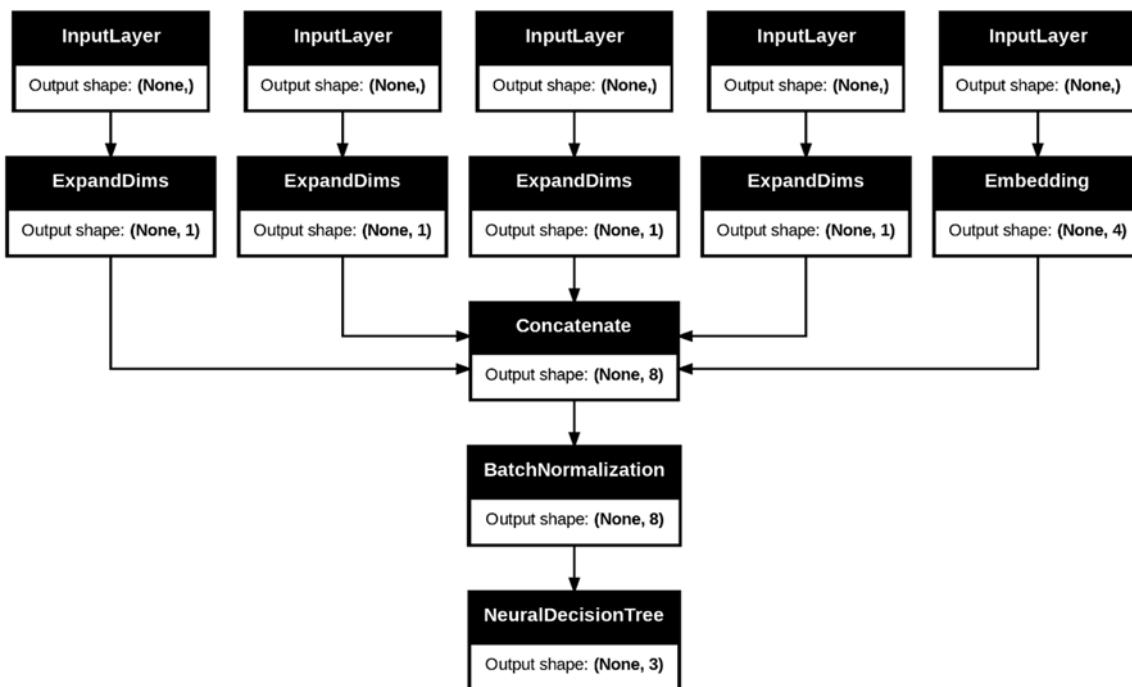


Рис. 7. Структура модели глубоких нейронных деревьев

Модель, представленная на рис. 7 обладает преимуществами интерпретируемости результатов дерева решений и возможностью обучения на основе алгоритма градиентного спуска, избегая полного перебора всех переменных. На вход модели поступают пять целевых переменных, полученных в результате использования моделей машинного обучения, а целевым классом является требуемый блок решений на тактическом уровне управления:  $O_1, O_2, O_3$ .

Результаты обучения представлены на рис. 8, 9, на которых отображено изменение метрик точности и функции потерь соответственно. В течение 10 эпох удается достичь точности, близкой к 1 на независимом тестовом наборе (не участвовавшем в обучении), что свидетельствует об адекватности применения модели.

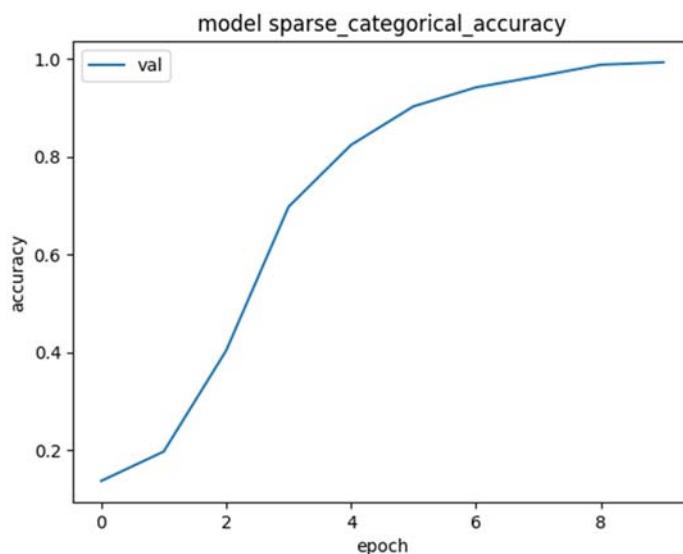


Рис. 8. График изменения точности модели нейронных деревьев

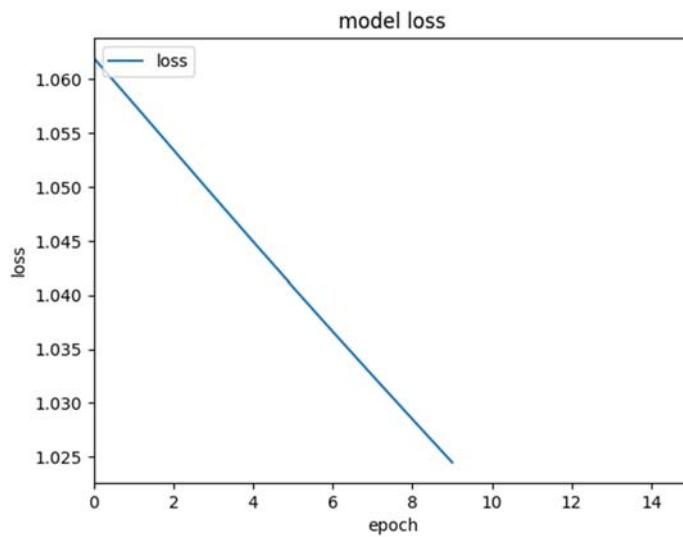


Рис. 9. График изменения функции потерь модели нейронных деревьев

Для определения конкретного управленаического решения внутри каждого блока используется аппарат нечеткой логики, реализованный с помощью библиотеки Skfuzzy языка программирования Python. Построение системы управления нечетким выводом заключается в формировании базы правил нечеткого вывода (фрагмент в сокращённом варианте представлен на рис. 10), задании функций принадлежности для антецедентов и прецедента. В реализованном алгоритме используется кусочно-линейная функция принадлежности.

```

rule1 = ctrl.Rule(S['Незначительная'] & T['Кратк'] & Rst['Умеренное'] & Sil['Незначительное'] & Srd['Незначительное'] & Blok_resh['0_3'], Res['03'])
rule2 = ctrl.Rule(S['Средняя'] & T['Среднесп'] & Rst['Близкое'] & Sil['Среднее'] & Srd['Среднее'] & Blok_resh['0_1'], Res['01_4'])
rule3 = ctrl.Rule(S['Высокая'] & T['Высокая'] & Rst['Критическое'] & Sil['Высокое'] & Srd['Высокое'] & Blok_resh['0_2'], Res['02_1'])
rule4 = ctrl.Rule(S['Незначительная'] & T['Среднесп'] & Rst['Умеренное'] & Sil['Высокое'] & Srd['Незначительное'] & Blok_resh['0_1'], Res['01_1'])
rule5 = ctrl.Rule(S['Незначительная'] & T['Высокая'] & Rst['Умеренное'] & Sil['Высокое'] & Srd['Высокое'] & Blok_resh['0_1'], Res['01_2'])
rule6 = ctrl.Rule(S['Средняя'] & T['Кратк'] & Rst['Умеренное'] & Sil['Незначительное'] & Srd['Незначительное'] & Blok_resh['0_3'], Res['03'])
rule7 = ctrl.Rule(S['Высокая'] & T['Высокая'] & Rst['Умеренное'] & Sil['Среднее'] & Srd['Незначительное'] & Blok_resh['0_2'], Res['02_2'])
rule8 = ctrl.Rule(S['Средняя'] & T['Высокая'] & Rst['Близкое'] & Sil['Незначительное'] & Srd['Среднее'] & Blok_resh['0_2'], Res['02_3'])
rule9 = ctrl.Rule(S['Высокая'] & T['Среднесп'] & Rst['Близкое'] & Sil['Незначительное'] & Srd['Незначительное'] & Blok_resh['0_2'], Res['02_3'])
rule10 = ctrl.Rule(S['Незначительная'] & T['Среднесп'] & Rst['Критическое'] & Sil['Незначительное'] & Srd['Незначительное'] & Blok_resh['0_2'], Res['02_3'])
rule11 = ctrl.Rule(S['Средняя'] & T['Среднесп'] & Rst['Умеренное'] & Sil['Среднее'] & Srd['Высокое'] & Blok_resh['0_1'], Res['01_3'])
rule12 = ctrl.Rule(S['Средняя'] & T['Высокая'] & Rst['Критическое'] & Sil['Незначительное'] & Srd['Незначительное'] & Blok_resh['0_2'], Res['02_3'])
rule13 = ctrl.Rule(S['Высокая'] & T['Высокая'] & Rst['Умеренное'] & Sil['Незначительное'] & Srd['Незначительное'] & Blok_resh['0_2'], Res['02_1'])

```

Рис. 10. Фрагмент базы правил нечеткого вывода

Для демонстрации потенциальных возможностей применения данного подхода на вход системы управления нечетким выводом был подан кортеж:  $[Y_1 = 55.0, Y_2 = 4, Y_3 = 8.54, Y_4 = 8, Y_5 = 2.0, Y_6 = 'O_2'$  (блок требуемого решения)]. Исходя из рис. 11, результат нечеткого вывода следующий: рекомендовано рассмотреть введение уровня режима ЧС.

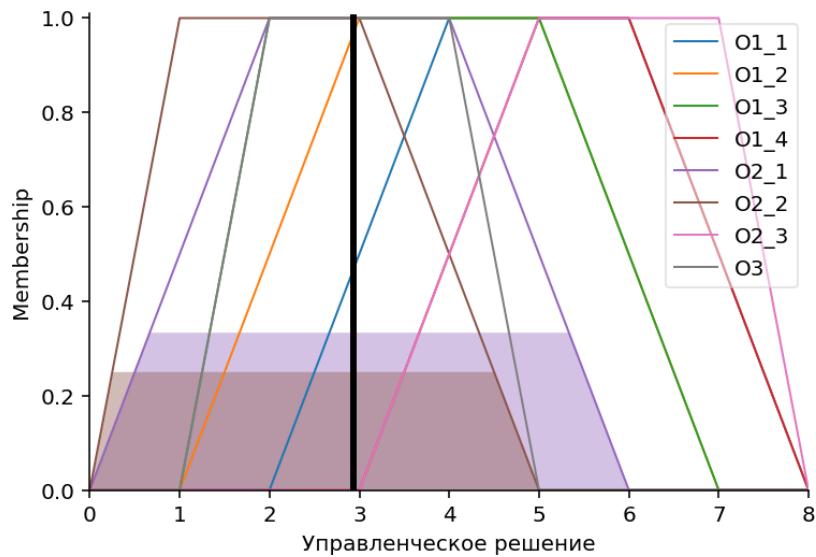


Рис. 11. Визуализация результата нечеткого вывода

Представленные алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений на двух уровнях управления, сочетающие в себе методы машинного обучения и нечеткой логики могут стать составляющей частью интеллектуальной системы поддержки принятия решений [15, 16]. Они позволяют оказать необходимую помощь за счет автоматизации процессов обработки данных, вычисления необходимых целевых показателей, обработки результатов и представления необходимых для рассмотрения решений, что позволяет усовершенствовать процесс подготовки к пожароопасному периоду на стратегическом уровне, а также заблаговременно предоставлять информацию о прогнозируемых параметрах лесного пожара и необходимых мерах на тактическом уровне [17, 18].

## Заключение

С непрерывным развитием технологий искусственного интеллекта использование алгоритмов машинного обучения для построения моделей прогнозирования показателей лесных пожаров привлекает все большее внимание научного сообщества.

В статье разработаны алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений на стратегическом и тактическом уровнях управления при реагировании на угрозы лесных пожаров, представляющие гибридный подход, сочетающий машинное обучение и аппарат нечеткой логики при определении допустимого решения.

Представленные алгоритмы являются современным адаптивным инструментом, позволяющим обоснованно и своевременно получать рекомендации для ЛПР.

Одним из недостатков настоящего подхода является зависимость от большого объема зачастую не структурированных данных, предоставляемых в различных форматах, отсутствие открытых программных интерфейсов у ведомств и органов, занимающихся сбором и обработкой необходимых данных.

### **Список источников**

1. Clinical Decision Support Systems for Triage in the Emergency Department using Intelligent Systems: a Review / M. Fernandes [et al.] // Artificial intelligence in medicine. 2020. Vol. 102. P. 101762. DOI: 10.1016/j.artmed.2019.101762.
2. Bistrone M., Piotrowski Z. Artificial intelligence applications in military systems and their influence on sense of security of citizens // Electronics. 2021. Vol. 10. № 7. P. 871. DOI: 10.3390/electronics10070871.
3. Application of computational intelligence technologies in emergency management: a literature review / N. Chen [et al.] // Artificial Intelligence Review. 2019. Vol. 52. P. 2131–2168. DOI: 10.1007/s10462-017-9589-8.
4. Applications of artificial intelligence and machine learning in disasters and public health emergencies / S. Lu [et al.] // Disaster medicine and public health preparedness. 2022. Vol. 16. № 4. P. 1674–1681. DOI: 10.1017/dmp.2021.125.
5. Freeman S. Artificial intelligence for emergency management // Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi-Domain Operations Applications II. 2020. Vol. 11413. P. 393–400. DOI: 10.1117/12.2561636.
6. Медведев Д.В. Модель прогнозирования лесных пожаров на основе нейро-нечеткой системы ANFIS // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 4. С. 185–198. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-185-198.
7. Обработка информации для системы поддержки принятия решений при противопожарном мониторинге лесных массивов / А.А. Сорокин [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2023. Т. 23, № 1. С. 126–138. DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-1-126-138.
8. Медведев Д.В., Матвеев А.В., Смирнов А.С. Применение модели логистической регрессии при принятии решений по определению количества привлекаемых сил на ликвидацию лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33. № 4. С. 84–96. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.84-96.
9. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Создание прототипов прецедентных баз знаний на основе трансформации таблиц решений для прогнозирования риска лесных пожаров // КИИ-2022: сб. трудов XX Нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием. М.: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022. С. 141–151.
10. Матвеев А.В., Богданова Е.М. Классификация методов прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2018. № 4 (24). С. 61–70.
11. Yang Y., Morillo I.G., Hospedales T.M. Deep neural decision trees // arXiv preprint arXiv: 1806.06988. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1806.06988.
12. Deep neural decision forests / P. Kotschieder [et al.] // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. P. 1467–1475.
13. A knowledge-driven fuzzy logic framework for supporting decision-making entities / D. Muñoz-Valero [et al.] // Applied Soft Computing. 2025. P. 113415. DOI: 10.1016/j.asoc.2025.113415.
14. Максимов А. В. Методы поддержки принятия решений в оперативном управлении при чрезвычайных ситуациях: обзор исследований // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2023. № 2 (42). С. 91–102. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-91-102.

15. Conceptual Framework of an Intelligent Decision Support System for Smart City Disaster Management / D. Jung [et al.] // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 2. P. 666. DOI: 10.3390/app10020666.
16. Bot K., Borges J.G. A Systematic Review of Applications of Machine Learning Techniques for Wildfire Management Decision Support // Inventions. 2022. Vol. 7. № 1. P. 15. DOI: 10.3390/inventions7010015.
17. Abid F. A Survey of Machine Learning Algorithms Based Forest Fires Prediction and Detection Systems // Fire technology. 2021. Vol. 57. № 2. P. 559–590. DOI: 10.1007/s10694-020-01056-z.
18. A Brief Review of Machine Learning Algorithms in Forest Fires Science / R. Alkhatib [et al.] // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 14. P. 8275. DOI: 10.3390/app13148275.

### References

1. Clinical Decision Support Systems for Triage in the Emergency Department using Intelligent Systems: a Review / M. Fernandes [et al.] // Artificial intelligence in medicine. 2020. Vol. 102. P. 101762. DOI: 10.1016/j.artmed.2019.101762.
2. Bistron M., Piotrowski Z. Artificial intelligence applications in military systems and their influence on sense of security of citizens // Electronics. 2021. Vol. 10. № 7. P. 871. DOI: 10.3390/electronics10070871.
3. Application of computational intelligence technologies in emergency management: a literature review / N. Chen [et al.] // Artificial Intelligence Review. 2019. Vol. 52. P. 2131–2168. DOI: 10.1007/s10462-017-9589-8.
4. Applications of artificial intelligence and machine learning in disasters and public health emergencies / S. Lu [et al.] // Disaster medicine and public health preparedness. 2022. Vol. 16. № 4. P. 1674–1681. DOI: 10.1017/dmp.2021.125.
5. Freeman S. Artificial intelligence for emergency management // Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi-Domain Operations Applications II. 2020. Vol. 11413. P. 393–400. DOI: 10.1117/12.2561636.
6. Medvedev D.V. Model' prognozirovaniya lesnyh pozharov na osnove nejro-nechetkoj sistemy ANFIS // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MChS Rossii». 2023. № 4. S. 185–198. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-185-198.
7. Obrabotka informacii dlya sistemy podderzhki prinyatiya reshenij pri protivopozharnom monitoringe lesnyh massivov / A.A. Sorokin [i dr.] // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika. 2023. T. 23, № 1. S. 126–138. DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-1-126-138.
8. Medvedev D.V., Matveev A.V., Smirnov A.S. Primenenie modeli logisticheskoy regressii pri prinyatii reshenij po opredeleniyu kolichestva privlekaemyh sil na likvidaciyu lesnyh pozharov // Pozharovzryvobezopasnost'. 2024. T. 33. № 4. S. 84–96. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.84-96.
9. Dorodnyh N.O., Nikolajchuk O.A., Yurin A.Yu. Sozdanie prototipov precedentyh baz znanij na osnove transformacii tablic reshenij dlya prognozirovaniya riska lesnyh pozharov // KII-2022: sb. trudov XX Nac. konf. po iskusstvennomu intellektu s mezhdunar. uchastiem. M.: Nacional'nyj issledovatel'skij universitet «MEI», 2022. S. 141–151.
10. Matveev A.V., Bogdanova E.M. Klassifikaciya metodov prognozirovaniya chrezvychajnyh situacij // Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie. 2018. № 4 (24). S. 61–70.
11. Yang Y., Morillo I.G., Hospedales T.M. Deep neural decision trees // arXiv preprint arXiv: 1806.06988. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1806.06988.
12. Deep neural decision forests / P. Kotschieder [et al.] // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. P. 1467–1475.
13. A knowledge-driven fuzzy logic framework for supporting decision-making entities / D. Muñoz-Valero [et al.] // Applied Soft Computing. 2025. P. 113415. DOI: 10.1016/j.asoc.2025.113415.

14. Maksimov A. V. Metody podderzhki prinyatiya reshenij v operativnom upravlenii pri chrezvychajnyh situaciyah: obzor issledovanij // Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie. 2023. № 2 (42). S. 91–102. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-91-102.
15. Conceptual Framework of an Intelligent Decision Support System for Smart City Disaster Management / D. Jung [et al.] // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 2. P. 666. DOI: 10.3390/app10020666.
16. Bot K., Borges J.G. A Systematic Review of Applications of Machine Learning Techniques for Wildfire Management Decision Support // Inventions. 2022. Vol. 7. № 1. P. 15. DOI: 10.3390/inventions7010015.
17. Abid F. A Survey of Machine Learning Algorithms Based Forest Fires Prediction and Detection Systems // Fire technology. 2021. Vol. 57. № 2. P. 559–590. DOI: 10.1007/s10694-020-01056-z.
18. A Brief Review of Machine Learning Algorithms in Forest Fires Science / R. Alkhatib [et al.] // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 14. P. 8275. DOI: 10.3390/app13148275.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 06.05.2025; одобрена после рецензирования: 20.06.2025; принята к публикации: 23.06.2025

**Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 06.05.2025; approved after review: 20.06.2025; accepted for publication: 23.06.2025

**Сведения об авторах:**

**Медведев Дмитрий Валерьевич**, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: [meedveddv@mail.ru](mailto:meedveddv@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0002-9436-4376>, SPIN-код: 8464-6705

**Матвеев Александр Владимирович**, заведующий кафедрой прикладной математики и безопасности информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: [fcvega\\_10@mail.ru](mailto:fcvega_10@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>, SPIN-код: 5778-8821

**Information about the authors:**

**Medvedev Dmitry V.**, adjunct of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: [meedveddv@mail.ru](mailto:meedveddv@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0002-9436-4376>, SPIN: 8464-6705

**Matveev Alexander V.**, head of the department of applied mathematics and information technology security Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: [fcvega\\_10@mail.ru](mailto:fcvega_10@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>, SPIN: 5778-8821