

Модель поддержки принятия решений при реагировании на лесные пожары в горной местности с использованием нечеткой логики

Р.Т. Матиев, А.В. Матвеев, А.А. Таранцев

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург

Аннотация: В статье представлена модель поддержки принятия решений при реагировании на лесные пожары в горной местности с использованием аппарата нечеткой логики. Методы исследования включают применение метода Мамдани для построения системы нечеткого вывода, использование лингвистических переменных для описания состояния среды и факторов риска, а также формирование базы правил на основе экспертных знаний. Разработанная модель реализует принципы ситуационного управления и обеспечивает определение уровня пожарной опасности, выбор метода тушения, тактики реагирования и оптимальное распределение ресурсов. Практическая значимость заключается в возможности применения модели в системах поддержки решений подразделений МЧС России для оперативного планирования и прогнозирования при тушении лесных пожаров в сложных горных условиях.

Ключевые слова: лесные пожары, горная местность, нечеткая логика, поддержка принятия решений, интеллектуальные системы, ситуационное управление.

Введение

В последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция увеличения частоты и масштабов природных пожаров, в том числе в горных и предгорных районах. Это связано с целым комплексом факторов – климатическими изменениями, повышением среднегодовых температур, изменением структуры растительного покрова, деятельностью человека и ухудшением экологического состояния природных экосистем. Лесные пожары становятся не только природной, но и социально-экономической проблемой, оказывая воздействие на безопасность населения, устойчивость инфраструктуры, биоразнообразие и климатические процессы. Особую сложность представляют пожары в горных районах, где особенности рельефа, микроклимата и ограниченные возможности транспортной и коммуникационной инфраструктуры значительно усложняют реагирование и принятие управленческих решений [1].

Эффективность реагирования на лесные пожары в значительной степени определяется качеством управленческих решений, принимаемых в условиях ограниченного времени и неполной информации [2, 3]. В условиях горной местности задачи мониторинга и прогнозирования динамики пожара осложняются пространственной неоднородностью среды и труднодоступностью территорий. При этом решение задачи управления требует интеграции данных из различных источников – спутниковых наблюдений, метеорологических измерений, наземных наблюдений, а также экспертных оценок специалистов противопожарных служб [4]. Данные источники различаются по точности, масштабам и времени обновления, что порождает высокий уровень неопределённости при формировании картины текущей обстановки и выработке решений.

В существующих системах управления лесными пожарами используется широкий спектр математических и информационных моделей, включая вероятностные, статистические, агент-ориентированные и имитационные подходы. Однако для большинства таких моделей характерно предположение о наличии детерминированных входных данных и стабильных связей между параметрами [5]. На практике же параметры, влияющие на развитие пожара, изменяются динамически и зачастую известны лишь приблизительно. Следовательно, при управлении процессами реагирования возникает необходимость учитывать неопределенность и многозначность исходной информации, что требует применения гибких интеллектуальных методов обработки данных [6].

Одним из наиболее эффективных подходов к решению задач управления в условиях неопределенности является использование аппарата нечеткой логики [7, 8]. Нечеткая логика позволяет моделировать рассуждения, основанные не на точных числовых значениях, а на лингвистических переменных – таких, как «высокая температура», «сильный ветер», «низкая

влажность» и т.д. Это обеспечивает возможность описания экспертных знаний и формализации опыта специалистов, действующих в неопределённых ситуациях. Преимуществом нечеткой логики является также способность учитывать качественные взаимосвязи между параметрами, которые трудно выразить традиционными математическими формулами.

Дополнительной особенностью горной местности является сложный характер рельефа, который влияет как на скорость распространения огня, так и на доступность участков для проведения тушения. Ветер в горах часто имеет локальные вихревые структуры, изменяющиеся в зависимости от ориентации склонов и долин, а влажность и температура воздуха могут резко меняться в течение суток. Эти факторы усиливают неопределенность, делая невозможным использование простых линейных зависимостей для прогнозирования развития пожара. В таких условиях нечеткие модели, позволяющие объединять количественные измерения и качественные экспертные оценки, становятся особенно востребованными.

Таким образом, на современном этапе актуальной научной задачей является разработка модели поддержки принятия решений при реагировании на лесные пожары, способной работать в условиях высокой неопределенности, ограниченности информации и динамических изменений параметров.

Методы исследования

В существующей практике можно выделить три основных подхода к моделированию управления в чрезвычайных ситуациях: детерминированный, вероятностный и интеллектуальный (экспертный).

Детерминированные модели основаны на строгих математических зависимостях, связывающих входные параметры (метеоусловия, свойства растительности и т.д.) с выходными результатами (скорость распространения пожара, вероятность перехода огня и т.п.). Такие модели дают хорошие

результаты при наличии точных данных, но в реальных условиях, особенно в горной местности, их применение ограничено, поскольку исходные параметры изменяются непредсказуемо.

Вероятностные модели учитывают случайный характер развития событий, используя методы статистического анализа и теории вероятностей. Они позволяют оценивать вероятность возникновения определённых сценариев, но требуют большого объёма репрезентативных данных, что в условиях оперативного реагирования зачастую невозможно. Кроме того, интерпретация вероятностных результатов для управленцев затруднена, поскольку не всегда очевидно, как на их основе выработать конкретное решение.

Интеллектуальные модели, включая экспертные системы и методы искусственного интеллекта, позволяют формализовать знания специалистов и использовать их для анализа сложных, плохо формализуемых ситуаций. Среди этих методов особое место занимает аппарат нечеткой логики, который обеспечивает возможность моделирования процессов принятия решений в условиях неопределённости и неполноты информации. Нечеткая логика опирается на концепцию нечетких множеств, предложенную Л. Заде, и предоставляет инструмент для описания ситуаций, где границы между классами объектов или состояниями системы не являются строго определёнными.

Использование аппарата нечеткой логики в контексте управления обеспечивает гибкость, интерпретируемость и адаптивность процесса принятия решений, что делает этот подход методологически обоснованным для решения поставленной задачи.

Наиболее распространёнными методами нечеткого вывода являются метод Мамдани и метод Сугено. Метод Мамдани применяется для описания сложных экспертных знаний в форме «Если–То» с лингвистическими

выходами. Он интуитивно понятен и широко используется в системах поддержки принятия решений. Метод Сугено, напротив, чаще используется в инженерных задачах, где требуется числовой выход, определяемый линейной комбинацией входных переменных [9]. В контексте реагирования на лесные пожары метод Мамдани является более подходящим, поскольку позволяет включать в модель качественные экспертные суждения и обеспечивает интерпретируемость решений для операторов.

Результаты исследования и их обсуждение

Для моделирования процесса реагирования на лесные пожары в горной местности необходимо определить набор входных параметров, описывающих текущее состояние среды, и выходных параметров, характеризующих рекомендации системы. Поскольку значительная часть данных носит неопределённый и динамический характер, модель должна обеспечивать гибкое агрегирование информации и формирование логически обоснованных решений на её основе.

Обобщенные лингвистические входные переменные модели представлены в табл. 1. Каждая из этих переменных описывается набором лингвистических термов, соответствующих нечетким множествам.

Выходные переменные модели представлены в таблице 2.

Процесс нечеткого вывода состоит из последовательности шагов, представленных на Рис. 1.

После определения функций принадлежности формируется нечеткая база знаний, представленная в виде хранилища базы правил. Примеры продукционных правил для модели могут быть следующими:

1. ЕСЛИ (Скорость ветра – высокая) И (Наличие осадков – отсутствуют), ТО (Уровень пожарной опасности – высокий).

2. ЕСЛИ (Уклон местности – крутой) И (Тип растительности хвойный), ТО (Скорость распространения высокая).

3. ЕСЛИ (Расстояние до населенного пункта – близко) И (Скорость фронта пожара – высокая), ТО (Тактика реагирования – эвакуация).

Таблица № 1

Входные переменные модели

Признаки	Множество термов	Диапазон значений
Время суток	{дневное, сумеречное, ночное}	Дневное: 6:00–18:00; Сумеречное: 5:00–6:00 и 18:00–19:00; Ночное: 19:00–5:00
Искусственное освещение	{нет, слабое, умеренное, сильное}	По интенсивности света (лк): <1, 1–5, 5–20, >20
Тип пожара	{низовой, верховой, смешанный, подземный}	Классификация по типу горения (включая торфяники)
Скорость ветра	{низкая, средняя, высокая, очень высокая}	В м/с: <5, 5–10, 10–15, >15
Скорость фронта пожара	{низкая, средняя, высокая}	В м/мин: <5, 5–15, >15
Уклон местности	{пологий, средний, крутой, очень крутой}	В градусах: 0–5°, 5–15°, 15–20°, >20°
Расстояние до населенного пункта	{близко, средне, далеко}	В км: <5, 5–7, >7
Количество доступных сил	{низкое, среднее, высокое}	Относительно нормы: <0.7, 0.7–1.3, >1.3
Количество доступных средств	{низкое, среднее, высокое}	По объёму воды, технике, персоналу (нормировано)
Доступность подъездных путей	{недоступно, ограничено, доступно, полностью доступно}	По состоянию дороги и блокировкам
Наличие осадков	{отсутствуют, слабые, умеренные, сильные, очень сильные}	По интенсивности (мм/час): 0, 0.1–1, 1–5, 5–10, >10
Площадь пожара	{малая, средняя, большая, очень большая, критическая}	В гектарах: <2, 2, 1–20, 21–200, 201–2000, >2000
Наличие водоисточников	{отсутствуют, удалённые, средние, близкие, очень близкие}	Расстояние до источника: >1 км, 0.8–0.4 км, 0.4–0.2 км, 0.2–0.1 км, <0.1 км

Таблица № 2

Входные переменные модели

Переменные	Множество термов
Уровень пожарной опасности	{низкий, средний, высокий, критический}
Метод тушения	{косвенный, прямой}
Применить авиацию	{да, нет}
Применить наземные силы	{да, нет}
Применить наземные силы и авиацию	{да, нет}
Тактика реагирования	{наблюдение, локализация, тушение, эвакуация}

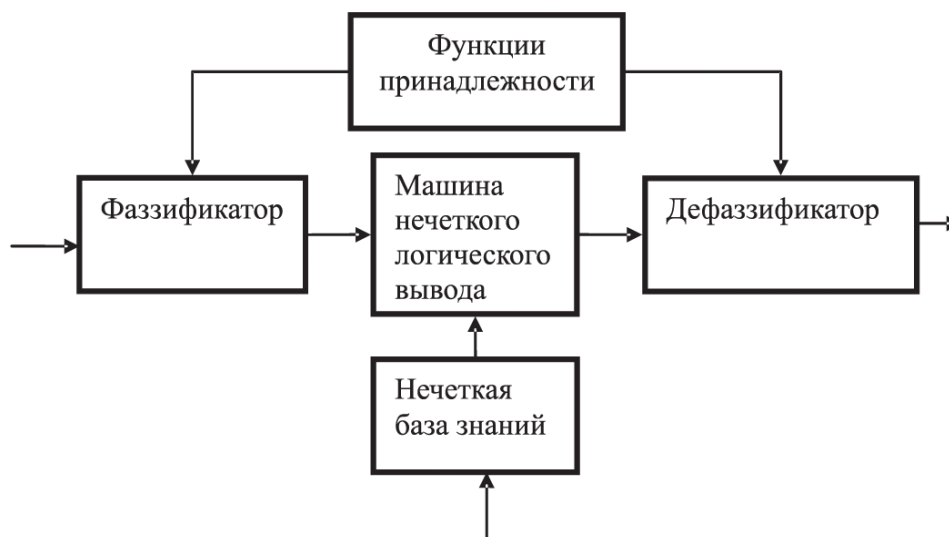


Рис. 1. – Процесс нечеткого вывода

Каждое правило имеет свой вес, отражающий его значимость в принятии решения. Весовые коэффициенты могут определяться экспертами или адаптироваться автоматически при обучении системы.

Процесс нечеткого логического вывода включает несколько стадий:

1. Фаззификация – преобразование точных входных данных (например, температура = 30 °С) в нечеткие значения (температура «высокая» с принадлежностью 0.7).

2. Агрегация правил – определение степени истинности каждого правила на основе входных данных.

3. Аккумуляция – объединение всех правил, относящихся к одному выходу, в результирующее нечеткое множество.

4. Дефазификация – вычисление точного результата, например уровня пожарной опасности (в диапазоне от 0 до 1 или в шкале категорий).

Выходной результат интерпретируется как количественная и качественная оценка текущего риска и служит основой для принятия управленческого решения.

Для практической реализации модели поддержки решений важно обеспечить совмещение формализованных данных (метеопоказатели, географические параметры) и экспертных знаний специалистов противопожарных служб. Эксперты способны формулировать эвристические зависимости, отражающие эмпирические закономерности, недоступные традиционным статистическим моделям. Нечеткая логика обеспечивает естественный механизм интеграции этих знаний через систему правил.

Разработанная модель поддержки принятия решений при реагировании на лесные пожары в горной местности основана на интеграции данных дистанционного зондирования, метеорологических наблюдений и экспертных знаний с использованием аппарата нечеткой логики.

Модель реализует принципы ситуационного управления, согласно которым процесс принятия решения строится на анализе текущего состояния системы, прогнозировании возможных сценариев и выборе оптимальной стратегии действий.

Предлагаемая модель реализована на языке программирования Python с использованием библиотеки Skfuzzy. Фрагмент базы правил нечеткого вывода представлен на рисунке 2. В предложенных алгоритмах используется кусочно-линейная функция принадлежности.

```
# Правила 1-10: Условия для косвенного метода
ctrl.Rule(self.fire_type['верховой'] & self.wind_speed['высокая'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.fire_speed['высокая'] & self.terrain_slope['крутой'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.wind_speed['очень_высокая'] & self.fire_area['большая'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.fire_type['смешанный'] & self.terrain_slope['очень_крутой'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.precipitation['отсутствуют'] & self.wind_speed['средняя'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.fire_area['очень_большая'] & self.forces_amount['низкое'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.road_access['недоступно'] & self.water_sources['отсутствуют'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.time_of_day['ночное'] & self.artificial_light['нет'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.fire_type['подземный'] & self.water_sources['удаленные'], self.extinguishing_method['косвенный']),
ctrl.Rule(self.terrain_slope['очень_крутой'] & self.equipment_amount['низкое'], self.extinguishing_method['косвенный']),

# Правила 11-20: Условия для прямого метода
ctrl.Rule(self.fire_type['низовой'] & self.wind_speed['низкая'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.fire_speed['низкая'] & self.terrain_slope['пологий'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.precipitation['слабые'] & self.water_sources['очень_близкие'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.fire_area['малая'] & self.forces_amount['высокое'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.road_access['полностью_доступно'] & self.equipment_amount['высокое'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.time_of_day['дневное'] & self.distance_settlement['близко'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.wind_speed['низкая'] & self.water_sources['близкие'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.fire_type['низовой'] & self.precipitation['умеренные'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.terrain_slope['пологий'] & self.forces_amount['среднее'], self.extinguishing_method['прямой']),
ctrl.Rule(self.fire_area['средняя'] & self.road_access['доступно'], self.extinguishing_method['прямой']),
```

Рис. 2. – Фрагмент базы правил нечеткого вывода

Интерфейс программного обеспечения представлен на рисунке 3.

Рис. 3. – Интерфейс вывода полученных результатов

Модель продемонстрировала высокую интерпретируемость решений. Руководители тушения пожара смогли объяснить каждое выданное системой

заключение через активированные правила, что является критическим требованием для систем поддержки решений в чрезвычайных ситуациях.

Таким образом, результаты исследования подтверждают эффективность применения аппарата нечеткой логики для построения интеллектуальной модели поддержки принятия решений при реагировании на лесные пожары в горной местности. Разработанная модель обеспечивает интерпретируемое, устойчивое и адаптивное управление процессом реагирования, что повышает обоснованность принимаемых решений и способствует снижению последствий чрезвычайных ситуаций природного характера.

Заключение

Реагирование на лесные пожары в горной местности представляет собой одну из наиболее сложных задач природно-техногенной безопасности. Высокая динамичность развития пожаров, неоднородность географических условий, ограниченность ресурсов и информационная неопределённость существенно усложняют процесс принятия управленческих решений. Проведённое исследование было направлено на разработку модели, способной повысить обоснованность решений органов управления в условиях неполноты, противоречивости и неопределённости исходных данных.

Основными преимуществами применения нечеткой логики в задачах управления реагированием на пожары является возможность моделирования сложных, плохо формализуемых зависимостей, высокая интерпретируемость решений, устойчивость к неполноте и неточности данных, возможность интеграции с системами искусственного интеллекта и машинного обучения.

К ограничениям метода можно отнести зависимость от корректности базы правил и функций принадлежности, необходимость экспертной настройки параметров, ограниченную способность к самообучению без внедрения адаптивных алгоритмов.

Результаты тестирования подтвердили, что разработанная модель позволяет в реальном времени формировать рекомендации по тактике реагирования, ранжировать участки по степени риска и обеспечивать поддержку для руководителей тушения пожара.

Перспективным направлением развития является объединение нечеткой модели с нейронными сетями, что позволит реализовать нечетко-нейронные гибридные системы, способные адаптировать функции принадлежности и веса правил на основе накопленного опыта [10, 11]. Это обеспечит самонастройку модели и повышение точности прогнозов при изменении климатических и географических условий.

Литература

1. Xu C., You C. Climate-linked increasing vegetation fires in global high mountains // *Ecography*. 2022. V. 2022. No. 12. P. e06527. DOI: 10.1111/ecog.06527.
2. Martell D. L. A review of recent forest and wildland fire management decision support systems research // *Current Forestry Reports*. 2015. V. 1. No. 2. pp. 128-137. DOI: 10.1007/s40725-015-0011-y.
3. Simon B., Crowley C., Franco F. The costs and costs avoided from wildfire fire management—A conceptual framework for a value of information analysis // *Frontiers in Environmental Science*. 2022. V. 10. P. 804958. DOI: 10.3389/fenvs.2022.804958.
4. Заяц А.М., Логачев А.А. Математические модели для поддержки принятия решений по предупреждению лесных пожаров при ограниченном объеме исходных данных // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 5. С. 342-347. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-342-347. EDN VYXEIJ.
5. 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. EDN CJCPWN.

6. Лабинский А.Ю., Моторыгин Ю.Д., Шестаков А.В. Поддержка принятия решений в условиях риска чрезвычайных ситуаций на основе анализа неструктурированных данных // Инженерный вестник Дона. 2024. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9560.

7. Медведев Д.В., Матвеев А.В. Алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений при угрозах лесных пожаров // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". 2025. № 2. С. 35-48. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-2-35-48. EDN OKGHLE.

8. Nebot A., Mugica F. Forest fire forecasting using fuzzy logic models // Forests. 2021. V. 12. No. 8. P. 1005. DOI: 10.3390/f12081005.

9. Blej M., Azizi M. Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type fuzzy inference systems for fuzzy real time scheduling // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. V. 11. No. 22. pp. 11071-11075.

10. Медведев Д.В. Модель прогнозирования лесных пожаров на основе нейро-нечеткой системы ANFIS // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". 2023. № 4. С. 185-198. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-185-198. EDN MXLKBI.

11. Медведев Д.В., Матвеев А.В. Сравнительная оценка обоснованности принимаемых решений при реагировании на угрозы лесных пожаров при использовании систем поддержки принятия решений // Инженерный вестник Дона. 2025. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10433.

References

1. Xu C., You C. Ecography. 2022. V. 2022. No. 12. P. e06527. DOI: 10.1111/ecog.06527.
2. Martell D. L. Current Forestry Reports. 2015. V. 1. No. 2. P. 128-137. DOI: 10.1007/s40725-015-0011-y.
3. Simon B., Crowley C., Franco F. Frontiers in Environmental Science. 2022. V. 10. P. 804958. DOI: 10.3389/fenvs.2022.804958.
4. Zayacz A.M., Logachev A.A. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Priborostroenie. 2016. T. 59, № 5. pp. 342-347. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-342-347. EDN VYXEIJ.
5. Maksimov A.V. Nacional`naya bezopasnost` i strategicheskoe planirovanie. 2023. № 2(42). pp. 91-102. DOI: 10.37468/2307-1400-2023-2-91-102. EDN CJCPWN.
6. Labinskij A.Yu., Motory`gin Yu.D., Shestakov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9560.
7. Medvedev D.V., Matveev A.V. Nauchno-analiticheskij zhurnal Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby` MChS Rossii. 2025. № 2. pp. 35-48. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-2-35-48. EDN OKGHLE.
8. Nebot A., Mugica F. Forests. 2021. V. 12. No. 8. P. 1005. DOI: 10.3390/f12081005.
9. Blej M., Azizi M. International Journal of Applied Engineering Research. 2016. V. 11. No. 22. pp. 11071-11075.
10. Medvedev D.V. Nauchno-analiticheskij zhurnal Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby` MChS Rossii. 2023. № 4. pp. 185-198. DOI: 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-185-198. EDN MXLKBI.



11. Medvedev D.V., Matveev A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 10.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10433.

Дата поступления: 14.10.2025

Дата публикации: 26.11.2025