

УДК 625.7:656.13:519.816

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-36-49

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ КОГНИТИВНОГО АНАЛИЗА В СИСТЕМУ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

*д-р техн наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ, канд. техн. наук, доц. С.В. БОГДАНОВИЧ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Представлен инновационный подход к оценке опасности участков автомобильных дорог, основанный на интеграции методов когнитивного моделирования и нечеткой логики. Предложена комплексная методика, позволяющая учитывать широкий спектр количественных и качественных характеристик дорожных условий, а также моделировать сложные нелинейные взаимосвязи между различными факторами риска. Разработанный подход включает несколько ключевых этапов: построение детализированной когнитивной карты, отражающей структуру взаимосвязей между факторами безопасности; формализацию факторов опасности с использованием аппарата нечетких множеств; алгоритм анализа рисков, основанный на импульсном моделировании. Отмечены перспективные направления дальнейших исследований, включая интеграцию разработанного подхода с геоинформационными системами, применение методов машинного обучения для автоматической настройки параметров модели и разработку динамических когнитивных карт, способных адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени.

***Ключевые слова:** безопасность дорожного движения, когнитивное моделирование, нечеткая логика, оценка рисков, автомобильные дороги, прогнозирование аварийности.*

Введение. В современном мире проблема безопасности дорожного движения остается одной из наиболее актуальных. Несмотря на постоянное совершенствование транспортных средств и дорожной инфраструктуры, количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и их последствия продолжают оставаться на высоком уровне, особенно на загородных автомобильных дорогах. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире в результате ДТП погибает около 1,3 млн человек, а еще от 20 до 50 млн получают травмы различной степени тяжести¹.

Традиционные методы оценки безопасности дорожного движения, основанные на статистическом анализе уже произошедших ДТП, зачастую не позволяют своевременно выявлять потенциально опасные участки дорог и принимать превентивные меры. В связи с этим возникла необходимость в разработке новых подходов к анализу и оценке безопасности дорожного движения, которые бы учитывали многофакторность и сложность взаимодействия элементов системы «водитель–автомобиль–дорога–среда» (ВАДС).

Одним из перспективных направлений в решении данной проблемы является применение методов когнитивного моделирования и нечеткой логики. Эти подходы дают возможность учитывать не только количественные, но и качественные характеристики дорожных условий, а также моделировать сложные причинно-следственные связи между различными факторами, влияющими на безопасность движения.

Цель данного исследования – разработка методики оценки опасности участков автомобильных дорог на основе когнитивного моделирования с применением аппарата нечеткой логики. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих подходов к оценке безопасности дорожного движения и выявить их ограничения.
2. Разработать концептуальную модель оценки опасности участков загородных автодорог с учетом ключевых факторов риска.
3. Формализовать факторы опасности с использованием теории нечетких множеств.
4. Построить когнитивную карту взаимосвязей между факторами риска и уровнем опасности дорожных участков.
5. Разработать алгоритм анализа и оценки рисков на основе когнитивной модели.

Научная новизна исследования заключается в интеграции методов когнитивного моделирования и нечеткой логики для комплексной оценки опасности участков автомобильных дорог, что позволяет учитывать неопределенность и субъективность экспертных оценок, а также моделировать сложные взаимосвязи между различными факторами риска.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанной методики для выявления потенциально опасных участков дорог, а также для оптимизации мероприятий по повышению безопасности дорожного движения на существующих автомобильных дорогах.

¹ Global status report on road safety 2023. – Geneva: World Health Organization; 2023. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. – URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/9789240086517-eng.pdf>

Основная часть. *Когнитивное моделирование в контексте дорожной безопасности.* Когнитивное моделирование представляет собой инструмент для анализа и прогнозирования поведения сложных систем, особенно в условиях неопределенности и неполноты информации. В контексте дорожной безопасности этот подход позволяет учитывать многочисленные взаимосвязанные факторы, влияющие на уровень опасности участков автомобильных дорог.

Основой когнитивного моделирования является построение когнитивной карты – ориентированного графа, в котором вершины соответствуют факторам (концептам), а дуги отражают причинно-следственные связи между ними [1]. В случае оценки безопасности дорожного движения концептами могут выступать различные характеристики дороги, окружающей среды, транспортного потока и поведения водителей.

Математически когнитивная карта может быть представлена в виде кортежа

$$G = (V, E, W),$$

где $V = \{v_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ – множество вершин (концептов);

$E = \{e_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n$ – множество дуг, отражающих взаимосвязи между концептами;

$W = \{w_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n$ – множество весов дуг, характеризующих силу влияния концептов друг на друга.

Для анализа когнитивной карты и прогнозирования изменений в системе используется аппарат импульсных процессов [2]. Изменение значения концепта v_i в момент времени $t + 1$ может быть описано как

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \sum_{j \neq i} (j \neq i) w_{ji} * [v_j(t) - v_j(t-1)], \quad (1)$$

где $v_i(t)$ – значение i -го концепта в момент времени t ;

w_{ji} – вес влияния j -го концепта на i -й.

Применение когнитивного моделирования в оценке безопасности дорожного движения имеет ряд преимуществ:

- возможность учета как количественных, так и качественных факторов, влияющих на безопасность движения;
- способность моделировать сложные, нелинейные взаимосвязи между различными аспектами дорожной ситуации;
- гибкость в адаптации модели к конкретным условиям и особенностям исследуемого участка дороги;
- возможность проведения сценарного анализа и оценки эффективности различных мероприятий по повышению безопасности.

Однако при использовании когнитивного моделирования в задачах оценки дорожной безопасности необходимо учитывать следующее:

- субъективность при определении структуры когнитивной карты и весов связей между концептами. Для минимизации этого эффекта рекомендуется привлечение группы экспертов и использование методов согласования экспертных оценок;
- сложность формализации некоторых факторов, влияющих на безопасность движения (например, психологическое состояние водителя или внезапные изменения погодных условий);
- необходимость регулярного обновления и калибровки модели с учетом новых данных и изменений в дорожной инфраструктуре.

Для преодоления этих ограничений и повышения точности оценки опасности участков загородных автомобильных дорог целесообразно интегрировать методы когнитивного моделирования с аппаратом нечеткой логики, что позволит более адекватно учитывать неопределенность и нечеткость исходных данных.

В целом применение когнитивного моделирования открывает новые возможности для комплексного анализа и прогнозирования уровня опасности участков автомобильных дорог, что может существенно повысить эффективность мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения.

Нечеткая логика и ее применение в оценке дорожных рисков. Нечеткая логика, впервые предложенная Лотфи Заде в 1965 г. [3], представляет собой математический аппарат для работы с неточными, приближенными рассуждениями. В отличие от классической булевой логики, где высказывания могут быть либо истинными, либо ложными, нечеткая логика позволяет оперировать промежуточными значениями истинности, что делает ее особенно полезной при анализе сложных систем с высокой степенью неопределенности.

В контексте оценки дорожных рисков применение нечеткой логики позволяет более адекватно моделировать реальные ситуации, где границы между «безопасным» и «опасным» состояниями дороги часто размыты и зависят от множества взаимосвязанных факторов.

Основные понятия нечеткой логики, применимые к оценке дорожных рисков, включают:

- лингвистические переменные: например, «скорость движения», «состояние дорожного покрытия», «видимость»;

– нечеткие множества: например, множество «высокая скорость» может быть определено функцией принадлежности $\mu(x)$, где x – скорость транспортного средства:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 80 \text{ км/ч} \\ (x - 80) / 40, & \text{если } 80 < x < 120 \text{ км/ч} \\ 1, & \text{если } x \geq 120 \text{ км/ч} \\ \end{cases}$$

– лингвистические правила: например, «ЕСЛИ скорость высокая И состояние покрытия плохое, ТО риск ДТП высокий».

Процесс оценки дорожных рисков с использованием нечеткой логики обычно включает следующие этапы:

1. Фаззификация: преобразование четких входных данных в нечеткие значения с использованием функций принадлежности.
2. Применение нечетких правил: обработка входных данных с помощью базы правил, основанных на экспертных знаниях.
3. Агрегирование: объединение результатов применения различных правил.
4. Дефаззификация: преобразование нечетких выходных данных в четкие значения.

Для реализации этого процесса можно использовать различные методы нечеткого вывода, такие как метод Мамдани или метод Сугено [4].

Применение нечеткой логики в оценке дорожных рисков имеет ряд преимуществ:

- возможность работы с качественными описаниями и экспертными оценками;
- учет неопределенности и неточности исходных данных;
- интуитивно понятная интерпретация результатов;
- гибкость в настройке модели под конкретные условия;

Существуют также и некоторые ограничения:

- субъективность при определении функций принадлежности и правил вывода;
- сложность учета динамических изменений в системе;
- потенциальная вычислительная сложность при большом количестве входных переменных.

Для преодоления этих ограничений и повышения эффективности оценки дорожных рисков целесообразно интегрировать методы нечеткой логики с когнитивным моделированием. Это позволяет создать гибридную модель, сочетающую преимущества обоих подходов.

В контексте оценки опасности участков автомобильных дорог нечеткая логика может быть использована для решения следующих задач: формализация экспертных знаний о влиянии различных факторов на безопасность движения; моделирование нечетких взаимосвязей между элементами когнитивной карты; агрегирование различных показателей риска в интегральную оценку опасности участка дороги.

Например, можно определить нечеткое отношение R между множеством факторов риска X и уровнем опасности участка дороги Y :

$$R: X \rightarrow Y, R(x, y) = \mu R(x, y),$$

где $\mu R(x, y)$ – функция принадлежности, отражающая степень влияния фактора x на уровень опасности y .

Интегральная оценка опасности участка дороги может быть получена с использованием операции максиминной свертки:

$$\mu Y(y) = \max(\min(\mu X(x), \mu R(x, y))),$$

где $\mu X(x)$ – функция принадлежности входного нечеткого множества факторов риска;

$\mu Y(y)$ – функция принадлежности выходного нечеткого множества уровня опасности.

Таким образом, интеграция нечеткой логики в когнитивную модель оценки опасности участков автомобильных дорог позволяет более адекватно учитывать неопределенность и сложность взаимосвязей между различными факторами риска, что повышает точность и надежность получаемых оценок.

Ключевые факторы опасности на автомобильных дорогах. Для эффективной оценки опасности участков автомобильных дорог необходимо выделить и систематизировать ключевые факторы, влияющие на безопасность дорожного движения. На основе анализа литературы и статистических данных можно выделить следующие группы факторов (рисунок 1).

Важно отметить, что влияние этих факторов на безопасность дорожного движения часто носит нелинейный характер и может усиливаться при их сочетании. Например, влияние недостаточного радиуса кривой в плане может быть особенно опасным при мокром покрытии и в темное время суток [5]. Кроме этого, в случае наличия на участке отдельных объектов, влияющих на безопасность движения (пересечения, искусственные сооружения и др.), их также можно выделить.

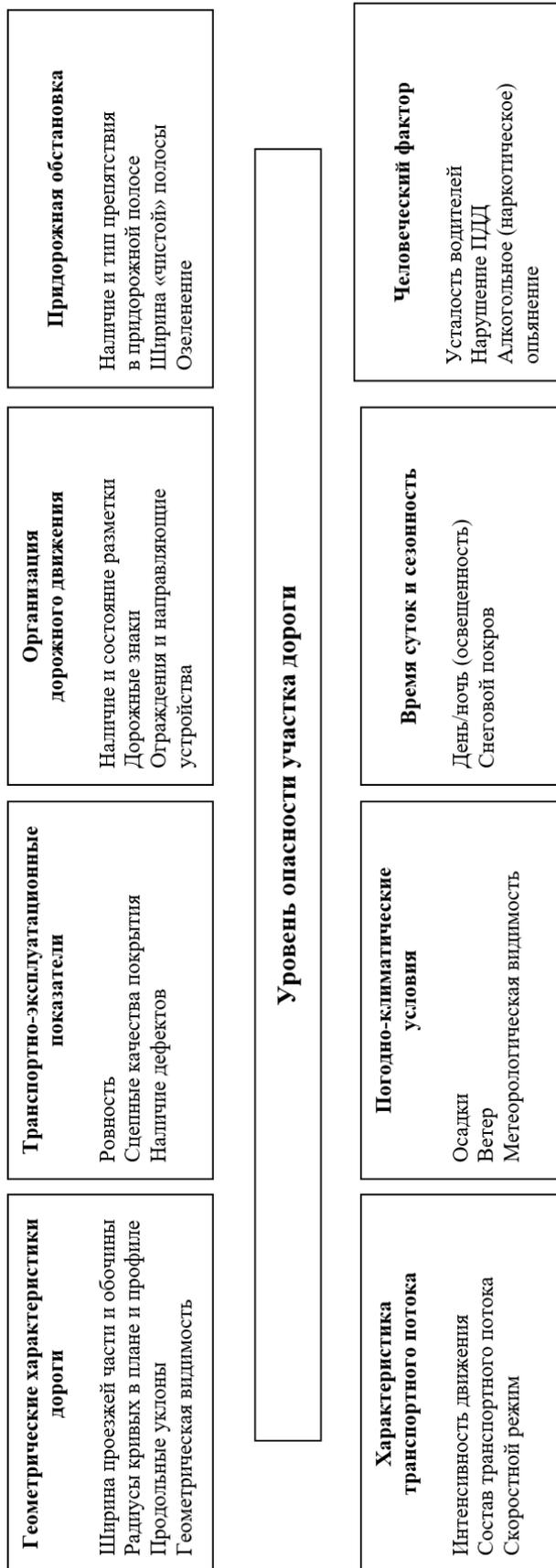


Рисунок 1. – Основные факторы опасности

Для количественной оценки влияния различных факторов на аварийность часто используются статистические методы, к примеру, регрессионный анализ. Так, была предложена модель для оценки вероятности ДТП на загородных дорогах [6]:

$$P(\text{ДТП}) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}{(1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n))},$$

где X_i – значения факторов риска;
 β_i – коэффициенты регрессии.

Однако такие модели не всегда точно отражают сложные взаимосвязи между факторами и могут давать некорректные результаты при экстраполяции за пределы диапазона исходных данных.

Применение когнитивного моделирования и нечеткой логики позволяет преодолеть эти ограничения и учесть качественные оценки экспертов. Например, в работе [7] предложена нечеткая когнитивная карта для оценки рисков проекта автомагистрали. При построении когнитивной модели оценки опасности участков автомобильных дорог необходимо не только выявить ключевые факторы, но и определить характер и силу их взаимного влияния. Это требует привлечения экспертов в области безопасности дорожного движения и анализа статистических данных о ДТП на различных участках дорог.

Таким образом, комплексный учет ключевых факторов опасности на автомобильных дорогах с использованием методов когнитивного моделирования и нечеткой логики позволяет создать более точную и гибкую систему оценки рисков, способную адаптироваться к различным условиям и учитывать локальные особенности дорожной сети.

Разработка когнитивной модели оценки опасности дорожных участков. Разработка когнитивной модели для оценки опасности участков автомобильных дорог включает несколько ключевых этапов:

1. Определение концептов (факторов) модели.
2. Установление причинно-следственных связей между концептами.
3. Определение силы влияния (весов) связей.
4. Построение когнитивной карты.
5. Верификация и валидация модели.

На первом этапе на основе анализа литературы и экспертных оценок выделяются основные факторы, влияющие на безопасность дорожного движения. Эти факторы становятся концептами когнитивной модели.

В нашем случае выделяем следующие группы концептов:

- геометрические характеристики дороги (G);
- транспортно-эксплуатационные показатели (R);
- организация дорожного движения (T);
- придорожная обстановка (E);
- характеристики транспортного потока (V);
- погодные-климатические условия (W);
- время суток и сезонность (S);
- человеческий фактор (H);
- уровень опасности участка дороги (D).

Каждая группа может быть детализирована до конкретных показателей, например, $G1$ – ширина проезжей части, $G2$ – радиус кривой в плане и т.д.

На втором этапе устанавливаются причинно-следственные связи между концептами. Для этого используются методы экспертных оценок, такие как метод Дельфи, или метод анализа иерархий [8]. Например, можно установить, что транспортно-эксплуатационные показатели (R) влияют на уровень опасности участка (D), а погодные-климатические условия (W) – как на транспортно-эксплуатационные показатели (R), так и непосредственно на уровень опасности (D).

На третьем этапе определяется сила влияния (веса) установленных связей. Для этого можно использовать шкалу от -1 до 1 , где отрицательные значения означают обратную зависимость, а положительные – прямую. Например, улучшение транспортно-эксплуатационных показателей (R) снижает уровень опасности (D), поэтому вес этой связи будет отрицательным. Для определения весов можно использовать методы нечеткого оценивания [9].

На четвертом этапе строится когнитивная карта в виде ориентированного графа. Вершинами графа являются концепты, а дуги представляют причинно-следственные связи с соответствующими весами. Математически когнитивная карта может быть представлена в виде матрицы смежности $W = [w_{ij}]$, где w_{ij} – вес влияния концепта i на концепт j . Пример фрагмента когнитивной карты представлен на рисунке 2.

На пятом этапе проводятся верификация и валидация модели. Верификация включает проверку внутренней согласованности модели, отсутствия противоречий и полноты учета факторов. Валидация предполагает проверку соответствия модели реальным данным, например, путем сравнения результатов моделирования с историческими данными о ДТП на различных участках дорог [10].

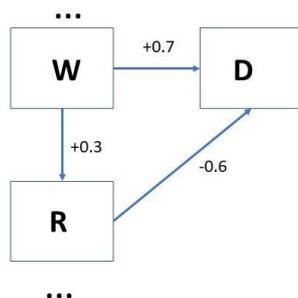


Рисунок 2. – Пример фрагмента когнитивной карты оценки опасности участка дороги

Для анализа разработанной когнитивной модели можно использовать методы импульсного моделирования и сценарного анализа. Импульсное моделирование позволяет оценить, как изменение одного или нескольких концептов повлияет на всю систему. Допустим, можно проанализировать, как улучшение состояния дорожного покрытия повлияет на общий уровень опасности участка.

Сценарный анализ позволяет рассмотреть различные варианты развития ситуации и оценить их последствия. Так, можно смоделировать сценарии изменения погодных условий или интенсивности движения и оценить их влияние на безопасность дорожного движения.

Разработанная когнитивная модель может быть использована для решения следующих задач:

- выявление наиболее критических факторов, влияющих на безопасность конкретного участка дороги;
- прогнозирование изменения уровня опасности при различных сценариях;
- оценка эффективности различных мероприятий по повышению безопасности дорожного движения;
- поддержка принятия решений при планировании дорожных работ и мероприятий по организации движения.

Формализация факторов опасности с использованием нечетких множеств. Для более точного учета неопределенности и субъективности экспертных оценок при анализе факторов опасности на загородных автодорогах целесообразно использовать аппарат теории нечетких множеств. Это позволяет формализовать лингвистические переменные и оперировать нечеткими понятиями, что особенно важно при оценке качественных характеристик дорожных условий.

Процесс формализации факторов опасности с использованием нечетких множеств включает следующие этапы:

1. Определение лингвистических переменных для каждого фактора опасности.
2. Задание терм-множеств для лингвистических переменных.
3. Построение функций принадлежности для каждого термина.
4. Определение правил нечеткого вывода.

Рассмотрим пример формализации фактора «Транспортно-эксплуатационные показатели» (R):

1. Определяем лингвистическую переменную «Транспортно-эксплуатационные показатели» с областью определения $[0, 10]$, где 0 соответствует идеальному состоянию, а 10 – крайне неудовлетворительному.

2. Задаем терм-множество: $T(R) = \{\text{«отличное»}, \text{«хорошее»}, \text{«удовлетворительное»}, \text{«плохое»}, \text{«критическое»}\}$.

3. Строим функции принадлежности для каждого термина. В данном случае можно использовать трапециевидные функции принадлежности²:

$$\mu_{\text{отличное}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq 1 \\ (2 - x)/1, & \text{если } 1 < x < 2 \\ 0, & \text{если } x \geq 2 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{хорошее}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 1 \text{ или } x \geq 4 \\ (x - 1)/1, & \text{если } 1 < x \leq 2 \\ 1, & \text{если } 2 < x \leq 3 \\ (4 - x)/1, & \text{если } 3 < x < 4 \end{cases}$$

... (аналогично для остальных термов)

² Zimmermann H. J. Fuzzy set theory – and its applications. – New York: Springer Science & Business Media, 2011. – URL: [https://kashanu.ac.ir/Files/Content/H_J_Zimmermann%20\(auth_\)%20Fuzzy%20Set%20Theory%20E2%80%94and%20Its%20Applications%202001.pdf](https://kashanu.ac.ir/Files/Content/H_J_Zimmermann%20(auth_)%20Fuzzy%20Set%20Theory%20E2%80%94and%20Its%20Applications%202001.pdf)

4. Определяем правила нечеткого вывода, например:

ЕСЛИ транспортно-эксплуатационные показатели «отличные» ИЛИ «хорошие», ТО уровень опасности «низкий»

ЕСЛИ транспортно-эксплуатационные показатели «удовлетворительные», ТО уровень опасности «средний»

ЕСЛИ транспортно-эксплуатационные показатели «плохие» ИЛИ «критические», ТО уровень опасности «высокий».

Аналогичным образом формализуются и другие факторы опасности, выделенные в когнитивной модели.

Для агрегирования различных факторов и получения интегральной оценки опасности участка дороги можно использовать операции над нечеткими множествами. Например, применить метод Мамдани [4] для нечеткого вывода:

1. Фаззификация входных переменных.
2. Применение нечетких правил (операции min для связки «И», max для «ИЛИ»).
3. Импликация (обычно используется операция min).
4. Агрегирование результатов применения всех правил (операция max).
5. Дефаззификация (например, методом центра тяжести).

Формула для дефаззификации методом центра тяжести

$$y^* = \frac{\int y^* \mu(y) dy}{\int \mu(y) dy},$$

где y^* – четкое значение выходной переменной;

$\mu(y)$ – функция принадлежности результирующего нечеткого множества.

Использование нечетких множеств в сочетании с когнитивным моделированием позволяет:

- учитывать неопределенность и субъективность экспертных оценок;
- оперировать качественными характеристиками дорожных условий;
- моделировать сложные нелинейные зависимости между факторами;
- получать интерпретируемые результаты в лингвистической форме.

В то же время при применении данного подхода имеются и сложности: необходимость тщательного подбора функций принадлежности и правил нечеткого вывода; вероятность возникновения проблемы размерности при большом количестве входных переменных; необходимость валидации модели на реальных данных.

Для преодоления этих ограничений можно использовать методы оптимизации нечетких систем, такие как генетические алгоритмы [12] или нейронечеткие системы типа ANFIS [14]. В целом формализация факторов опасности с использованием нечетких множеств позволяет создать гибкую и адаптивную модель оценки опасности участков загородных автомобильных дорог, способную учитывать сложные взаимосвязи между различными характеристиками дорожных условий и поведением участников движения.

Алгоритм анализа и оценки рисков. На основе разработанной когнитивной модели и формализации факторов опасности с использованием нечетких множеств предлагается следующий алгоритм анализа и оценки рисков для участков автомобильных дорог:

1. Сбор исходных данных.
2. Фаззификация входных переменных.
3. Активация нечетких правил.
4. Агрегирование результатов.
5. Анализ когнитивной карты.
6. Дефаззификация и интерпретация результатов.
7. Оценка чувствительности и устойчивости модели.

Рассмотрим каждый этап подробнее.

1. Сбор исходных данных.

На этом этапе производится сбор информации о характеристиках исследуемого участка дороги, включая геометрические параметры, состояние покрытия, интенсивность движения, статистику ДТП и другие релевантные данные. Используются как объективные измерения, так и экспертные оценки.

2. Фаззификация входных переменных.

Полученные данные преобразуются в нечеткие значения с использованием функций принадлежности, определенных на этапе формализации факторов опасности. Например, измеренная ширина проезжей части 7,2 м может быть преобразована в нечеткое значение «достаточная» с степенью принадлежности 0,8.

3. Активация нечетких правил.

На основе фаззифицированных входных данных активируются соответствующие нечеткие правила. Для каждого правила вычисляется степень его истинности с использованием операций нечеткой логики (например, \min для связки «И», \max для «ИЛИ»)³.

4. Агрегирование результатов.

Результаты применения всех активированных правил объединяются для получения итогового нечеткого множества, характеризующего уровень опасности участка дороги. Обычно для этого используется операция \max .

5. Анализ когнитивной карты.

Проводится анализ взаимовлияний факторов с использованием методов импульсного моделирования [13]. Вычисляются изменения значений концептов при различных сценариях с использованием (1).

6. Дефаззификация и интерпретация результатов.

Полученное нечеткое множество, характеризующее уровень опасности, преобразуется в четкое значение с использованием метода дефаззификации (например, центра тяжести). Результат интерпретируется в терминах лингвистической шкалы опасности и сопоставляется с результатами анализа когнитивной карты.

7. Оценка чувствительности и устойчивости модели.

Анализируется чувствительность модели к изменениям входных параметров и весов связей в когнитивной карте. Для этого могут использоваться методы глобального анализа чувствительности, такие как метод Соболя⁴. Также оценивается устойчивость модели к небольшим возмущениям входных данных.

Формула для оценки индекса чувствительности первого порядка по методу Соболя

$$S_i = \frac{V[E(Y | X_i)]}{V(Y)},$$

где $V[E(Y | X_i)]$ – дисперсия условного математического ожидания выхода Y при фиксированном входе X_i ;

$V(Y)$ – полная дисперсия выхода.

Предложенный алгоритм дает возможность проводить комплексную оценку опасности участков загородных автомобильных дорог с учетом и количественных, и качественных характеристик. Интеграция когнитивного моделирования и нечеткой логики обеспечивает гибкость подхода и возможность его адаптации к различным условиям.

Программное обеспечение для реализации алгоритма оценки рисков. Для практической реализации алгоритма целесообразно использовать специализированное программное обеспечение, которое предоставляет инструменты для работы с нечеткими системами и когнитивными картами. Среди наиболее известных программных продуктов можно назвать следующие:

1. Mental Modeler. Веб-инструмент для построения и анализа когнитивных карт. Позволяет создавать модели взаимосвязей между факторами, оценивать их влияние и проводить сценарный анализ.

2. FCMapper. Программное обеспечение для построения нечетких когнитивных карт (Fuzzy Cognitive Maps). Предоставляет возможности для моделирования сложных систем с учетом неопределенности и нечеткости взаимосвязей.

3. iThink & STELLA. Инструменты для системной динамики и когнитивного моделирования. Позволяют создавать визуальные модели, проводить симуляции и анализировать поведение систем во времени.

4. Pajek. Программа для анализа и визуализации больших сетей, включая социальные, информационные и биологические сети. Может применяться для изучения взаимосвязей в когнитивных моделях.

5. R с пакетами igraph и FCMapper. Язык программирования R предоставляет широкие возможности для когнитивного моделирования. Пакеты igraph и FCMapper дают возможность создавать, анализировать и визуализировать когнитивные карты.

6. CMAP Tools. Набор инструментов для построения концептуальных карт (concept maps), которые могут использоваться для представления знаний и моделирования когнитивных процессов.

7. Gephi. Открытая платформа для визуализации и исследования сетей, включая когнитивные модели. Предоставляет широкие возможности для анализа и визуального представления взаимосвязей.

8. Python с библиотеками NetworkX и FuzzyLib. Язык программирования Python также предоставляет инструменты для когнитивного моделирования. Библиотеки NetworkX и FuzzyLib позволяют создавать и анализировать когнитивные модели.

³ Ross T. J. Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley & Sons. – 2017. – URL: <https://home.iitk.ac.in/~avrs/ManyValuedLogic/FuzzyLogicforEngineers.pdf>

⁴ Global sensitivity analysis: the primer / A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres et al. – John Wiley & Sons, 2008. – URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC40639>

Выбор конкретного программного средства зависит от специфики задачи, масштаба модели, требуемых функциональных возможностей и предпочтений пользователя. Некоторые из перечисленных инструментов имеют более специализированную направленность, в то время как другие предоставляют широкий спектр возможностей для когнитивного моделирования.

Пример реализации алгоритма оценки рисков. В качестве примера рассмотрим реализацию алгоритма оценки риска с помощью инструмента когнитивного моделирования Mental Modeler⁵.

Этот веб-инструмент реализован в виде нескольких интерфейсных окон. Первый и основной интерфейс отображения концепций позволяет пользователям наполнять концептуальное виртуальное пространство компонентами, которые составляют рассматриваемую систему. При создании нечеткой когнитивной карты важно определить компоненты, их способность увеличиваться или уменьшаться, а также уровень влияния при связывании с другими компонентами. После того как концепции в модели определены, отношения между концепциями можно добавить с помощью стрелок, направления которых указывают влияние одного компонента на другой. Уровень влияния может быть любым от +1 (по мере того, как один компонент увеличивается, другой компонент значительно увеличивается) до -1 (по мере того, как один компонент увеличивается, другой компонент значительно уменьшается). Отношения и нечеткие веса между переменными добавляются для представления структурных связей между понятиями в модели.

Mental Modeler позволяет рассматривать как упрощенную когнитивную модель, включающую только основные концепции, так и более сложную, когда каждая из концепций детализирована до конкретных показателей. В этом случае количество связей в модели может существенно вырасти. Пример упрощенной карты представлен на рисунке 3.

На рисунке 4 представлена детализированная когнитивная модель, построенная в соответствии с рисунком 1. Видно, что появляются связи между отдельными показателями, причем относящимися к разным концепциям.

Mental Modeler также включает интерфейс Matrix (рисунок 5). В матричном интерфейсе перечислены все концепции, включенные в модель. Этот интерфейс представляет собой другое представление концептуальной модели в форме, необходимой для последующего использования в интерфейсе «Сценарий». Интерфейс Matrix можно легко пересмотреть на основе исходной концептуальной карты.

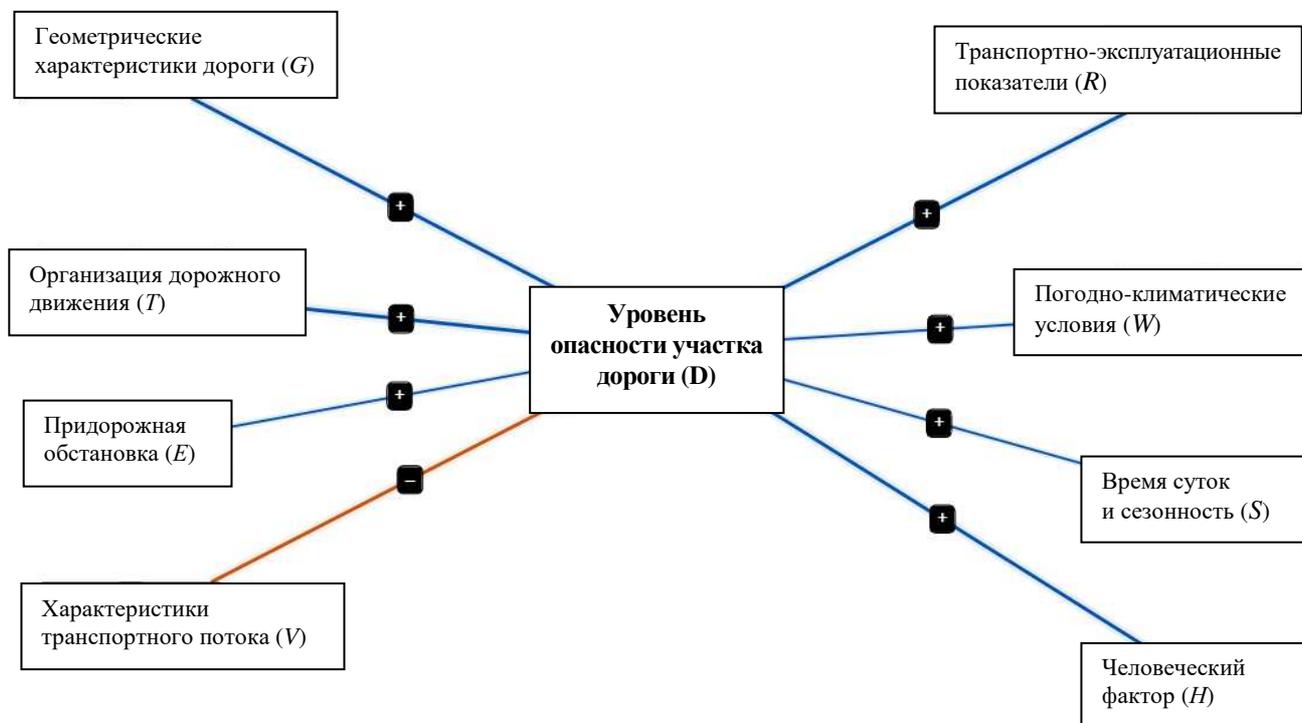


Рисунок 3. – Пример упрощенной когнитивной карты оценки опасности участка дороги

⁵ Mental Modeler – Fuzzy Logic Cognitive Mapping // MentalModeler. – URL: <https://www.mentalmodeler.com/>

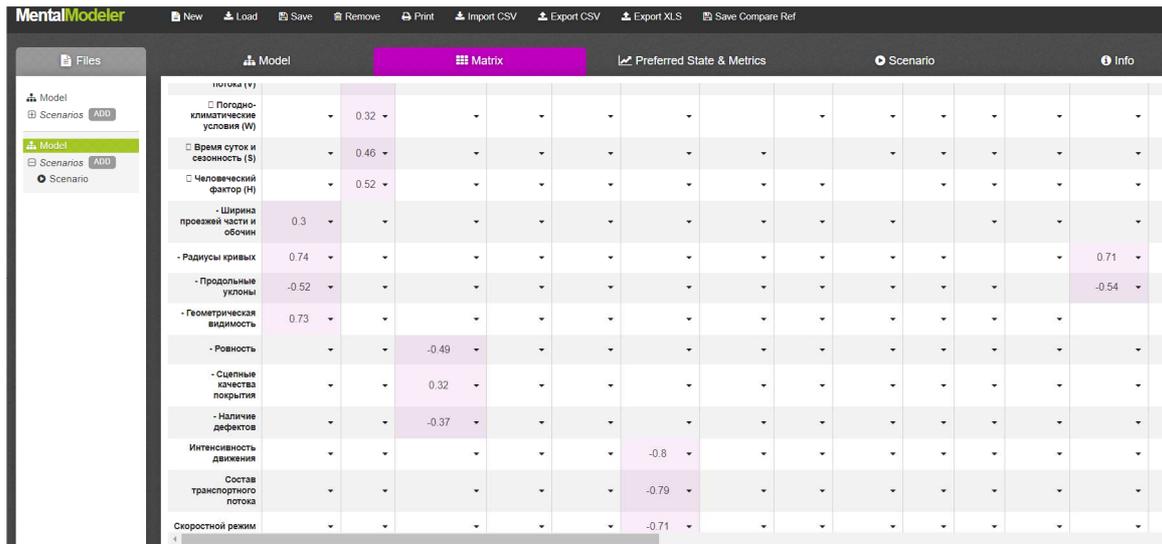


Рисунок 5. – Пример интерфейсного окна «Matrix»

Третий интерфейс для когнитивного моделирования – это интерфейс сценария, в котором можно запускать и сравнивать искусственные сценарии. Здесь имеется возможность указать величину относительных изменений в компонентах, включенных в модель, на основе заданных весов связей, определенных в интерфейсе отображения концепций в соответствии с выбранным сценарием. Можно решить, какой сценарий запустить, исходя из вероятных, маловероятных, постепенных и экстремальных изменений в системе. Для запуска сценария каждой переменной можно установить значение от -1 (сильное отрицательное изменение компонента) до +1 (сильное положительное изменение компонента). Относительные изменения в системе отображаются в виде гистограммы, показывающей степень относительного изменения для каждого компонента, включенного в модель, в соответствии со сценарием.

Например, для модели, представленной на рисунке 4, при изменении компонентов «освещенность», «ширина “чистой” зоны» и «озеленение» произойдет относительное ухудшение факторов «придорожная обстановка» на 0,18, «время суток и сезонность» – на 0,17, что приведет к относительному ухудшению уровня опасности участка дороги на 0,02 (рисунок 6).

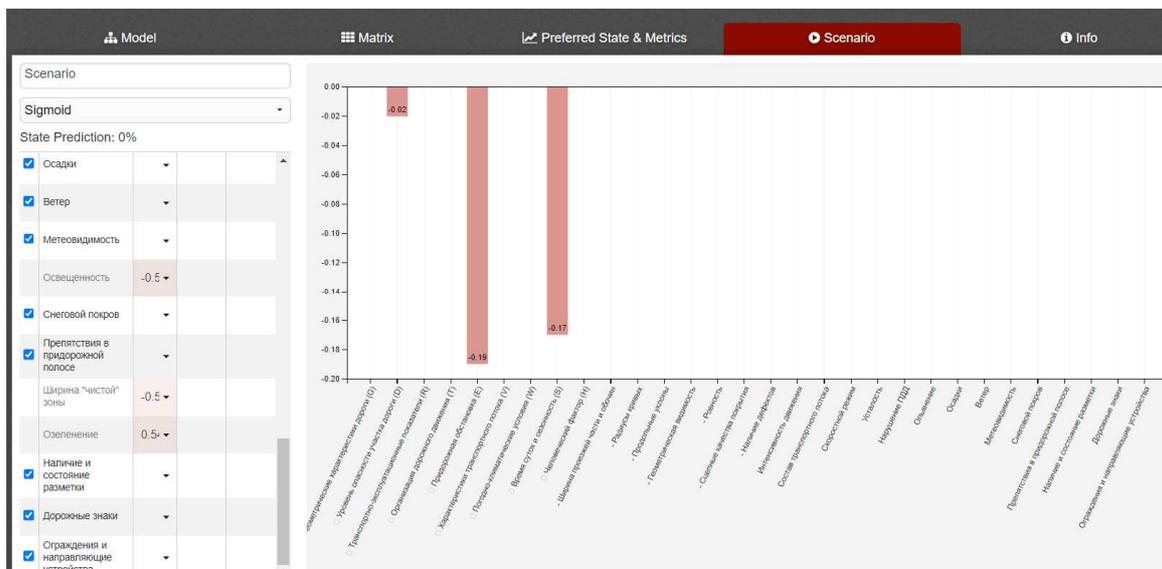


Рисунок 6. – Пример интерфейсного окна сценариев

По сравнению с классическими методами оценки опасности участков автомобильных дорог предлагаемый метод, основанный на интеграции когнитивного моделирования и нечеткой логики, имеет ряд преимуществ.

Достаточно часто для оценки опасности дорожных участков используются статистические методы, основанные на анализе данных о ДТП за определенный период времени. К числу наиболее распространенных показателей относятся коэффициент относительной аварийности (число ДТП на 1 млн автомобиле-кило-

метров), коэффициент тяжести ДТП (число погибших на 100 пострадавших), индекс опасности (комбинированный показатель, учитывающий число и тяжесть ДТП).

Преимущества предложенного метода: возможность прогнозирования потенциальной опасности участков без статистики ДТП; учет взаимосвязей между различными факторами риска; возможность моделирования сценариев изменения условий.

Предлагаемый метод имеет преимущества также по сравнению с методом коэффициентов аварийности, или методикой IRAP, поскольку позволяет осуществлять учет нелинейных взаимодействий между факторами, дает возможность включения качественных экспертных оценок, отличается адаптивностью модели к изменяющимся условиям.

Следует, однако, отметить, что предложенный метод требует более сложной подготовки исходных данных и настройки модели, что может ограничивать его применение в некоторых ситуациях. Кроме того, интерпретация результатов когнитивного моделирования может быть менее интуитивно понятной для неспециалистов по сравнению с простыми статистическими показателями.

Несмотря на несомненные преимущества, предложенный подход к оценке опасности участков автомобильных дорог на основе интеграции когнитивного моделирования и нечеткой логики имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при его практическом применении. К числу ограничений метода относятся:

– субъективность при построении когнитивной карты и определении весов связей между концептами. Хотя использование экспертных оценок позволяет учесть неформализуемые знания, оно также вносит элемент субъективности в модель;

– сложность учета динамических изменений дорожной обстановки. Предложенная модель пока ориентирована на статическую оценку опасности участков дорог и может не в полной мере отражать изменения, происходящие в реальном времени;

– потенциальная вычислительная сложность при анализе больших дорожных сетей;

– необходимость регулярной актуализации модели. Изменения в нормативной базе, технологиях дорожного строительства и содержания дорог, поведении участников движения требуют постоянного обновления когнитивной карты и правил нечеткого вывода;

– сложность интерпретации результатов для неспециалистов. Когнитивные карты и нечеткие множества могут быть не всегда интуитивно понятны для лиц, принимающих решения в области безопасности дорожной инфраструктуры.

В то же время эти ограничения открывают перспективы для дальнейшего развития и совершенствования метода:

– интеграция с геоинформационными системами (ГИС). Объединение разработанного подхода с ГИС-технологиями позволит создать интерактивные карты опасности дорожной сети и улучшить визуализацию результатов анализа;

– применение методов машинного обучения для автоматической настройки параметров модели. Использование алгоритмов оптимизации, таких как генетические алгоритмы или градиентный бустинг, может помочь в автоматическом определении весов связей и функций принадлежности нечетких множеств;

– разработка динамических когнитивных карт. Внедрение механизмов адаптации когнитивной карты к изменяющимся условиям позволит более точно моделировать динамику дорожной ситуации [14];

– интеграция с системами мониторинга дорожного движения в реальном времени. Использование данных с дорожных датчиков, камер и подключенных транспортных средств позволит повысить точность и актуальность оценок опасности [15];

– применение методов анализа больших данных для выявления скрытых закономерностей в дорожно-транспортных происшествиях. Использование технологий Big Data может помочь в обнаружении неочевидных факторов риска и их взаимосвязей [16].

Реализация этих перспективных направлений позволит преодолеть существующие ограничения и создать более совершенный инструмент для оценки и прогнозирования опасности участков загородных автомобильных дорог. Это, в свою очередь, будет способствовать повышению эффективности мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения и снижению числа ДТП.

Заключение. В рамках данного исследования был предложен подход к оценке опасности участков загородных автомобильных дорог, основанный на интеграции методов когнитивного моделирования и нечеткой логики. Проведенная работа позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Применение когнитивного моделирования в сочетании с аппаратом нечеткой логики обеспечивает более комплексный и гибкий подход к анализу факторов, влияющих на безопасность дорожного движения, по сравнению с традиционными методами оценки.

2. Разработанный методика позволяет учитывать как количественные, так и качественные характеристики дорожных условий, а также моделировать сложные взаимосвязи между различными факторами риска.

3. Интеграция разработанного подхода с геоинформационными системами и технологиями мониторинга дорожного движения в реальном времени открывает новые возможности для повышения эффективности управления дорожной безопасностью.

4. Несмотря на ряд ограничений, связанных с субъективностью экспертных оценок и вычислительной сложностью, предложенный метод имеет значительный потенциал для дальнейшего развития и совершенствования.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной методики для выявления потенциально опасных участков дорог на этапе проектирования дорог, оптимизации мероприятий по повышению безопасности дорожного движения на существующих автомобильных дорогах, прогнозирования изменений уровня опасности при различных сценариях развития дорожной ситуации, поддержки принятия решений в области управления дорожной инфраструктурой.

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении включают:

1. Уточнение количества факторов, входящих в модель и значений весов связей.
2. Разработку когнитивных моделей для отдельных сложных участков, например, пересечений автомобильных дорог.
3. Разработку динамических когнитивных карт, способных адаптироваться к изменяющимся условиям дорожного движения.
4. Применение методов машинного обучения для автоматической настройки параметров модели.

В целом проведенное исследование демонстрирует перспективность применения методов когнитивного моделирования и нечеткой логики в задачах оценки безопасности дорожного движения. Дальнейшее развитие и внедрение предложенного подхода может внести существенный вклад в повышение безопасности на автомобильных дорогах и снижение числа дорожно-транспортных происшествий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kosko B. Fuzzy cognitive maps // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1986. – № 24(1). – P. 65–75. DOI: 10.1016/S0020-7373(86)80040-2
2. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / пер. с англ. А.М. Раппопорта, С.И. Травкина; под ред. А.И. Теймана. – М.: Наука, 1986. – 496 с.
3. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. – 1965. – № 8(3). – P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
4. Mamdani E.H., Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1975. – № 7(1). – P. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2
5. Hauer E. Speed and safety // *Transportation Research Record*. – 2009. – № 2103(1). – P. 10–17. DOI: 10.3141/2103-02
6. Shankar V., Mannering F., Barfield W. (1995). Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies // *Accident Analysis & Prevention*. – 1995. – № 27(3). – P. 371–389. DOI: 10.1016/0001-4575(94)00078-Z
7. Bağdatlı Muhammed Emin Cihangir, Akbıyıklı Rıfat, Papageorgiou Elpiniki I. A Fuzzy Cognitive Map Approach Applied in Cost–Benefit Analysis for Highway Projects // *International Journal of Fuzzy Systems*. – 2016. – Vol. 19. – P. 1512–1527. DOI: 10.1007/s40815-016-0252-3
8. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process // *International Journal of Services Sciences*. – 2008. – № 1(1). – P. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
9. Predrycz Witold, Ekel Petr, Parreiras Roberta. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications // *ResearchGate*. – 2011. DOI: 10.1002/978-0-470-97403-2.
10. Papageorgiou E.I., Salmeron J.L. A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2013. – № 21(1). – P. 66–79. DOI: 10.1109/TFUZZ.2012.2201727
11. Cordon O. A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems // *International Journal of Approximate Reasoning*. – 2011. – № 52(6). – P. 894–913. DOI: 10.1016/j.ijar.2011.03.004
12. Jang J.S. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1993. – № 23(3). – P. 665–685. DOI: 10.1109/21.256541
13. Groumpos P.P. Fuzzy cognitive maps: Basic theories and their application to complex systems. In *Fuzzy cognitive maps (1–22)*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-03220-2_1
14. Dynamical cognitive network – an extension of fuzzy cognitive map / Y. Miao, Z.Q. Liu, C.K. Siew et al. // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2001. – № 9(5). – P. 768–777. DOI: 10.1109/91.963762
15. Guerrero-Ibáñez J., Zeadally S., Contreras-Castillo J. Sensor technologies for intelligent transportation systems // *Sensors*. – 2018. – № 18(4). 1212. doi.org/10.3390/s18041212
16. Shi Q., Abdel-Aty M. Big data applications in real-time traffic operation and safety monitoring and improvement on urban expressways // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. – 2015. – № 58. – P. 380–394. DOI: 10.1016/j.trc.2015.02.022

REFERENCES

1. Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24(1), 65–75. DOI: 10.1016/S0020-7373(86)80040-2
2. Roberts, F.S. (1986). *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nym, biologicheskim i ekologicheskim zadacham*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
3. Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
4. Mamdani, E.H. & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2

5. Hauer, E. (2009). Speed and safety. *Transportation Research Record*, 2103(1), 10–17. DOI: 10.3141/2103-02
6. Shankar, V., Mannering, F. & Barfield, W. (1995). Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. *Accident Analysis & Prevention*, 27(3), 371–389. DOI: 10.1016/0001-4575(94)00078-Z
7. Bağdatlı Muhammed Emin Cihangir, Akbıyıklı, Rifat & Papageorgiou, Elpiniki I. (2016). A Fuzzy Cognitive Map Approach Applied in Cost–Benefit Analysis for Highway Projects. *International Journal of Fuzzy Systems*, (19), 1512–1527. DOI: 10.1007/s40815-016-0252-3
8. Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
9. Predrycz, W., Ekel, P. & Parreiras, R. (2011). Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications. *ResearchGate*. DOI: 10.1002/978-0-470-97403-2
10. Papageorgiou, E.I. & Salmeron, J.L. (2013). A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(1), 66–79. DOI: 10.1109/TFUZZ.2012.2201727
11. Cordón, O. (2011). A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems. *International Journal of Approximate Reasoning*, 52(6), 894–913. DOI: 10.1016/j.ijar.2011.03.004
12. Jang, J.S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665–685. DOI: 10.1109/21.256541
13. Groumpos, P.P. (2010). Fuzzy cognitive maps: Basic theories and their application to complex systems. In *Fuzzy cognitive maps* (1–22). DOI: 10.1007/978-3-642-03220-2_1 Berlin; Heidelberg: Springer.
14. Miao, Y., Liu, Z.Q., Siew, C.K. & Miao, C.Y. (2001). Dynamical cognitive network – an extension of fuzzy cognitive map. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(5), 760–770. DOI: 10.1109/91.963762
15. Guerrero-Ibáñez, J., Zeadally, S. & Contreras-Castillo, J. (2018). Sensor technologies for intelligent transportation systems. *Sensors*, 18(4), 1212. DOI: 10.3390/s18041212
16. Shi, Q. & Abdel-Aty, M. (2015). Big data applications in real-time traffic operation and safety monitoring and improvement on urban expressways. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, (58), 380–394. DOI: 10.1016/j.trc.2015.02.022

Поступила 17.06.2024

INTEGRATION OF COGNITIVE ANALYSIS METHODS INTO THE ROAD INFRASTRUCTURE SAFETY ASSESSMENT SYSTEM

D. KAPSKI, S. BOGDANOVICH
(Belarusian National Technical University, Minsk)

This article presents an innovative approach to assessing the hazard levels of rural road sections, based on the integration of cognitive modeling methods and fuzzy logic. The authors propose a comprehensive methodology that allows for the consideration of a wide range of both quantitative and qualitative characteristics of road conditions, as well as modeling complex non-linear relationships between various risk factors. The developed approach includes several key stages: construction of a detailed cognitive map reflecting the structure of relationships between safety factors, formalization of hazard factors using fuzzy set theory, and a risk analysis algorithm based on impulse modeling. The article also suggests promising directions for further research, including integration of the developed approach with geographic information systems, application of machine learning methods for automatic model parameter tuning, and development of dynamic cognitive maps capable of adapting to changing conditions in real-time.

Keywords: road safety, cognitive modeling, fuzzy logic, risk assessment, highways, accident prediction.