



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 38 за 2024 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**Р.С. Ехлаков, Т.В. Сивакова,
В.А. Судаков**

Многокритериальная оценка безопасности транспортной сети

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Ехлаков Р.С., Сивакова Т.В., Судаков В.А. Многокритериальная оценка безопасности транспортной сети // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2024. № 38. 16 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2024-38>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2024-38>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской академии наук**

Р.С. Ехлаков, Т.В. Сивакова, В.А. Судаков

**Многокритериальная оценка
безопасности транспортной сети**

Москва — 2024

Ехлаков Р.С., Сивакова Т.В., Судаков В.А.

Многокритериальная оценка безопасности транспортной сети

Безопасность дорожного движения является одним из наиболее важных факторов эффективности транспортной сети. Целью исследования являются методы анализа критериев, влияющих на безопасность движения в транспортной сети. Вес критериев был рассчитан при помощи метода парных сравнений. Ранжирование альтернативных маршрутов было проведено с помощью техники порядка предпочтения по сходству с идеальным решением. Результаты исследования могут быть использованы при выборе рационального маршрута, учитывающего не только скорость перемещения, но и различные риски.

Ключевые слова: критерии, коэффициент безопасности маршрута, метод анализа иерархий, предпочтение, идеальное решение.

Roman Sergeevich Ekhlakov, Tatiana Vladimirovna Sivakova, Vladimir Anatolievich Sudakov

Multicriteria assessment of transport network security

Road safety is one of the most important factors in the efficiency of a transport network. The purpose of the study is methods for analyzing criteria affecting traffic safety in the transport network. The weight of the criteria was calculated using the paired comparison method. The ranking of alternative routes was carried out using the order of preference technique based on similarity to the ideal solution. The results of the study can be used when choosing a rational route, taking into account not only the speed of movement, but also various risks.

Key words: criteria, route safety factor, analytic hierarchy process (AHP), preference, ideal solution.

Оглавление

Введение	3
Обзор исследований	4
Критерии безопасности транспортной сети	5
Расчет альтернатив	7
Выводы	14
Библиографический список.....	15

Введение

Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) считаются одной из важных экономических и социальных проблем и учитываются при проектировании новых дорог, путей и объездов должностными лицами и учреждениями, отвечающими за безопасность в транспортной сети. Несмотря на многочисленные технические устройства и ограничения на дорогах, количество ДТП и связанных с ними травм и смертей в России достаточно высоко. Москва показывает ежегодное снижение количества смертности от ДТП, но тенденция не обладает устойчивым характером, а в регионах России статистика далека от показателей московского региона. Количество дорожно-транспортных происшествий по итогам 2023 года выросло на 4,5% по сравнению с 2022 годом, следует из данных Госавтоинспекции [1]. Всего произошло 132,4 тысячи ДТП, в которых погибло 14,5 тысяч человек (+2,3%) и получило травмы 166,5 тысяч человек (+4,3%). Таким образом, необходимо улучшение существующих и внедрение новых инструментов для достижения устойчивых сниженных показателей смертности от ДТП к 2030 году, согласно установленному указом президента – не более 4 смертей в результате ДТП на 100 тысяч человек.

Определение критериев безопасности, а также оценка и ранжирование альтернатив (маршрутов) на основе критериев являются эффективным методом для обеспечения безопасности всей транспортной сети и снижения количества дорожно-транспортных происшествий, травматизма и смертности. Расчет коэффициента безопасности маршрута по критериям безопасности позволит водителям определять путь к месту назначения, используя информацию о безопасности каждого маршрута. Дорога может иметь более короткое расстояние до пункта назначения, но не соответствовать уровню безопасности, что является причиной поиска и выбора альтернативного маршрута с большим расстоянием, но более высоким коэффициентом безопасности. В случае отсутствия альтернативного маршрута водитель, зная коэффициент безопасности, будет действовать более осторожно при поездке по маршруту. Также при расчете коэффициента безопасности дороги, если маршрут имеет низкий уровень безопасности или не соответствует стандартам безопасности, необходимым для движения транспортных средств, могут быть предприняты ограничения и улучшения для повышения уровня безопасности со стороны учреждений, отвечающих за безопасность движения в транспортной сети. Органам власти предоставляется возможность надлежащего управления дорогами путем их ранжирования по различным критериям безопасности.

В работе представлен обзор современных исследований по ранжированию и оценке альтернатив в транспортных сетях. Проанализированы наиболее важные критерии, влияющие на коэффициент безопасности маршрута. Критерии были проверены, дополнены и подтверждены специалистами в области безопасности дорожного движения. Вес каждого критерия рассчитывался с помощью метода анализа иерархий (АНР). При помощи

техники порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS) [2] было произведено ранжирование альтернативных маршрутов, по которым можно добраться из пункта отправления в пункт назначения.

Обзор исследований

Т. Саати [3] впервые применил метод аналитической иерархии (АИР) при планировании перевозок с использованием нескольких критериев. М. Табуканон и Х.-М. Ли [4] используют АИР для оценки улучшения сельских дорог с использованием различных критериев. Д. Милтон и др. [5] применяют моделирование для улучшения понимания распределения травматизма в результате аварий на участках автомагистралей, а также влияния дорожного движения, характеристик шоссе и погодных условий на эти распределения. Результаты показывают, что модель достаточно перспективна в качестве методологического инструмента при расчете безопасности дорожного движения. Д. Ламберт и др. [6] используют количественные и качественные данные для анализа аварий и планирования разнообразного портфеля инвестиционных проектов по строительству автомагистралей. Предлагаемый подход можно адаптировать для анализа и предотвращения аварий, которые включают использование количественных и качественных данных, анализ рисков и принятие решений на основе многокритериального анализа [7,8].

Р. Элвик [9] представляет результаты исследования определения опасных мест на дорогах в европейских странах. Определение опасных мест на дорогах производилось по шести характеристикам: относительно численности населения аналогичных участков, с учетом метода скользящего окна, со ссылкой на нормальный уровень безопасности, зарегистрированное или ожидаемое количество аварий, соображения серьезности дорожно-транспортного происшествия и продолжительность периода, используемого для определения опасных участков дороги. Автор также анализирует, как установление приоритетов безопасности дорожного движения строго в соответствии с анализом затрат и выгод повлияет на обеспечение безопасности дорожного движения в Норвегии и Швеции. В статье выявлена неэффективность политики безопасности дорожного движения, обусловленная следующими факторами: отсутствие власти, существование социальных дилемм и приоритет, отдаваемый другим политическим целям, в частности региональному развитию.

С.-П. Миау и Ж. Сун [10] исследуют проблемы безопасности дорожного движения, касающиеся методологий ранжирования по приведенным статистическим разработкам в области пространственно-временных обобщенных линейных смешанных моделей. Авторы рассматривают общие подходы к ранжированию и показывают, как можно использовать многомерную пространственную математическую модель для моделирования дорожно-транспортных происшествий с несколькими типами травм, а также демонстрируют ее использование в рамках байесовской структуры для

ранжирования объектов по значимости ДТП на единицу отрезка, пройденную транспортным средством.

К. Гертс и др. [11] провели анализ чувствительности, чтобы выяснить, как рейтинг аварий влияет на транспортную сеть в Бельгии. Модель учитывает только серьезные травмы и количество погибших в ДТП и не учитывает общее число травм и пострадавших пассажиров.

Критерии безопасности транспортной сети

В данной работе используются методы принятия многокритериальных решений (MCDM). Коэффициент безопасности каждой альтернативы (маршрута) означает относительный вес альтернативы к идеальным критериям, влияющим на безопасность транспортной сети. На начальном этапе были выявлены критерии, влияющие на коэффициент безопасности маршрута, на основе описанных выше исследований. Затем критерии были подтверждены и дополнены специалистами в области безопасности дорожного движения. На следующем этапе для каждой альтернативы были собраны данные по каждому из критериев на основе следующих источников данных:

- OSM, <https://www.openstreetmap.org>;
- Статистика ГИБДД, stat.gibdd.ru;
- Карта камер ГИБДД, гибдд.пф/milestones;
- Некоммерческий проект «Карта ДТП», dtp-stat.ru;
- Автомобильный портал «Рус ДТП», rusdtp.ru/stat-dtp;
- Данные коммерческих компаний;
- Пользовательские данные.

Пример набора данных о ДТП из базы данных <https://dtp-stat.ru> приведен ниже:

```
{
  "id": 384094, # идентификатор
  "tags": ["Дорожно-транспортные происшествия"], # показатели с сайта ГИБДД
  "light": "Светлое время суток", # время суток
  "point": {"lat": 50.6039, "long": 36.5578}, # координаты
  "nearby": [ "Нерегулируемый перекрёсток неравнозначных улиц (дорог)" ],
#координаты
  "region": "Белгород", # город/район
  "address": "г Белгород, ул Сумская, 30", # адрес
  "weather": ["Ясно"], # погода
  "category": "Столкновение", # тип ДТП
  "datetime": "2017-08-05 13:06:00", # дата и время
  "severity": "Легкий", # тяжесть ДТП/вред здоровью
  "vehicles": [ # участники - транспортные средства
    {
      "year": 2010, # год производства транспортного средства
      "brand": "ВАЗ", # марка транспортного средства
      "color": "Иные цвета", # цвет транспортного средства
      "model": "Priora", # модель транспортного средства
      "category": "С-класс (малый средний, компактный) до 4,3 м", # категория ТС
      "participants": [ # участники внутри ТС
        {
          "role": "Водитель", # роль участника

```

```

"gender": "Женский", # пол участника
"violations": [], # нарушения правил участником
"health_status": "Раненый, находящийся...", # состояние здоровья
участника
"years_of_driving_experience": 11 # стаж вождения водителя
}
]
},
],
"dead_count": 0, # кол-во погибших в ДТП
"participants": [], # участники без транспортных средств
"injured_count": 2, # кол-во раненых в ДТП
"parent_region": "Белгородская область", # регион
"road_conditions": ["Сухое"], # состояние дорожного покрытия
"participants_count": 3, # кол-во участников ДТП
"participant_categories": ["Все участники", "Дети"] # категории участников
}

```

Вес каждого критерия определялся с помощью метода анализа иерархий (АНР) на основе опроса экспертов. После определения веса критериев и их значений для каждой альтернативы (маршрута) были определены коэффициенты безопасности каждого маршрута и ранжирование с помощью техники порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS). Метод АНР используется из-за его простоты и возможности учета нескольких мнений лиц, принимающих решения о весе критерия. Совместное использование сразу двух методов уменьшает количество необходимых парных сравнений, поэтому одновременное использование является более подходящим вариантом, чем другие варианты MCDM. Процесс определения критериев и принятия решений изображен на рис. 1.

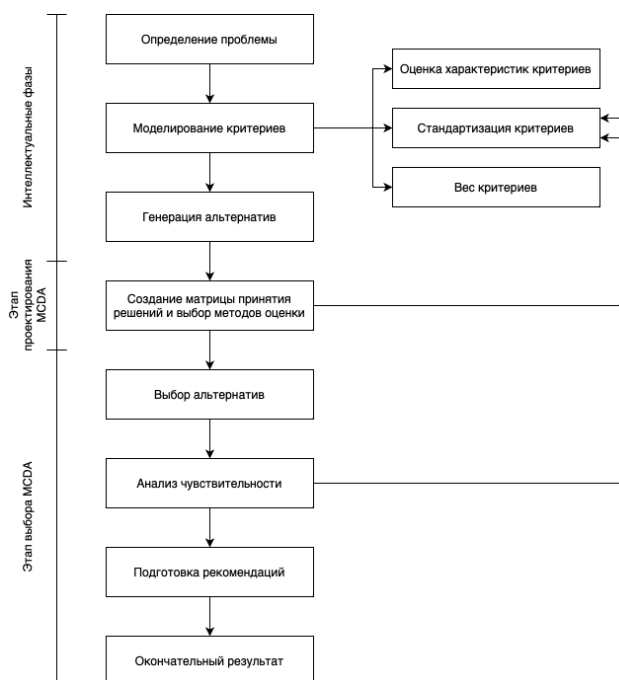


Рис. 1. Процесс определения критериев и принятия решений

По мнению исследователей в области безопасного движения в транспортной сети и экспертов профильных организаций, существует 13 критериев, оказывающих наибольшее влияние на безопасность маршрута. Следует отметить, что критерии связаны с особенностями дорог, взаимодействием участников сети, действиями по обеспечению безопасности, нарушениями правил дорожного движения, авариями, произошедшими на дороге, и радиоактивным загрязнением местности [12-14]. Полный список критериев изображен на рис. 2.

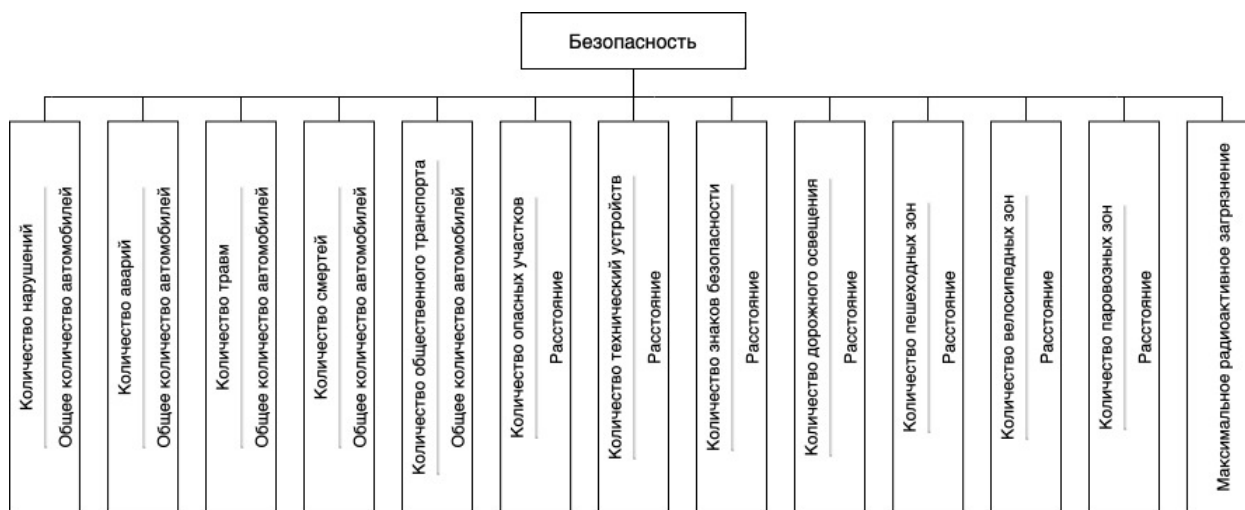


Рис. 2. Критерии безопасности маршрута

Под критериями нарушений, аварий, травм, смертей, общественного транспорта и другими принимается зарегистрированное количество при помощи актуальных технических средств и открытой информации ГИБДД. Критерий количества технических устройств подразумевает оснащение дороги такими объектами, как камеры контроля скорости, нарушения правил движения и т.д. Критерий дорожного освещения измеряется исходя из среднего количества фонарей на дороге каждые 50 метров. Данные об общем количестве автомобилей собираются с мобильных устройств, передающих GPS-данные о текущем местоположении в режиме реального времени [15].

Расчет альтернатив

Собранные данные относятся к 36-месячному периоду (01.01.2020-31.12.2023), но для более точного анализа рекомендуется накапливать и рассматривать данные за более длительный период о каждом сегменте дороги. Пример данных о наличии ДТП за 2020-2023 гг. для г. Москвы изображен на рис. 3.

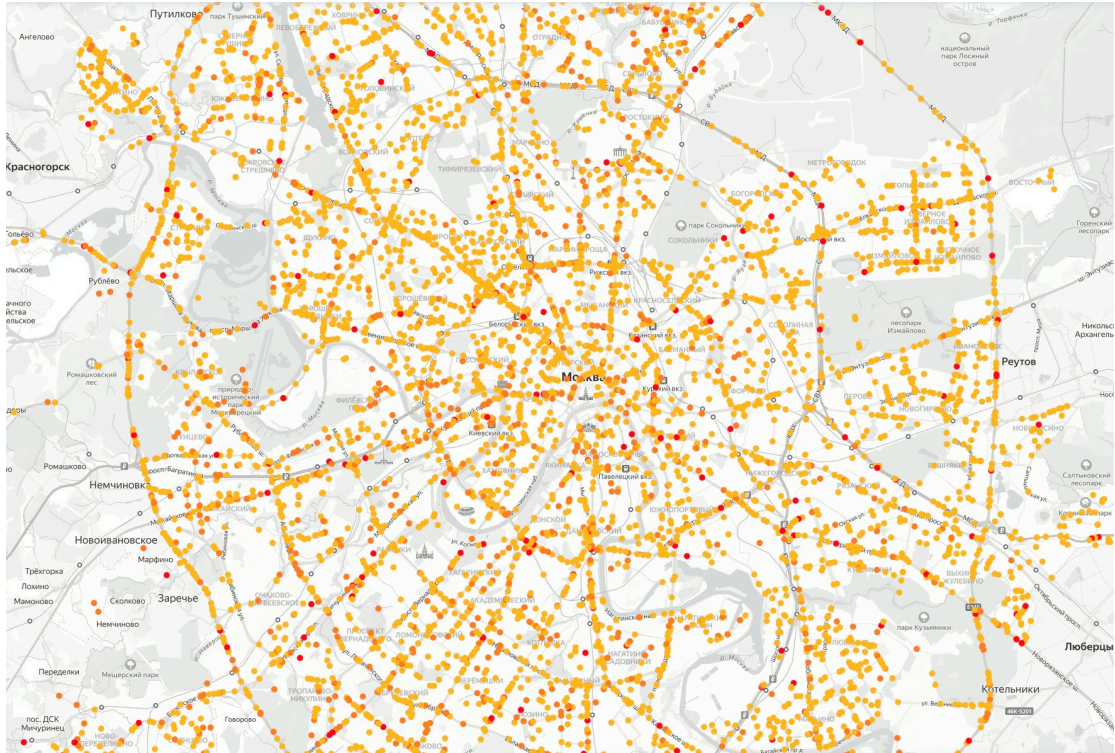


Рис. 3. Данные о ДТП для г. Москвы за 2020-2023 гг.
[источник: <https://dtp-stat.ru>]

В качестве эксперимента были проложены 4 альтернативных маршрута из точки отправления (Москва, ул. 26 Бакинских Комиссаров, д. 5) в точку прибытия (Москва, ул. Стартовая, д. 14), изображенные на рис. 4.

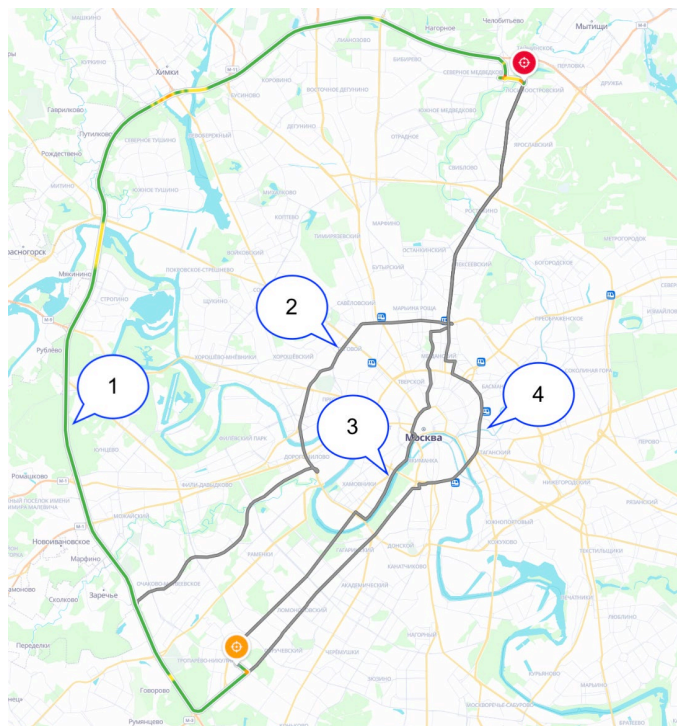


Рис. 4. Альтернативные маршруты из точки отправления в точку прибытия

Сравнение проводится с помощью метода анализа иерархий (АНР), для которого эксперты в области безопасности транспортного движения заранее заполнили матрицы попарного сравнения по шкале вербальных суждений. Нижняя треугольная часть матрицы дополняется обратными значениями оценок верхней треугольной части. Приоритеты из парных матриц критериев получаются путем вычисления главного собственного вектора, который после нормализации становится вектором приоритетов. Для каждой матрицы сравнения пар определяется сравнительная значимость элементов (альтернатив), являющаяся результатом сравнения пар, и представляется в форме вектора приоритетов. Каждая составляющая этого вектора указывает, какой сравнительной значимостью обладает данный элемент в отношении рассматриваемого элемента более высокого уровня. В таблице 1 приведены значения параметров для каждого альтернативного маршрута.

Таблица 1

Маршрут	Максимальное радиоактивное загрязнение	Количество смертей Общее количество автомобилей	Количество травм Общее количество автомобилей	Количество аварий Общее количество автомобилей	Количество опасных участков Расстояние	Количество велосипедных зон Расстояние	Количество нарушений Общее количество автомобилей	Количество дорожного освещения Расстояние	Количество пешеходных зон Расстояние	Количество технических устройств Расстояние	Количество общественного транспорта Общее количество автомобилей	Количество знаков безопасности	Количество парковочных зон
1	0,09	0,0021	0,0084	0,0524	3	10	3,014	520	10	44	0,2041	51	11
2	0,09	0,0017	0,0086	0,0495	6	12	2,942	360	15	22	0,3051	39	14
3	0,08	0,0018	0,0071	0,0351	5	6	3,112	370	14	29	0,2851	36	12
4	0,10	0,0014	0,0062	0,0409	4	3	3,485	340	12	26	0,2735	35	10
Сумма	0,36	0,0113	0,007	0,1779	18	31	12,553	1590	51	121	1,0678	161	47

Метод АНР используется для определения весов критериев, влияющих на коэффициент безопасности дорог. Метод является одним из наиболее широко используемых инструментов принятия решений для оценки большого количества критериев [16]. Одним из применений метода АНР является получение веса критериев в процессе принятия решений попарным сравнением критериев [17]. Сравнение критериев проводится с помощью парных матриц, в которых лицо, принимающее решения (ЛПР), заполняет верхние треугольные элементы значениями, полученными по шкале вербальных суждений [18]. Нижняя треугольная часть матрицы дополняется обратными значениями оценок в верхней треугольной части, при этом получается обратная матрица. Приоритеты из парных матриц критериев получаются путем вычисления главного собственного вектора, затем значения собственных векторов нормализуются [19].

При необходимости учитывания мнения двух и более лиц, принимающих решения, необходимо использовать групповой метод анализа иерархий (ГАНР) для объединения разных идей. В таких случаях можно получить среднее геометрическое мнений различных экспертов (X_{ij}^l) и рассматривать как основную матрицу по формуле (1):

$$X_{ij}^l = \left(\prod_{l=1}^k X_{ij}^l \right)^{\frac{1}{k}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, k; i \neq j; \quad (1)$$

где k – число экспертов, i, j – сравниваемые критерии или альтернативы. После алгебраических вычислений матриц необходимо определить непротиворечивость суждений. В обратно-симметричной матрице наибольшее собственное значение больше или равно ее порядку. Обратно-симметричная матрица непротиворечива, если ее наибольшее собственное значение равно порядку матрицы. Индекс согласованности (CI) определяется по формуле (2):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (2)$$

где λ_{max} – наибольшее собственное значение матрицы, а n – ее порядок. После этого рассчитывается индекс несогласованности (CR) по формуле (3):

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (3)$$

где RI – это случайный индекс со значениями шкалы Т. Саати, рассчитанный для квадратной n -мерной положительной обратно-симметричной матрицы, элементы которой сгенерированы датчиком случайных чисел, распределенных по равномерному закону для интервала значений: $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$. Если индекс несогласованности $CR < 0,1$, то степень согласованности следует считать хорошей. В некоторых случаях приемлемыми значениями можно считать диапазон $0,1 - 0,3$. Это, как правило,

относится к задачам, для которых принимаемые по экспертным заключениям решения не влекут за собой серьезных негативных последствий. В противном случае ($CR > 0,1 - 0,3$) экспертам рекомендуется пересмотреть свои суждения. Для этого необходимо выявить те позиции в матрице суждений, которые вносят максимальный вклад в величину отношения согласованности, и попытаться изменить меру несогласованности в меньшую сторону на основе более глубокого анализа вопроса.

Попарные сравнения критериев в матрицах проводились на основе 9-вариантной шкалы отдельно двумя экспертами дорожно-транспортных организаций, специализирующимися в вопросах безопасности. Объединив мнения экспертов, мы получили комбинационную матрицу парных сравнений в таблице 2.

Таблица 2

a_{ij}	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}
c_1	1	3	5	9	1/4	3	1/2	1/2	1	1/2	1/3	1/5
c_2	1/3	1	3	7	1/5	1	1/4	1/5	1/3	1/3	1/3	1/7
c_3	1/5	1/3	1	5	1/7	1/3	1/6	1/7	1/6	1/7	1/7	1/9
c_4	1/9	1/7	1/5	1	1/9	1/5	1/9	1/9	1/6	1/7	1/5	1/9
c_5	4	5	7	9	1	3	1	1	3	3	3	1/3
c_6	1/3	1	3	5	1/3	1	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/9
c_7	2	4	6	9	1	4	1	1/2	1/2	3	3	1/3
c_8	4	5	7	9	1	4	2	1	3	3	5	1/3
c_9	1/2	3	6	6	1/3	3	2	1/3	1	1	1	1/5
c_{10}	1/3	3	7	7	1/3	3	1/3	1/3	1	1	2	1/7
c_{11}	1/2	3	7	5	1/3	3	1/3	1/5	1	1/2	1	1/7
c_{12}	5	7	9	9	3	9	3	3	5	7	7	1
Сумма	18,311	35,476	61,2	81	8,037	34,533	10,944	7,571	16,5	19,952	23,343	3,162

Относительные веса критериев были получены путем нормализации каждой комбинационной матрицы попарного сравнения и получения среднего арифметического нормализованной матрицы. Веса подкритериев и коэффициенты совместимости, полученные в результате попарного сравнения комбинационных матриц, представлены в таблице 3. Поскольку коэффициенты совместимости всех матриц попарного сравнения меньше 0,1, то проведенные сравнения являются приемлемыми, а веса обладают необходимой достоверностью.

Таблица 3

Приоритет	Подкритерий	Вес
1	Максимальное радиоактивное загрязнение	0,2084
2	$\frac{\text{Количество смертей}}{\text{количество автомобилей}}$	0,16
3	$\frac{\text{Количество травм}}{\text{количество автомобилей}}$	0,1243
4	$\frac{\text{Количество аварий}}{\text{Общее количество автомобилей}}$	0,0916
5	$\frac{\text{Количество опасных участков}}{\text{Расстояние}}$	0,0782
6	$\frac{\text{Количество велосипедных зон}}{\text{Расстояние}}$	0,0723
7	$\frac{\text{Количество пешеходных зон}}{\text{Расстояние}}$	0,0702
8	$\frac{\text{Количество нарушений}}{\text{Общее количество автомобилей}}$	0,0517
9	$\frac{\text{Количество дорожного освещения}}{\text{Расстояние}}$	0,0474
10	$\frac{\text{Количество технических устройств}}{\text{Расстояние}}$	0,0322
11	$\frac{\text{Количество знаков безопасности}}{\text{Расстояние}}$	0,0241
12	$\frac{\text{Количество общественного транспорта}}{\text{Общее количество автомобилей}}$	0,0230
13	$\frac{\text{Количество парковочных зон}}{\text{Расстояние}}$	0,0166
	Сумма	1

После определения веса критериев можно ранжировать альтернативы при помощи техники порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS). Модель делает предположение, что выбранная альтернатива должна иметь наименьшее расстояние от положительного идеального решения и наибольшее – от отрицательного идеального решения. Математически модель можно выразить в виде следующих шагов:

1. Расчет нормализованной матрицы решений (N), где нормализованное значение N_{ij} рассчитывается по формуле (4):

$$N_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n X_{ij}^2}}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где X_{ij} – значения критериев.

2. Расчет взвешенной нормализованной матрицы решений (V), где взвешенное нормализованное значение V_{ij} описывается формулой (5):

$$V_{ij} = W_i N_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где W_i – вес i -го критерия и $\sum_{i=1}^m W_i = 1$.

3. Определение положительного идеального и отрицательного идеального решения описывается формулой (6). Положительное идеальное решение (A^+) для максимизируемых критериев включает наивысшие значения критерия, а для минимизируемых критериев включает наименьшие значения критерия. Кроме того, идеальное отрицательное решение (A^-) для максимизируемого и минимизируемого критериев включает наименьшее и наибольшее значения критерия соответственно.

$$A^+ = \{V_1^+, \dots, V_n^+\}, \text{ где } V_j^+ = \begin{cases} \text{Max}_i V_{ij}, \text{ если } j \in K \\ \text{Min}_i V_{ij}, \text{ если } j \in K' \end{cases} \quad (6)$$

$$A^- = \{V_1^-, \dots, V_n^-\}, \text{ где } V_j^- = \begin{cases} \text{Min}_i V_{ij}, \text{ если } j \in K \\ \text{Max}_i V_{ij}, \text{ если } j \in K' \end{cases}$$

где $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ и K соответствуют положительным критериям, K' – отрицательным критериям.

4. Расчет мер разделения, используя m -мерное евклидово расстояние. Расстояние каждой альтернативы от положительного идеального и отрицательного идеального решения описываются формулами (7) и (8):

$$d_j^+ = \left\{ \sum_{i=1}^m (V_{ij} - V_i^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, j = \overline{1, n} \quad (7)$$

$$d_j^- = \left\{ \sum_{i=1}^m (V_{ij} - V_i^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, j = \overline{1, n} \quad (8)$$

5. Расчет относительной близости к идеальному решению. Относительная близость альтернативы A_j по отношению к A^+ определяется по формуле (9):

$$R_j = \frac{d_j^-}{(d_j^+ + d_j^-)}, j = \overline{1, n}, \quad (9)$$

где $d_j^+ \geq 0$ и $d_j^- \geq 0$, а также $R_j \in [0, 1]$.

6. Ранжирование порядка альтернатив производится на основе значений R_j . Каждая альтернатива с большим R_j лучше, чем другие альтернативы.

Для объединения значений различных критериев относительный вес каждого умножался на значение важности, а затем суммировались друг с другом. После получения нормированной матрицы решений взвешенная нормированная матрица была получена путем умножения матрицы на диагональную матрицу весов критериев, и на ее основе были определены идеальные положительные A^+ и отрицательные A^- решения. На следующем этапе было получено расстояние каждой альтернативы (маршрута) до положительного d_j^+ и отрицательного d_j^- идеальных решений, на основе которых относительная близость была достигнута по отношению к идеальному решению R_j . Результат расчета ранга альтернатив приведен в таблице 4.

Таблица 4

Номер маршрута	d_j^+	d_j^-	R_j	Коэффициент безопасности	Вес, %
1	0,041	0,160	0,589	58,9	20,84
2	0,095	0,091	0,786	78,6	27,81
3	0,072	0,125	0,640	64,0	22,65
4	0,064	0,136	0,811	81,1	28,70

Каждая альтернатива, имеющая более высокое значение R_j , считается лучшей. Таким образом, по результатам расчетов можно утверждать, что маршрут 4 является наиболее безопасным, а маршрут 1 – наименее безопасным в определенный момент времени.

Выводы

Определение коэффициента безопасности маршрутов на основе различных критериев будет полезно при принятии локальных, региональных и государственных решений при планировании поездок, улучшения состояния дорог и строительства новых дорог. В настоящем исследовании были определены критерии, влияющие на коэффициент безопасности элементов транспортной сети. Вес каждого критерия был получен с использованием метода анализа иерархий (АНП). С помощью техники порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS) были определены коэффициент и рейтинг безопасности каждого альтернативного маршрута. На основе матрицы принятия решений можно проанализировать состояние дорог, повысить значения положительных критериев и уменьшить значения отрицательных критериев.

Собранные данные, на основе которых были рассчитаны коэффициенты безопасности, относятся к 36-месячному периоду, но для более точного анализа рекомендуется накапливать и рассматривать данные за более длительный период. Эта цель может быть достигнута за счет создания и развития комплексных баз данных и инструментов кэширования, хранящих необходимую информацию о каждом сегменте дороги.

Кроме того, могут быть рассмотрены и другие критерии для определения коэффициента безопасности альтернатив, влияющие на безопасность движения в транспортной сети. При наличии большего количества данных и используя мнения большего количества экспертов для более точного определения веса критериев, можно провести наиболее точную оценку безопасности маршрутов.

Библиографический список

1. Аварийность на дорогах России // URL: <https://stat-gibdd.ru> (дата обращения: 01.05.2024).
2. Сивакова Т.В., Судаков В.А. Применение метода TOPSIS при агрегировании экспертных суждений // Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВСППС'2021): Материалы конференции, Алушта, 04–13 сентября 2021 года. – Москва: МАИ, 2021. – С. 144-145.
3. Saaty T.L. Transport planning with multiple criteria: The analytic hierarchy process applications and progress review // Journal of Advanced Transportation. Volume 29, Issue 1, P. 81-126. – 1995. <https://doi.org/10.1002/atr.5670290109>.
4. Tabucanon M.T., Lee H-M. Multiple criteria evaluation of transportation system improvement projects: The case of Korea // Journal of Advanced Transportation. Volume 29, Issue 1. P. 127-143. – 1995. <https://doi.org/10.1002/atr.5670290110>.
5. Milto J.C., Shankar V.N., Mannering F.L. Highway accident severities and the mixed logit model: An exploratory empirical analysis // Accident Analysis & Prevention. Volume 40, Issue 1, P. 260-266. – 2008. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.06.006>.
6. Lambert J.H., Peterson K.D., Joshi N.N. Synthesis of quantitative and qualitative evidence for accident analysis in risk-based highway planning // Accid Anal Prev. 38(5):925-35. – 2006. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.03.003>.
7. Сивакова Т. В., Судаков В.А. Многокритериальная оценка грузовых летательных аппаратов с использованием нечетких областей предпочтений // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), Алушта, 06–13 сентября 2020 года. – Москва: МАИ, 2020. – С. 718-719.

8. Посадский А.И., Сивакова Т.В., Судаков В.А. Агрегирование нечетких суждений экспертов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. – № 101. – 12 с. – <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-101/>
9. Elvik R. A survey of operational definitions of hazardous road locations in some European countries // *Accident Analysis & Prevention*. Volume 40, Issue 6. P. 1830-1835. – 2008. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.08.001>.
10. Miaou S-P., Song J.J. Bayesian ranking of sites for engineering safety improvements: Decision parameter, treatability concept, statistical criterion, and spatial dependence // *Accident Analysis & Prevention*. Volume 37, Issue 4. P. 699-720. – 2005. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.03.012>.
11. Geurts K., Wets G., Brijs T., Vanhoof K., Karlis D. Ranking and selecting dangerous crash locations: correcting for the number of passengers and Bayesian ranking plots // *J Safety Res.* 37(1):83-91. – 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2005.10.020>.
12. Ekhlakov R., Romanova E., Dogadina E., Korchagin S., Gataullin S., Mosiej J., Gataullin T., Nikitin P. Modeling the Chemical Pollution of the Area by the Random-Addition Method // *Fractal Fract.* 6, 193. – 2022. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6040193>.
13. Ekhlakov R., Tatarinov V., Dutov A. Development and application of step-by-step addition algorithm for modelling the surface of radioactive contamination of the area // *AIP Conf. Proc.* 2195, 020038. – 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5140138>.
14. Ekhlakov R., Tatarinov V., Dutov A. Investigation of the application of fractal geometry methods for the construction of radioactive contamination zones // *AIP Conf. Proc.* 2195, 020062. – 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5140162>.
15. Ekhlakov R., Andriyanov N. Multicriteria Assessment Method for Network Structure Congestion Based on Traffic Data Using Advanced Computer Vision // *Mathematics*, 12, 555. – 2024. <https://doi.org/10.3390/math12040555>.
16. Vaidya O.S., Kumar S. Analytic hierarchy process: An overview of applications // *European Journal of Operational Research*. Volume 169, Issue 1. P. 1-29. – 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>.
17. Ехлаков Р. Современные методы моделирования транспортных потоков. Модель многокритериальной оценки рациональности маршрута // *Научно-технический вестник Поволжья*, №11. С. 70-73. – 2023.
18. Saaty R.W. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*. Volume 9, Issues 3-5. P. 161-176. – 1987. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
19. Gomez-Ruiz J.A., Karanik M., Pelaez J.I. Improving the Consistency of AHP Matrices Using a Multi-layer Perceptron-Based Model // *Proceedings of the 10th International Work-Conference on Artificial Neural Networks: Part I: Bio-Inspired Systems: Computational and Ambient Intelligence*. – 2009. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02478-8_6.