

Математическое моделирование оценки влияния размещения технических средств организации дорожного движения на безопасность

М.А. Арутюнян

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение ключевых показателей, влияющих на размещение технических средств организации дорожного движения, разработка математических моделей, а также алгоритмов для их количественной оценки. **Метод.** Исследование основано на экспертных методах, в частности, методе анализа иерархий Саати, натурного и вычислительного моделирования. **Результат.** Определены два основных показателя безопасности дорожного движения, которые играют ключевую роль в оценке риска на автомобильных дорогах. Определены показатели для оценки уровня аварийности, а также предложена модель для определения общей оценки риска аварий на возможных местах размещения технических средств организации дорожного движения. Предложен алгоритм кластеризации возможных мест размещения технических средств организации дорожного движения. **Вывод.** Разработанная модель оценки тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий позволяет учитывать сложные взаимосвязи между их типами и последствиями, что является важным шагом в направлении создания более объективной системы оценки риска на автомобильных дорогах. Предложенный алгоритм группировки потенциальных мест установки технических средств организации дорожного движения может частично компенсировать недостаток данных об уровне безопасности дорожного движения и повысить обоснованность оценки изменения его уровня при установке технических средств организации дорожного движения.

Ключевые слова: математические модели, численные методы, алгоритм, технические средства организации дорожного движения, безопасность дорожного движения

Для цитирования: М.А. Арутюнян. Математическое моделирование оценки влияния размещения технических средств организации дорожного движения на безопасность. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):39-48. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-39-48.

Mathematical modeling of the assessment of the impact of placement of technical means of road traffic organization on safety

M.A. Arutiunian

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to identify key indicators influencing the placement of technical means of traffic management, and to develop mathematical models and algorithms. **Method.** The study is based on expert methods: Saaty hierarchy process analysis, natural and computational modeling. **Result.** Two main indicators of road safety have been identified, which play a key role in assessing the risk on motorways. Indicators for assessing the accident rate have been defined, and a model has been proposed for determining the overall assessment of the risk of accidents at possible locations of technical means of traffic management. Proposed an algorithm for clustering possible locations for the placement of technical means for organizing traffic. **Conclusion.** The created model for evaluating the impact of road accidents considers intricate connections between accident types and outcomes, representing a significant advance in building a more precise and impartial system for gauging road risk. The suggested method for categorizing

prospective sites for traffic control technology can offset limitations in statistical information concerning road safety and enhance the reliability of assessing safety improvements resulting from these technologies.

Keywords: mathematical models, numerical methods, algorithm, technical means of traffic organization, road safety

For citation: M.A. Arutiunian. Mathematical modeling of the assessment of the impact of placement of technical means of road traffic organization on safety. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):39-48. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-39-48.

Введение. В статье представлен один из промежуточных научных результатов, полученных в диссертационной работе, целью которой является повышение безопасности дорожного движения за счет рационального размещения технических средств организации дорожного движения. При определении целесообразных мест установки технических средств организации дорожного движения могут быть использованы разные оценочные критерии, учитывающие как непосредственные параметры аварийности, так и факторы, оказывающие косвенное воздействие на вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Постановка задачи. В связи с недостатком существующих индикаторов, полноценно отражающих фактическую степень аварийности, предлагается разработка специальных моделей для оценки соответствующего показателя. Указанные модели необходимо разрабатывать с учетом не просто статистики дорожно-транспортных происшествий, зафиксированных на конкретном отрезке пути за определенный период, а с обязательным анализом совокупного вреда, который причиняют аварии как отдельным гражданам, так и обществу в целом. Это позволит более точно определить проблемные участки и разработать эффективные меры по снижению аварийности и минимизации негативных последствий. Оценка безопасности дорожного движения на исследуемом участке дороги является сложной задачей из-за ограниченной доступности данных по каждому возможному месту размещения. Учитывая схожесть характеристик транспортных и пешеходных потоков, а также условия, способствующие возникновению дорожно-транспортных происшествий на различных возможных местах размещения, можно предположить, что меры по обеспечению безопасности дорожного движения также имеют общие черты. Это позволяет распространять полученные оценки на аналогичные случаи. В связи с этим необходимо определить показатели схожести различных возможных мест размещения.

Методы исследования. Проанализируем основные показатели, влияющие на безопасность дорожного движения. Одним из таких показателей является интенсивность дорожного движения, которая может быть количественно охарактеризована посредством оценки потока транспортных средств, проходящих через определенный участок дороги или ее сечения в течение единицы времени, учитывая движение в обоих направлениях. Она делится на среднегодовую суточную интенсивность, расчетную перспективную интенсивность и часовую интенсивность движения. При анализе безопасности дорожного движения целесообразно использовать показатель часовой интенсивности. Показатель можно рассчитать по следующей формуле:

$$N_{\text{ч}} = N_{\text{с}} * \alpha_{\text{ч}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{с}}$ обозначает среднегодовую суточную интенсивность движения, выраженную в авт/сут; $\alpha_{\text{ч}}$ – это доля транспортных средств, которые прошли через данный участок дороги в течение одного часа, от общего суточного количества автомобилей. В соответствии с литературными источниками, значение $\alpha_{\text{ч}}$ можно принять равной 0,076 [1].

Анализ результатов исследований, представленных в [2], обнаруживает прямую корреляцию между дорожным движением и частотой дорожно-транспортных инцидентов на определенной секции дороги. Это свидетельствует о том, что рост интенсивности движения приводит к соответствующему увеличению числа дорожно-транспортных инцидентов. Средняя скорость движения транспортного потока оказывает существенное влияние на тяжесть последствий дорожно-транспортных инцидентов. Данные, представленные в [3],

демонстрируют прямую взаимосвязь между средней скоростью движения и вероятностью дорожно-транспортных инцидентов. В связи с этим одновременное использование двух указанных характеристик для оценки обеспечения безопасности может быть неэффективным, поскольку эти два параметра тесно связаны. Загруженность автомобильной дороги, как указано в [4], может быть количественно оценена с помощью коэффициента загруженности g , который характеризует уровень использования дорожной инфраструктуры и позволяет оценить эффективность дорожного движения. Коэффициент загруженности рассчитывается по следующей формуле: $g = n/z$, (2)

где n – это интенсивность движения на рассматриваемом участке, то есть количество транспортных средств, проходящих через данный участок за единицу времени, а z – пропускная способность этого участка, то есть максимальное количество транспортных средств, которое может пройти через данный участок за единицу времени.

Статистические исследования, проведенные ранее, свидетельствуют о прямой зависимости между загруженностью дорог и количеством дорожно-транспортных происшествий [4]. Это подтверждается результатами корреляционного анализа, которые показали высокую степень взаимосвязи между этими двумя показателями (коэффициент корреляции составляет 0,94). Кроме того, поскольку пропускная способность дороги является постоянной величиной, а коэффициент загруженности и интенсивность движения связаны линейно, то использование этих двух параметров одновременно для оценки безопасности дорожного движения может быть неэффективным.

В результате проведенного анализа, было выявлено, что коэффициент загруженности автомобильной дороги (g) является важной динамической характеристикой, напрямую влияющей на безопасность дорожного движения, ввиду чего из имеющихся показателей данной категории в ходе дальнейшей работы рекомендуется использовать именно её. Это связано с тем, что коэффициент загруженности отражает текущий уровень использования дорожной инфраструктуры и позволяет оценить эффективность дорожного движения в реальном времени. Результаты анализа подтверждают, что коэффициент загруженности играет одну из ключевых ролей в обеспечении безопасности дорожного движения, и его применение может способствовать созданию эффективных стратегий по предупреждению дорожно-транспортных инцидентов. Для увеличения эффективности применения данного параметра в контексте диссертационной работы предложено учесть такой важный параметр как «точки притяжения» – пункты сосредоточения интересов пешеходов, определяющих маршруты и цели их перемещений. Это означает, что учитывается не только объем транспортного потока, но и влияние мест, привлекающих пешеходов, на движение.

Коэффициент загруженности (2) с учетом влияния пешеходов и «точек притяжений» можно представить в следующем виде: $g = \frac{n \times (1 + P \times A)}{z}$,

где P – коэффициент, учитывающий влияние пешеходов (например, количество пешеходов, пересекающих дорогу в неполюженных местах), A – коэффициент «точек притяжения», отражающий вероятность того, что пешеходы будут пересекать дорогу в этом месте.

В рамках статистического анализа выявлены зависимости между параметрами дорожного движения. Хотя класс автомобильной дороги не имеет прямого влияния на безопасность, он оказывает значительное косвенное воздействие на нее через такие факторы, как интенсивность и средняя скорость, которые, в свою очередь, влияют на уровень загруженности дороги. Это связано с тем, что класс дороги определяет ее технические характеристики, такие как ширина, количество полос и тип покрытия, которые влияют на интенсивность и среднюю скорость. В свою очередь, эти параметры напрямую влияют на уровень загруженности, который является одним из основных факторов, влияющих на безопасность дорожного движения. Соответственно, выполнение прямой оценки безопасности дорожного движения с учетом классов автомобильных дорог не является действенной. Уровень сложности дорожного участка определяется наличием зон конфликтного взаимодействия, включающие точки разветвления, слияния и пересечения транспортных потоков, а также зоны пересечения транспортного и пешеходного потоков [5]. Согласно результатам

статистического анализа, именно такие участки демонстрируют наибольшую концентрацию дорожно-транспортных инцидентов. Более того, рост интенсивности движения в пределах зон конфликта напрямую коррелирует с увеличением вероятности возникновения ДТП. Следовательно, уровень аварийности на участке дороги находится в прямой зависимости от его структурной сложности, которая определяется количеством, расположением и типом конфликтных точек. Оценка сложности участка автомобильной дороги может быть проведена с помощью различных подходов [6, 7]. В РФ для количественной оценки сложности дорожного участка, на котором планируется размещение объекта, в основном используется методика, описанная в [8], согласно которой данный показатель может быть рассчитан по следующей формуле:

$$m = \sum_{i=1}^{n^c} \sigma_i * m_i, \quad (3)$$

где σ_i – коэффициент сложности i -го типа конфликтных точек, характеризующий уровень риска дорожно-транспортных инцидентов; m_i – количество конфликтных точек i -го типа, присутствующих на исследуемом участке; n^c – общее количество типов конфликтных точек.

Коэффициент сложности дорожной сети может быть определен с помощью различных методологических подходов, каждый из которых имеет сильные и слабые стороны. Например, источники [7,8] предлагают два альтернативных способа определения коэффициента, которые могут быть применены в зависимости от конкретных задач и целей. Анализ результатов свидетельствует о том, что оценка риска на автомобильных дорогах основана на комплексном подходе, учитывающем количественные и качественные параметры конфликтных точек. Существующие методы оценки отличаются подходами к определению коэффициента сложности, присваиваемого каждому типу конфликтных точек. Учитывая это разнообразие, разработка гибкой модели, позволяющей пользователям задавать значения коэффициентов в соответствии с выбранным ими методом оценки, представляется логичным и целесообразным шагом. Такой подход способствует созданию более адаптивных и эффективных инструментов для анализа и прогнозирования дорожного риска. Исследование факторов, влияющих на аварийность, позволило выявить два основных индикатора безопасности дорожного движения, которые играют ключевую роль в оценке риска на автомобильных дорогах. Анализ количества аварий за отчетный период на исследуемом участке (КАТ) и социально-экономического ущерба от дорожно-транспортных происшествий за тот же период (СЭУ) свидетельствует о том, что эти показатели являются наиболее значимыми для оценки аварийности. Поскольку нормативно-правовые акты регулируют использование этих показателей, целесообразно разработать комплексный подход к оценке КАТ и СЭУ. Это позволит обеспечить объективность и гибкость в оценке аварийности, учитывая различные аспекты дорожного движения.

Нами определены различные индикаторы K^d , каждый из которых отражает уникальные аспекты риска дорожно-транспортных происшествий. Однако, для получения полной картины безопасности дорожного движения, необходимо учитывать все эти индикаторы одновременно. Гетерогенность индикаторов и разнообразие тяжести последствий, которые они отражают, создают значительные препятствия для их одновременного применения. Отсутствие унифицированного подхода к использованию этих индикаторов может привести к следующим негативным последствиям: снижение эффективности функционирования систем обеспечения безопасности дорожного движения; неполная оценка риска дорожно-транспортных происшествий на рассматриваемой территории; нерациональное распределение технических ресурсов для организации дорожного движения. Следовательно, необходимо разработать модель, которая позволяет учитывать все индикаторы K^d одновременно, обеспечивая полную и объективную оценку безопасности дорожного движения. Данная модель направлена на разработку количественного подхода к оценке риска дорожно-транспортных происшествий, учитывая тяжесть последствий таких событий. Переход от качественной к количественной оценке является ключевым для принятия эффективных решений в области безопасности дорожного движения, где точность и объективность

оценки риска играют решающую роль. В этом контексте могут быть полезны экспертные методы, описанные в исследованиях [9, 20].

Коэффициент социально-экономического ущерба (K_2^d) определяется как усредненный показатель социально-экономических потерь, связанных с различными типами аварий, который затем нормируется по отношению к общему количеству аварий на исследуемом участке. Формула для расчета коэффициента K_2^d имеет следующий вид:

$$K_2^d = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} \Pi_i}{n_a}, \quad (4)$$

где Π_i обозначает социально-экономические потери от i -й аварии, а n_a представляет собой общее количество аварий на рассматриваемом участке. Более подробное описание методики расчета данного коэффициента приведено в источнике [10].

В контексте оптимизации размещения технических средств организации дорожного движения серьезность последствий дорожно-транспортных происшествий будет охарактеризована показателем $K^d = K_1^d$, представляющим собой вектор из пяти компонент $\{k_1^d, \dots, k_5^d\}$. В связи с неоднородностью компонент для объективной оценки их значимости применим метод анализа иерархий Саати. Анализ показал, что для достоверного моделирования дорожно-транспортных происшествий можно ограничиться одним репрезентативным показателем каждого типа, учитывая как прямые, так и косвенные факторы, влияющие на аварийность. Это упрощает модель, сокращает количество переменных и сохраняет точность результатов. В рамках предложенной модели предлагается интегральная оценка безопасности дорожного движения, которая напрямую связана с уровнем безопасности на возможном месте установки технических средств организации дорожного движения [11].

Оптимизация указанных параметров одновременно представляет собой сложную задачу из-за их разнородности. Чтобы решить эту проблему, предлагается разработать комплексный показатель тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий, который может быть выражен в виде комбинации параметров $k_1^d - k_5^d$. Показатель безопасности дорожного движения для j -ого возможного места размещения будет определен как обратный к нему показатель:

$$K(s_j) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i * k_i^d, \quad (5)$$

где α_i – обозначает весовые коэффициенты, отражающие значимость соответствующих показателей $k_1^d - k_5^d$ для возможного места размещения s_j .

Ввиду ограничений, связанных с прямым измерением коэффициентов α_i , предлагается использовать экспертные подходы для их определения. В частности, можно применить метод анализа иерархий Саати [12,13], который основан на получении оценок на основе сравнительного анализа парных сочетаний показателей. Для оценки тяжести последствий ДТП будут использоваться следующие критерии сравнения:

$$e_{ij}^d = \begin{cases} 1, e_i^d \text{ и } e_j^d \text{ имеют одинаковую тяжесть} \\ 3, e_i^d \text{ незначительно превышает } e_j^d \text{ по тяжести} \\ 5, e_i^d \text{ значительно превышает } e_j^d \text{ по тяжести} \\ 7, e_i^d \text{ явно превосходит } e_j^d \text{ по тяжести} \\ 9, e_i^d \text{ абсолютно превосходит } e_j^d \text{ по тяжести} \end{cases}$$

На основе ранжирования, определенного экспертами, формируется матрица парных сравнений относительной важности индикаторов E^d , в которой элементы $e_{ij}^d = \frac{1}{e_{ji}^d}$.

Для определения приоритетов индикаторов E^d , рассчитывается вектор приоритетов $V_{E^d} = (\alpha_1, \dots, \alpha_5)$, представляющий собой нормированный собственный вектор матрицы E^d , соответствующий максимальному собственному значению λ_{max} . Для нахождения вектора приоритетов V_{E^d} необходимо решить линейное уравнение:

$$E^d * V_{E^d} = \lambda_{max} * V_{E^d}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что для определения весовых коэффициентов следует исследовать спектральные свойства матрицы E^d . Поскольку размерность матрицы E^d

невелика, задача нахождения собственных значений и собственных векторов может быть решена с помощью стандартных численных методов, описанных в источнике [1414].

Обсуждение результатов. Разработаем математические модели и численные методы для оценки результативности использования технических средств организации дорожного движения (ТСОДД) в качестве одного из инструментов обеспечения и повышения безопасности дорожного движения. В связи с имеющейся высокой неопределенностью данных, решение рассматриваемой задачи предлагается получить исходя из предположения о том, что на всех потенциальных местах размещения ТСОДД, характеризующихся сходными значениями показателей сложности автомобильной дороги и коэффициента загруженности, наблюдаются аналогичные уровни безопасности. Следовательно, можно предположить, что использование таких ТСОДД имеет приблизительно равное воздействие на изменение уровня аварийности в различных зонах размещения. Для эффективного решения исследуемой задачи нужно разработать методы группировки возможных мест размещения ТСОДД, позволяющие экстраполировать уже существующие оценки безопасности дорожного движения и влияния ТСОДД на изменение уровня аварийности с одного на другие, входящие в ту же категорию. С этой целью можно использовать один из методов кластеризации, описанных в [15]. Решение задачи кластеризации относительно исследуемой проблемы включает в себя четыре основных этапа:

1. Определение критерия оценки сходства объектов, в данном случае, потенциальных зон расположения ТСОДД, на основе которого будет проводиться группировка;
2. Разработка алгоритма кластеризации, позволяющего сгруппировать потенциальные зоны расположения ТСОДД по кластерам с учетом их сходства;
3. Рефинирование состава полученных кластеров с целью обеспечения их внутренней однородности и внешней гетерогенности;
4. Проверка адекватности полученного результата, чтобы убедиться в его соответствии реальной ситуации и обеспечении достоверности выводов [16-20].

В ранее проведенном анализе были выделены ключевые характеристики возможных мест размещения ТСОДД, которые могут быть сгруппированы в два основных класса: индикаторы безопасности дорожного движения, оказывающие непосредственное влияние и опосредованное влияние на уровень безопасности дорожного движения. Из-за ограничений в доступе к данным о прямых показателях безопасности дорожного движения, было принято решение ограничить кластеризацию только косвенными факторами, оказывающими влияние на уровень безопасности. Индикатор, используемый для оценки схожести мест размещения технических средств организации дорожного движения (ТСОДД) по косвенным признакам, может не совпадать с тем, который отражает их сходство по основному критерию - уровню аварийности. Поэтому для повышения достоверности результатов требуется дополнительная верификация: на этапе проверки адекватности полученных кластеров необходимо учитывать прямые данные об аварийности и, при необходимости, вносить корректировки. Формализуем задачу кластеризации следующим образом: пусть $S = \{s_1, \dots, s_m\}$ – множество всех возможных мест размещения технических средств организации дорожного движения на рассматриваемом участке. Каждое место $s_i \in S_i$ характеризуется двумя показателями, косвенно влияющими на безопасность дорожного движения, такими как сложность участка автомобильной дороги $m(s_i)$ и коэффициент загруженности этого участка $g(s_i)$ с учетом влияния пешеходов и «точек притяжений». Сложность участка автомобильной дороги $m(s_i)$ определяется как взвешенная сумма количества конфликтных точек различных типов:

$$m(s_i) = \sum_{j=1}^n \sigma_j * m_j(s_i) . \quad (7)$$

где $m_j(s_i)$ – число конфликтных точек типа j на месте s_i , а σ_j – коэффициент сложности, отражающий степень риска, ассоциированного с данным типом конфликта.

Коэффициент загруженности участка автомобильной дороги $g(s_i)$ с учетом влияния пешеходов и «точек притяжений» можно представить в следующем виде:

$$g(s_i) = \frac{n(s_i) \times (1 + P \times A)}{z(s_i)} \quad (8)$$

где $n(s_i)$ – интенсивность транспортного потока, $z(s_i)$ – пропускная способность участка, P – индекс пешеходной активности, а A – коэффициент, отражающий влияние «точек притяжения».

Схожесть возможных мест размещения s_i и s_j по косвенным признакам определяется расстоянием между их значениями, которое рассчитывается с помощью формулы:

$$\delta(s_i, s_j) = \sqrt{\xi(m(s_i) - m(s_j))^2 + \zeta(g(s_i) - g(s_j))^2}, \quad (9)$$

где ξ – представляет собой коэффициент важности сложности участка автомобильной дороги, а ζ – подразумевает под собой коэффициент важности загруженности участка автомобильной дороги. Эти коэффициенты удовлетворяют условиям $\xi + \zeta = 1$, $\xi \geq 0$, $\zeta \geq 0$, что означает, что они представляют собой нормированные веса, которые можно определить с помощью экспертной оценки, в том числе с помощью метода Саати.

Алгоритм группировки разрабатывается на основе модифицированного алгоритма ФорЭл [17-19], адаптированного к решаемой задаче. В рамках группировки вводятся следующие обозначения: S^k – множество возможных мест размещения ТСОДД, которые еще не были объединены в группы; \bar{S}^k – множество уже сгруппированных возможных мест размещения ТСОДД. Следует отметить, что $S = S^k \cup \bar{S}^k$, $S^k \cap \bar{S}^k = \emptyset$. Кластеризация завершается, когда все возможные места размещения ТСОДД будут сгруппированы, что эквивалентно условию $S = S^k$, $\bar{S}^k = \emptyset$. До начала группировки данных экспертом определяется начальная величина радиуса кластера r для S_1^k и инициализирует счетчик i , равный 1. Алгоритм группировки данных включает в себя следующие шаги:

1. Выбирается случайное место размещения ТСОДД $s_h \in \bar{S}^k$ и формируется множество S_i , содержащее все ранее некластеризованные возможные места размещения ТСОДД, попадающие в окружность с центром $o_i = s_h$ и радиусом r .

2. Центр o_i смещается в центр масс множества S_i , который вычисляется как:

$$o_i = \left(\frac{\sum_{s_j \in S_i} m(s_j)}{S_i}, \frac{\sum_{s_j \in S_i} g(s_j)}{S_i} \right)$$

3. Шаг 2 повторяется до тех пор, пока состав объектов в множестве S_i не достигнет стабильности.

4. Множество S_i признается новым кластером S_i^k , при этом все его элементы считаются кластеризованными. Если \bar{S}^k не является пустым ($\bar{S}^k \neq \emptyset$), то счетчик i увеличивается на 1 ($i = i + 1$) и алгоритм возвращается к шагу 1.

Алгоритм кластеризации достигает второй стадии завершения, когда все объекты успешно распределяются по соответствующим группам, что свидетельствует о пустоте множества неотнесенных объектов ($\bar{S}^k = \emptyset$). На этом этапе формируются начальные параметры и определяется исходный состав кластеров. Далее алгоритм переходит к стадии их уточнения, на которой проводится оценка адекватности сформированных кластеров на основе косвенных признаков. Если экспертный анализ показывает, что количество полученных кластеров является недостаточным или избыточным для отражения структуры данных, то заданный радиус r корректируется, и алгоритм возвращается ко второй стадии. Затем, для каждой пары кластеров определяется расстояние между их центрами $\delta(o_i, o_j)$. В случае, если это расстояние оказывается меньше двойного радиуса кластера ($\delta(o_i, o_j) < 2r$), то объекты кластеров S_i^k и S_j^k перераспределяются в соответствии с формулой 9, чтобы они были отнесены к тому кластеру, центр которого ближе к объекту. Третья стадия кластеризации служит механизмом уточнения и корректировки результатов, полученных на предыдущих этапах. Она обеспечивает более точное распределение объектов по кластерам с учётом значений косвенных индикаторов безопасности. Благодаря этой итеративной процедуре достигается повышение корректности и интерпретируемости итоговой кластерной структуры. В ходе оценки результатов кластеризации технических средств организации дорожного движения, основное внимание уделяется формированию групп мест размещения на основе

показателя аварийности. Однако, учитывая косвенный характер признаков, используемых для кластеризации, существует риск объединения мест с существенно отличающимися уровнями в один кластер. Для преодоления риска, на этапе проверки адекватности результатов кластеризации проводится их корректировка с учётом прямого индикатора уровня безопасности дорожного движения. Это позволяет уточнить состав кластеров и обеспечить более обоснованное распределение мест размещения технических средств организации дорожного движения (ТСОДД). Для оценки сходства объектов по основному признаку – уровню аварийности – применяется метод анализа иерархий Саати, который позволяет проводить парные сравнения до 10 элементов. В рамках вычислительного эксперимента формируется матрица $A = (a_{it})_{i,t=1,\dots,m}$, построенная в соответствии с принципами данного метода, что позволяет оценить и сравнить объекты по основному признаку. В результате кластеризации выделяются подмножества контрастных объектов \tilde{S}_i , входящих в кластер $S_i^k \subset S$ и демонстрирующих наибольшую разницу по косвенным признакам. Чтобы сравнить анализируемые объекты, учитывая ограничения метода Саати, были определены девять точек с координатами $m_i^{min} + \frac{m_i^{max} - m_i^{min}}{4} * l, g_i^{min} + \frac{g_i^{max} - g_i^{min}}{4} * u$, где $m_i^{min} = \min\{m(s_j), s_j \in S_i^k\}$; $m_i^{max} = \max\{m(s_j), s_j \in S_i^k\}$; $g_i^{min} = \min\{g(s_j), s_j \in S_i^k\}$; $g_i^{max} = \max\{g(s_j), s_j \in S_i^k\}$; $l, u \in \{1,2,3\}$, то есть, эти координаты были получены путем вычисления минимальных и максимальных значений m и g для объектов в кластере S_i^k . Затем были выбраны контрастные точки, равномерно распределенные по прямоугольной области, которая описывает границы кластера. Это позволило обеспечить полное представление характеристик кластера. Кластер S_i^k включает объекты, расположенные вблизи контрастных точек, и для каждого из них проводится сравнительный анализ показателя аварийности с помощью метода Саати. Степень схожести объектов в кластере S_i^k , связанная с уровнем безопасности дорожного движения, характеризуется разницей между максимальной и минимальной оценками объектов в кластере:

$$\rho(S_i^k) = \max\{h(s_j), s_j \in S_i^k\} - \min\{h(s_j), s_j \in S_i^k\}, \quad (10)$$

где $h(s_j)$ – оценка для объекта s_j , полученная с помощью метода Саати. Стоит отметить, что оценки нормированы, то есть $\sum_{s_j \in S_i^k} h(s_j) = 1$, что, в свою очередь, обеспечивает сравнимость результатов для всех кластеров.

Уровень аварийности каждого контрастного объекта в кластере S_i^k оценивается на основе сравнительного анализа. Поскольку результаты, получаемые методом Саати, чувствительны к количеству сравниваемых элементов, в рамках исследования ограничиваются девятью наиболее репрезентативными объектами в каждом кластере, что соответствует рекомендованному пределу применимости метода. Для проведения экспертной оценки формируется матрица попарных сравнений $A = (a_{it})_{i,t=1,\dots,9}$, состоящая из элементов a_{it} , где i и t варьируются от 1 до 9:

$$a_{it} = \begin{cases} 1, s_i \text{ и } s_j \text{ имеют равные оценки} \\ 3, \text{ оценка на } s_i \text{ незначительно превышает оценку на } s_j \\ 5, \text{ оценка на } s_i \text{ значительно превышает оценку на } s_j \\ 7, \text{ оценка на } s_i \text{ явно превышает оценку на } s_j \\ 9, \text{ оценка на } s_i \text{ абсолютно превосходит оценку на } s_j \end{cases}$$

Кроме того, $a_{ti} = (a_{it})^{-1}$. В случае отсутствия статистической информации о применении технических средств организации дорожного движения с целью обеспечения и повышения безопасности дорожного движения на $s_j \in S_i^k$, по умолчанию $\gamma(f_j, S_i^k) = 0$. В противном случае находится среднее значение уровня безопасности дорожного движения по следующей формуле:

$$\overline{\gamma(f_j, S_i^k)} = \frac{\sum_{s_j \in S_i^k} \gamma(f_j, s_j)}{\sum_{s_j \in S_i^k} \text{sign}(\gamma(f_j, s_j))}. \quad (11)$$

Разброс значений оценки $\gamma(f_j, S_i^k)$ можно охарактеризовать средним квадратичным отклонением:
$$\sigma(\gamma(f_j, S_i^k)) = \sqrt{\frac{\sum_{s_j \in S_i^k} (\gamma(f_j, s_j))^2}{\sum_{s_j \in S_i^k} \text{sign}(\gamma(f_j, s_j))} - (\overline{\gamma(f_j, S_i^k)})^2}. \quad (12)$$

При превышении допустимого уровня значения $\sigma(\gamma(f_j, S_i^k))$, указывающего на значительную вариабельность влияния $\gamma(f_j, S_i^k)$ на риск аварийности, рекомендуется повторно провести группировку объектов с уменьшенным радиусом кластеризации r для достижения более точного результата. Определение значений $\gamma(f_j, S_i^k)$ с целью обеспечения и повышения безопасности дорожного движения с помощью технических средств организации дорожного движения позволил провести экстраполяцию уже известных оценок уровня безопасности дорожного движения и влияния объектов одного кластера на объекты того же кластера, которые не имеют пока подобных оценок.

Вывод. Модель оценки тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий, разработанная на основе метода анализа иерархий Саати, обеспечивает всестороннюю оценку ущерба, связанного с разными типами дорожно-транспортных происшествий, учитывая их различные последствия. Это позволяет учитывать сложные взаимосвязи между типами дорожно-транспортных происшествий и их последствиями, что является важным шагом в направлении создания более точной и объективной системы оценки риска на автомобильных дорогах. Предложен алгоритм группировки возможных мест размещения технических средств организации дорожного движения на основе выявленных показателей, влияющих на безопасность дорожного движения. Данный алгоритм может частично компенсировать недостаток статистических данных, связанных с уровнем безопасности дорожного движения, и повысить обоснованность оценки изменения уровня безопасности дорожного движения при установке технических средств организации дорожного движения [21].

Библиографический список:

1. Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах. М.: Информавтодор, 2003. – 87 с.
2. Справочник по безопасности дорожного движения. – М.: Росавтодор, 2010. – 384 с.
3. Сильянов В.В., Домке Э.Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для студ. высш. учеб. заведений. 2-е изд. М.: Академия, 2008. – 352 с.
4. Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог / Министерство автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 90 с.
5. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. Росавтодор. – М.: Транспорт, 2002 – 115 с.
6. Daganzo Carlos F. Fundamentals of Transportation and Traffic Operations. Oxford; New York: Pergamon, 1997: 339 p.
7. Schnabel W., D.Lohse. Din.Kirschbaum, Beuth Grundlagen der Strassen-verkehrstechnik und der Verkehrsplanung. dritte volstaendig ueberarbeitete Auflage. Berlin, Wien, Zuerich, 2011.B1619p,B2. 632p.
8. Клишковштейн, Г.И. Организация дорожного движения: учеб. для вузов / Г.И. Клишковштейн, М.Б. Афанасьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 2001 – 247 с.
9. Бешелев, С.Д. Экспертные оценки / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М.: Наука, 1973. – 161 с.
10. Методика оценки и расчета нормативов социально-экономического ущерба от дорожно-транспортных происшествий: методические рекомендации (Р-03112199-0502-00). – М.: Трансконсалтинг, 2001. – 62 с.
11. Девятков, В.В. Системы искусственного интеллекта: учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с.
12. Саати, Т.Л. Об измерении неосознаваемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений// *Cloud Of Science*. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 5–39.
13. Саати, Т.Л. Принятие решений: метод анализа иерархий: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
14. Соколов, Н.П. Введение в теорию многомерных матриц. – Киев: Наукова думка, 1972. – 17 с.
15. Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл; пер. с англ. Е.З.Демиденко; под ред. и с предисл. А.Я. Боярского. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
16. Бухарин, С.В. Кластерно-иерархические методы экспертизы экономических объектов: монография / С.В. Бухарин, А.В. Мельников. – Воронеж: Научная книга, 2012. – 276 с.
17. Гайдышев, И. П. Анализ и обработка данных / И.П. Гайдышев. – СПб.: Питер, 2001. – 750 с.

18. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: ИМ СОРАН, 1999. 270.
19. Кулаичев, А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. – М.: Форум, 2011. – 512 с.
20. Мельников А.В. Кластерно-иерархические методы экспертизы технических и экономических объектов: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.18 / Мельников А.В. Воронеж, 2015. – 32 с.
21. Арутюнян, М.А. Численный метод решения задачи рационального размещения технических средств организации дорожного движения. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1556> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.021

References:

1. Guide to Forecasting Traffic Intensity on Highways. Moscow: Informavtodor, 2003; 87. (In Russ)
2. Handbook of Road Safety. Moscow: Rosavtodor, 2010;384. (In Russ)
3. Silyanov V.V., E.R. Domke. Transport and Operational Qualities of Highways and City Streets: Textbook for Students of Higher Educational Institutions. 2nd ed. Moscow: Academy, 2008; 352. (In Russ)
4. Guidelines for assessing the capacity of highways. Ministry of Highways. M.:Transport, 1982; 90. (In Russ)
5. Recommendations for ensuring traffic safety on highways. Rosavtodor. M.: Transport, 2002; 115. (In Russ)
6. Daganzo, Carlos F. Fundamentals of Transportation and Traffic Operations / Carlos F. Daganzo. – Oxford; New York: Pergamon, 1997;339.
7. Schnabel W., D.Lohse. Din. Kirschaum, Beuth. Grundlagen der Strassen-verkehrstechnik und der Verkehrsplanung. dritte volstaendig ueberarbeitete Auflage. Berlin, Wien, Zuerich, 2011;1:619., 2:632.
8. Klinkstein, G.I. Traffic management: textbook for higher education institutions./G.I. Klinkstein, M.B. Afanasyev. – 5th ed., revised and enlarged. – M.: Transport, 2001; 247. (In Russ)
9. Beshelev, S.D. Expert assessments / S.D. Beshelev, F.G. Gurvich. - M.: Nauka, 1973;161. (In Russ)
10. Methodology for assessing and calculating standards for socio-economic damage from road accidents: methodological recommendations (R-03112199-0502-00). - M.: Transconsulting, 2001; 62. (In Russ)
11. Devyatkov, V.V. Artificial Intelligence Systems: A Textbook for Universities / V.V. Devyatkov. – M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2001;352. (In Russ)
12. Saati, T.L. On Measuring the Intangible. An Approach to Relative Measurements Based on the Principal Eigenvector of a Pairwise Comparison Matrix. *Cloud Of Science*. 2015; 2(1):5-39 (In Russ)
13. Saati, T.L. Decision Making: The Analytic Hierarchy Process: trans. from English / T. Saati. – M.: Radio and Communications, 1993;278. (In Russ)
14. Sokolov, N.P. Introduction to the Theory of Multidimensional Matrices. – Kyiv:Naukova Dumka, 1972;17.
15. Durand, B. Cluster Analysis / B. Durand, P. Odell; trans. from English by E.Z.Demidenko; edited and with a foreword by A.Ya. Boyarsky. – Moscow: Statistika, 1977; 128. (In Russ)
16. Bukharin, S.V. Cluster-Hierarchical Methods of Expertise of Economic Objects: monograph / S.V. Bukharin, A.V. Melnikov. – Voronezh: Nauchnaya Kniga, 2012;276. (In Russ)
17. Gaidyshev, I. P. Analysis and processing of data. St. Petersburg: Piter, 2001;750. (In Russ)
18. Zagoruiko N.G. Applied methods of data and knowledge analysis. Novosibirsk:IMSBRAS, 1999;270.
19. Kulaichev, A. P. Methods and means of complex data analysis. Moscow: Forum, 2011;512. (In Russ)
20. Melnikov A.V. Cluster-hierarchical methods of examination of technical and economic objects: author's abstract. dis. Dr. of Technical Sci.: 05.13.18. Melnikov A.VI. Voronezh, 2015;32. (In Russ)
21. Arutyunyan, M.A. Numerical method for solving the problem of rational location of technical means of traffic management. Modeling, Optimization and Information Technology. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1556> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.021 (In Russ)

Сведения об авторе:

Арутюнян Меланя Андраниковна, старший преподаватель кафедры математического моделирования и прикладной информатики; melanya.arutyunyan@yandex.ru; ORCID 0000-0001-7395-9069

Information about the author:

Melania A. Arutyunian, Senior Lecturer Department of Mathematical Modeling and Applied Informatics; melanya.arutyunyan@yandex.ru; ORCID 0000-0001-7395-9069

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 10.06.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revided 30.08.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 30.10.2025.