

ТРАНСПОРТ

УДК 625.7

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-39-48

ВЛИЯНИЕ ДОРОЖНОЙ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К КЛАССИФИКАЦИИ РИСКОВ

*д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ**(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск)**канд. техн. наук, доц. С.В. БОГДАНОВИЧ, М.Г. БУРОВА**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Представлен новый подход к классификации и оценке рисков на загородных автомобильных дорогах, основанный на многомерном анализе системы «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда». Разработана методика оценки рисков с использованием комплексного индекса, учитывающего степень воздействия факторов, типы взаимодействия между элементами системы и компоненты транспортной системы. Особое внимание уделено роли дорожной инфраструктуры и возможностям интеллектуальных транспортных систем в управлении рисками. Предложены инновационные решения по повышению безопасности движения, включая применение «умных» покрытий, систем автомобильной коммуникации и технологий «дорожных цифровых двойников». Показано, что комплексное внедрение современных технологий может снизить количество дорожно-транспортных происшествий на 20–30% в течение 5–10 лет. Представлен анализ социально-экономических эффектов от внедрения предложенных решений.

Ключевые слова: *безопасность дорожного движения, классификация рисков, дорожная инфраструктура, интеллектуальные транспортные системы, комплексный индекс риска.*

Введение. Безопасность дорожного движения остается одной из наиболее острых проблем современного общества. Несмотря на значительные усилия, направленные на снижение аварийности, дорожно-транспортные происшествия (ДТП) продолжают наносить существенный ущерб экономике и обществу. Особую озабоченность вызывает ситуация на загородных автомобильных дорогах с одной проезжей частью, где высокие скорости движения в сочетании с ограниченной инфраструктурой создают повышенные риски для участников движения.

Традиционные подходы к классификации и оценке рисков на автомобильных дорогах, основанные преимущественно на статистических методах и анализе аварийности, не всегда позволяют учесть динамичный характер современных транспортных систем. В условиях стремительного развития технологий и изменения характера дорожного движения возникает потребность в новых, более гибких и адаптивных методах оценки и управления рисками.

Особую роль в обеспечении безопасности дорожного движения играет дорожная инфраструктура. Однако существующие классификации рисков зачастую недостаточно детализируют инфраструктурные факторы, что затрудняет разработку эффективных мер по повышению безопасности. В этом контексте интеграция интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в дорожную инфраструктуру открывает новые возможности для мониторинга и оценки опасности узловых пунктов загородных автомобильных дорог в реальном времени.

Цель данной статьи – предложить классификацию рисков на загородных автомобильных дорогах, уделяя особое внимание инфраструктурным факторам и их взаимосвязи с безопасностью дорожного движения. Предлагаемая классификация основана на многофакторном анализе системы «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда» (ВАДС) и учитывает динамический характер взаимодействия между этими компонентами. Особое внимание уделяется адаптивности системы к изменяющимся внешним условиям, включая изменения дорожных покрытий, поведения водителей и внедрение новых технологий. Представленный в статье подход призван способствовать более глубокому пониманию природы рисков на загородных автомобильных дорогах и разработке эффективных стратегий повышения безопасности дорожного движения с учетом современных технологических возможностей.

Основная часть. Оценка рисков на загородных дорогах традиционно основывалась на анализе статистических данных о дорожно-транспортных происшествиях и их последствиях. Эти подходы, сформировавшиеся во второй половине XX в., сыграли значительную роль в понимании факторов, влияющих на безопасность дорожного движения, и разработке мер по снижению аварийности.

Стандартные категории рисков, рассматриваемые в традиционных моделях, включают человеческий фактор, технические неисправности транспортных средств, состояние дорожной инфраструктуры и погодные условия. Такая классификация позволяет выделить основные направления работ по повышению безопасности, но имеет ряд ограничений.

Одним из наиболее распространенных методов оценки рисков является анализ статистики ДТП [1]. Этот метод предполагает изучение данных о количестве, тяжести и обстоятельствах аварий на конкретных участках дорог или в определенных регионах. На основе этой информации рассчитываются различные показатели аварийности, такие как количество ДТП на 1000 автомобилей или на 1 км дороги, которые используются для оценки уровня риска.

Другой распространенный подход – метод конфликтных ситуаций [2]. Этот метод основан на наблюдении и анализе потенциально опасных ситуаций на дороге, которые не приводят к ДТП, но могут указывать на повышенный риск их возникновения. Преимущество данного метода заключается в возможности выявления опасных факторов до того, как произойдет реальное ДТП.

Можно назвать также концепцию «пирамиды безопасности», предложенную Хайнрихом для промышленной безопасности и адаптированную для дорожного движения [3]. Согласно этой концепции, на каждое серьезное ДТП приходится множество менее серьезных инцидентов и еще большее число потенциально опасных ситуаций. Анализ этой «пирамиды» позволяет выявлять и устранять факторы риска на ранних стадиях.

Для оценки безопасности дорог и выявления рисков, связанных с движением по ним, широко используется методика IRAP (International Road Assessment Programme)¹. Однако у нее есть несколько недостатков:

1. Ограниченная гибкость. Методика может не учитывать специфические особенности отдельных регионов или стран, что приводит к недостаточной точности в оценках для определенных условий.
2. Сложность и ресурсоемкость. Оценка по IRAP требует значительных временных и материальных ресурсов, что может ограничивать возможность ее применения в менее обеспеченных регионах.
3. Зависимость от данных. Эффективность методики зависит от качества и полноты данных о дорожном движении и авариях, что не всегда доступно.
4. Недостаток учета человеческого фактора. Методика может недостаточно фокусироваться на аспектах, связанных с поведением водителей и пешеходов, что является важным для комплексной оценки рисков.
5. Отсутствие универсальности. Разные типы дорог (городские, загородные, автомагистрали) могут требовать разных подходов, и методика IRAP может не учитывать их в полной мере.
6. Нехватка оперативности. Метод недостаточно быстро реагирует на изменения в дорожной обстановке или внедрение новых технологий, что может снижать его актуальность.

Эти недостатки ограничивают эффективность IRAP в некоторых ситуациях и требуют дополнительных методов и подходов для комплексной оценки дорожной безопасности.

Традиционные подходы не всегда хорошо применимы и имеют ряд ограничений, особенно в контексте современных автомобильных дорог. Во-первых, они часто не учитывают динамику транспортных потоков, которая может существенно меняться в зависимости от времени суток, дня недели или сезона. Во-вторых, на автомобильных дорогах наблюдается более высокая средняя скорость движения, что увеличивает тяжесть последствий ДТП и требует особого внимания к факторам, влияющим на скоростной режим.

Кроме того, традиционные модели часто не учитывают такую специфику автомобильных дорог, как низкая плотность пешеходов и велосипедистов, ограниченное освещение, возможность появления диких животных на дороге. Эти факторы могут существенно влиять на уровень риска, но не всегда адекватно отражаются в стандартных классификациях.

Еще одним ограничением является недостаточный учет влияния современных технологий как в автомобилях, так и в дорожной инфраструктуре. Системы помощи водителю – автоматическое торможение, адаптивный круиз-контроль, удержание полосы – могут существенно влиять на поведение водителей и уровень риска, но не находят отражения в традиционных моделях оценки.

Таким образом, несмотря на значительный вклад традиционных моделей в понимание рисков на дорогах, современные условия требуют разработки новых подходов к оценке и управлению рисками.

Учитывая ограничения традиционных подходов к оценке рисков, возникает необходимость в разработке новой, более комплексной и адаптивной классификации. Предлагаемая классификация рисков призвана учесть динамический характер современных транспортных систем, особенности автомобильных дорог и влияние новых технологий на безопасность дорожного движения.

Новая методика классификации рисков основывается на многомерном подходе, учитывающем различные аспекты взаимодействия в системе ВАДС (рисунок 1).

Если говорить о предлагаемой классификации более подробно, следует пояснить следующее. К существенным рискам относятся факторы, которые непосредственно приводят к возникновению ДТП или значительно увеличивают их вероятность. Например, гололед на дороге или засыпание водителя за рулем. К значимым рискам относятся факторы, которые косвенно влияют на вероятность ДТП или увеличивают тяжесть их последствий. К ним можно отнести недостаточное освещение дороги или отсутствие барьерного ограждения. Второстепенные риски – это факторы, которые в обычных условиях оказывают минимальное влияние на безопасность движения, но могут стать существенными при определенных обстоятельствах. Например, легкий боковой ветер или небольшие неровности дорожного покрытия.

¹ For a world free of high-risk roads. [Electronic resource] – Mode of access: <https://irap.org/>. – Date of access: 08.11.2024.



Рисунок 1. – Многомерный подход к классификации рисков

Классификация по типам взаимодействия фокусируется на взаимодействиях между основными элементами дорожной системы. Риски взаимодействия «автомобиль–дорога» включают факторы, связанные с влиянием дорожной инфраструктуры на движение транспортных средств. Например, сцепление шин с дорожным покрытием или видимость дорожной разметки. Риски взаимодействия «водитель–среда» охватывают аспекты восприятия дороги водителем и его реакции на дорожные условия. Сюда можно отнести читаемость дорожных знаков или психологическое воздействие ландшафта на поведение водителя. Риски взаимодействия «автомобиль–водитель» включают факторы, связанные с управлением транспортным средством и использованием его систем. Например, эргономика салона или интерфейс бортовых систем помощи водителю.

Классификация по компонентам системы рассматривает риски в контексте четырех основных компонентов системы ВАДС. Особое внимание уделяется адаптивности системы к внешним условиям. Автомобильные факторы включают технические характеристики транспортных средств, их состояние и оснащение современными системами безопасности. Человеческие факторы охватывают физическое и психологическое состояние водителя, его навыки и опыт, а также поведенческие паттерны. Дорожные факторы включают все аспекты дорожной инфраструктуры – от качества покрытия до наличия и состояния защитных сооружений. Факторы среды охватывают погодные условия, время суток, сезонные изменения и другие внешние факторы.

Влияние каждой категории рисков на безопасность и аварийность предлагается оценивать с помощью комплексного индекса риска (CRI, Comprehensive Risk Index), который учитывает все три измерения классификации:

$$CRI = C_{\nu} * T_{\nu} * K_{\phi},$$

где C_{ν} – коэффициент степени воздействия;

T_{ν} – коэффициент типа взаимодействия;

K_{ϕ} – коэффициент компонента системы.

Предлагаемый комплексный индекс риска представляет собой мультипликативную модель, учитывающую три ключевых измерения оценки рисков: степень воздействия, тип взаимодействия и компонент системы. Мультипликативный характер модели обусловлен следующими соображениями.

1. Синергетический эффект факторов риска. Взаимодействие различных факторов риска носит нелинейный характер, при котором совместное влияние факторов может существенно превышать сумму их индивидуальных воздействий. Мультипликативная модель позволяет учесть этот синергетический эффект, т.к. произведение коэффициентов более точно отражает усиливающее взаимодействие факторов риска по сравнению с их простым суммированием.

2. Принцип критического звена. В системе безопасности дорожного движения действует принцип «критического звена», согласно которому общий уровень риска определяется наиболее слабым компонентом системы. Мультипликативная модель естественным образом реализует этот принцип: низкое значение любого из коэффициентов существенно снижает итоговый показатель CRI, что соответствует реальному влиянию критических факторов на безопасность движения.

3. Использование произведения коэффициентов находит подтверждение в теории вероятностей. Если рассматривать риск как вероятность неблагоприятного события, то при независимых событиях общая вероятность определяется произведением вероятностей отдельных событий. Хотя факторы риска в дорожном движении не являются полностью независимыми, мультипликативная модель позволяет более адекватно отразить их взаимосвязь по сравнению с аддитивной моделью.

Рассмотрим отдельные коэффициенты более детально.

Коэффициент степени воздействия (C_{σ}) изменяется в диапазоне от 0,1 до 1 и отражает интенсивность влияния фактора риска на безопасность движения. Значения, близкие к 1, соответствуют существенным рискам (например, гололед, засыпание водителя). Значения около 0,5 соответствуют значимым рискам (недостаточное освещение, отсутствие барьерного ограждения). Значения, близкие к 0,1, соответствуют второстепенным рискам (легкий боковой ветер, небольшие неровности).

Коэффициент типа взаимодействия (T_{θ}) также изменяется от 0,1 до 1. Коэффициент характеризует взаимодействие между элементами системы ВАДС и учитывает взаимодействие «автомобиль–дорога» (сцепление шин с покрытием), взаимодействие «водитель–среда» (восприятие дорожной обстановки) и взаимодействие «автомобиль–водитель» (эргономика управления).

Коэффициент компонента системы (K_{ϕ}) изменяется от 0,1 до 1 и отражает влияние конкретного компонента системы ВАДС: автомобильные факторы (техническое состояние ТС), человеческие факторы (опыт и состояние водителя), дорожные факторы (состояние инфраструктуры), факторы среды (погодные условия).

Значение нижней границы коэффициентов на уровне 0,1 позволяет сохранить достаточную чувствительность индекса даже при минимальных значениях коэффициентов, при этом не обнуляя полностью влияние фактора. Даже минимальное влияние фактора риска не может быть полностью проигнорировано в системе безопасности дорожного движения, поэтому нулевое значение нецелесообразно. Кроме того, диапазон от 0,1 до 1 (с шагом 0,1) создает удобную десятибалльную шкалу для экспертной оценки факторов риска, а сохранение минимального значения 0,1 позволяет учитывать кумулятивный эффект даже малозначительных факторов при их совместном влиянии.

Для определения коэффициентов комплексного индекса риска (CRI) можно предложить следующую методику.

1. Коэффициент степени воздействия (C_{σ}) определяется экспертным путем на основе статистических данных об аварийности, результатов моделирования дорожных ситуаций и анализа последствий ДТП. Процедура оценки может быть следующей:

- а) сбор исторических данных о ДТП на исследуемом участке;
- б) анализ причинно-следственных связей;
- в) оценка тяжести последствий;
- г) присвоение значения по шкале:
 - 0,8–1,0 – существенные риски (гололед, засыпание водителя);
 - 0,4–0,7 – значимые риски (недостаточное освещение);
 - 0,1–0,3 – второстепенные риски (легкий боковой ветер).

2. Коэффициент типа взаимодействия (T_{θ}) определяется на основе анализа характера взаимодействия элементов системы ВАДС, данных с датчиков и систем мониторинга и результатов моделирования. Процедура оценки в этом случае:

- а) идентификация типа взаимодействия;
- б) анализ интенсивности взаимодействия;
- в) оценка критичности взаимодействия;
- г) присвоение значения по шкале:
 - 0,8–1,0 – критическое взаимодействие;
 - 0,4–0,7 – значимое взаимодействие;
 - 0,1–0,3 – некритическое взаимодействие.

3. Коэффициент компонента системы (K_{ϕ}) определяется путем анализа технического состояния компонентов, результатов инструментальных обследований, данных мониторинга. Процедура оценки:

- а) оценка состояния компонента;
- б) анализ его влияния на безопасность;
- в) учет условий эксплуатации;
- г) присвоение значения по шкале:
 - 0,8–1,0 – критическое состояние/влияние;
 - 0,4–0,7 – удовлетворительное состояние;
 - 0,1–0,3 – хорошее состояние.

Предложенная классификация позволяет более точно оценивать и прогнозировать риски на автомобильных дорогах, учитывая их специфику и современные технологические факторы. Она создает основу для разработки более эффективных стратегий управления рисками и повышения безопасности дорожного движения.

Важно отметить, что данная классификация достаточно гибкая и может быть адаптирована к конкретным условиям и задачам. Например, при анализе рисков на определенном участке дороги можно добавить дополнительные параметры, такие как интенсивность движения или наличие опасных поворотов.

Применение этой классификации в сочетании с современными методами сбора и анализа данных, включая использование ИТС, открывает новые возможности для повышения безопасности на загородных дорогах.

Дорожная инфраструктура играет фундаментальную роль в обеспечении безопасности движения, а инфраструктурные риски являются одним из важнейших факторов, влияющих на аварийность. Исследования показывают, что около 30% всех ДТП так или иначе связаны с недостатками дорожной инфраструктуры [4; 5].

Рассмотрим основные категории инфраструктурных рисков и их влияние на безопасность движения.

1. Качество дорожного покрытия. Состояние дорожного покрытия напрямую влияет на управляемость транспортного средства и, следовательно, на безопасность движения. Неровности, выбоины, колейность могут привести к потере контроля над автомобилем, особенно при высоких скоростях, характерных для загородных дорог [6]. Кроме того, качество покрытия влияет на сцепление шин с дорогой, что особенно важно при торможении и маневрировании.

Для оценки влияния качества дорожного покрытия на безопасность движения в условиях Республики Беларусь может быть использован международный индекс ровности (IRI), являющийся интегральным показателем состояния покрытия. В настоящее время существует достаточное количество исследований влияния ровности покрытия на безопасность движения, однако для условий нашей страны подобные исследования не проводились и вопрос требует дополнительного изучения.

2. Обочины, барьерные ограждения и разделительные полосы.

Отсутствие или неудовлетворительное состояние обочин (рисунок 2), барьеров и разделительных полос значительно увеличивает риск серьезных ДТП на автомобильных дорогах, в т.ч. таких видов происшествий, как опрокидывание². Исследования показывают, что наличие укрепленных обочин может снизить количество ДТП на 5–10% [7]. Разделительные барьеры на дорогах с одной проезжей частью могут уменьшить количество лобовых столкновений на 65–80% [8].



Рисунок 2. – Неудовлетворительное состояние обочины может способствовать ДТП

3. Разметка и дорожные знаки. Четкая и хорошо видимая разметка, а также правильно расположенные и легко читаемые дорожные знаки играют решающую роль в информировании водителей об условиях движения и потенциальных опасностях. Исследования показывают, что улучшение видимости разметки может снизить количество ДТП на 10–20% [9].

4. Освещение. Недостаточное освещение на загородных дорогах значительно повышает риск ДТП, особенно в темное время суток. Установка качественного освещения может снизить количество ночных ДТП на 30–50% [10; 11].

² Справочник по безопасности дорожного движения: справ. пособие. – М.: Росавтодор, 2010. – 384 с.

5. Средства сдерживания скорости. Неадекватные средства сдерживания скорости на опасных участках загородных дорог могут привести к серьезным ДТП. Применение таких мер, как шумовые полосы, сужение полос движения или установка камер контроля скорости, может снизить количество ДТП, связанных с превышением скорости, на 20–30% [12].

Для снижения инфраструктурных рисков можно предложить следующие меры:

- регулярный мониторинг и своевременный ремонт дорожного покрытия с использованием современных материалов и технологий;
- внедрение интеллектуальных транспортных систем для мониторинга состояния дорог и транспортных потоков в реальном времени;
- использование адаптивных систем освещения, которые автоматически регулируют интенсивность в зависимости от условий видимости и наличия транспортных средств;
- применение дорожных знаков переменной информации, изменяющих отображаемую информацию в зависимости от дорожной ситуации.

Внедрение этих мер в сочетании с использованием предложенной классификации рисков позволит существенно повысить безопасность движения на автомобильных дорогах. Однако важно отметить, что эффективное управление инфраструктурными рисками требует комплексного подхода, учитывающего взаимодействие всех элементов системы ВАДС.

Развитие инновационных технологий открывает новые возможности для повышения безопасности движения на автомобильных дорогах. Интеллектуальные транспортные системы играют все более значимую роль в управлении дорожным движением и предотвращении аварийных ситуаций. Применение ИТС на автомобильных дорогах имеет свою специфику, связанную с особенностями инфраструктуры и характера движения.

Одним из ключевых направлений применения ИТС является использование автоматизированных систем управления движением для мониторинга и прогнозирования аварийных ситуаций. Такие системы могут включать в себя датчики, камеры видеонаблюдения, метеостанции и другие устройства, собирающие данные о дорожной обстановке в режиме реального времени. Анализ этих данных с помощью алгоритмов машинного обучения позволяет выявлять потенциально опасные ситуации и предпринимать превентивные меры [13].

Интеллектуальные системы сдерживания скорости также демонстрируют высокую эффективность в повышении безопасности на загородных дорогах. К таким системам можно отнести:

- адаптивные камеры контроля скорости, способные автоматически корректировать допустимый скоростной режим в зависимости от дорожных и погодных условий;
- адаптивные дорожные знаки, отображающие информацию о рекомендуемой скорости движения с учетом текущей дорожной обстановки. Исследования показывают, что внедрение таких систем может снизить количество ДТП, связанных с превышением скорости, на 20–30% [14].

Инновационные решения для снижения инфраструктурных рисков также включают в себя:

1. «Умные» покрытия дорог, способные собирать и передавать информацию о своем состоянии и дорожных условиях. Например, покрытия с встроенными сенсорами могут детектировать образование льда или появление трещин, передавая эту информацию в центр управления дорожным движением и непосредственно водителям через системы автомобильной коммуникации.

2. Экосистемы «зеленых» дорог, использующие экологические технологии для создания устойчивой инфраструктуры. Такие решения могут включать в себя системы отвода и очистки дождевой воды, снижающие риск аквапланирования, или специальные покрытия, поглощающие вредные выбросы и снижающие уровень шума [15].

3. Технологии «дорожных цифровых двойников», позволяющие создавать виртуальные модели дорог для симуляции и анализа потенциально опасных участков. Эти технологии дают возможность проводить виртуальные испытания различных сценариев движения и оценивать эффективность предлагаемых мер по повышению безопасности [16].

Особое внимание следует уделить интеграции систем автомобильной коммуникации (V2X – Vehicle-to-Everything) с дорожной инфраструктурой. Эти системы позволяют автомобилям обмениваться информацией друг с другом и с объектами дорожной инфраструктуры, что существенно повышает ситуационную осведомленность водителей и позволяет предотвращать потенциально опасные ситуации [17].

Важно отметить, что эффективное внедрение инновационных технологий требует комплексного подхода, учитывающего взаимодействие всех элементов системы ВАДС. Кроме того, необходимо учитывать возможные риски, связанные с внедрением новых технологий, такие как кибербезопасность и надежность систем в различных условиях эксплуатации. Можно сделать вывод, что инновационные технологии открывают широкие возможности для повышения безопасности движения на автомобильных дорогах. Однако их эффективное применение требует тщательного планирования, учета местных условий и постоянного мониторинга результатов внедрения.

В эпоху цифровизации информационные технологии и умные системы становятся ключевыми инструментами в управлении рисками на автомобильных дорогах. Эти технологии позволяют не только собирать

и анализировать огромные массивы данных, но и принимать оперативные решения на их основе, что существенно повышает эффективность мер по обеспечению безопасности дорожного движения.

Развитие информационных технологий для управления дорожными потоками и предсказания рисков идет по нескольким ключевым направлениям:

1. Большие данные (Big Data) и аналитика: современные системы способны обрабатывать огромные объемы данных из различных источников, включая датчики на дорогах, метеостанции, GPS-треки автомобилей [18] и даже социальные сети. Анализ этих данных с помощью алгоритмов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности и прогнозировать потенциально опасные ситуации [13].

2. Искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение: ИИ-системы могут анализировать сложные взаимосвязи между различными факторами риска и предлагать оптимальные решения для их минимизации. Например, ИИ может оптимизировать режимы работы светофоров или рекомендовать оптимальные маршруты для снижения загруженности дорог.

3. Интернет вещей (IoT): сеть взаимосвязанных устройств на дорогах и в автомобилях позволяет собирать данные в режиме реального времени и мгновенно реагировать на изменения дорожной обстановки [19].

Интеграция данных об инфраструктуре, движении транспортных средств, метеоусловиях и операциях дорожных служб в единую систему управления рисками является ключевым фактором повышения безопасности на загородных дорогах. Такая интеграция позволяет создать целостную картину дорожной обстановки и принимать более обоснованные решения.

Влияние автоматизированных и интеллектуальных систем на предоставление водителям оперативной информации о дорожных условиях в реальном времени трудно переоценить. Эти системы позволяют:

- оперативно информировать водителей о изменениях дорожной обстановки через различные каналы связи (бортовые компьютеры автомобилей, мобильные приложения, дорожные информационные табло);
- персонализировать информацию с учетом маршрута движения конкретного автомобиля и предпочтений водителя;
- автоматически адаптировать режимы движения автомобилей (например, ограничивать скорость) в соответствии с текущими дорожными условиями.

Одним из перспективных направлений является разработка систем прогнозирования рисков на основе комплексного анализа данных. Важно отметить, что эффективное использование информационных технологий и «умных» систем в управлении рисками требует создания соответствующей инфраструктуры и стандартов обмена данными. Необходимо обеспечить совместимость различных систем и устройств, а также гарантировать безопасность и конфиденциальность передаваемых данных.

Кроме того, внедрение новых технологий должно сопровождаться соответствующей подготовкой персонала дорожных служб и образовательными программами для водителей. Это позволит максимально эффективно использовать возможности новых систем и минимизировать риски, связанные с человеческим фактором.

Применение информационных технологий и «умных» систем открывает новые горизонты в управлении рисками на автомобильных дорогах. Эти технологии позволяют создать более адаптивную, «прощающую» дорожную среду. Однако их эффективное внедрение требует комплексного подхода, учитывающего технологические, инфраструктурные и человеческие факторы.

Безопасность дорожного движения на загородных дорогах имеет широкий спектр последствий, выходящих за рамки непосредственного предотвращения аварий.

Экономические и социальные потери, связанные с дорожно-транспортными происшествиями (ДТП) на автомобильных дорогах, представляют собой значительное бремя для общества. Согласно исследованиям Всемирной организации здравоохранения, ежегодные глобальные экономические потери от ДТП оцениваются примерно в 3% мирового ВВП³. Для развитых стран эта цифра может достигать 1–2% национального ВВП [20].

К экономическим потерям относят:

- 1) прямые медицинские расходы на лечение пострадавших;
- 2) потери производительности труда из-за временной или постоянной нетрудоспособности;
- 3) материальный ущерб от повреждения транспортных средств и инфраструктуры;
- 4) расходы на работу экстренных служб и ликвидацию последствий ДТП.

Социальные последствия ДТП также весьма значительны. Это не только физические и психологические травмы непосредственных участников аварий, но и влияние на их семьи и ближайшее окружение. Потеря трудоспособности или смерть кормильца может привести к долгосрочным негативным последствиям для целых семей.

Влияние на экологию также является важным аспектом безопасности дорожного движения. ДТП и связанные с ними заторы приводят к увеличению выбросов CO₂ и других загрязняющих веществ. Исследования показывают, что заторы, вызванные авариями, могут увеличивать выбросы CO₂ на 2–3% в масштабах страны

³ Global status report on road safety 2018 [Electronic resource] / World Health Organization. – 17 June 2018. – Mode of access: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>. – Date of access: 08.11.2024/

[21]. Кроме того, аварии с участием транспортных средств, перевозящих опасные грузы, могут привести к серьезным экологическим последствиям.

Социальные аспекты безопасности инфраструктуры включают уровень доверия граждан к качеству дорог и влияние на развитие регионов. Низкий уровень безопасности дорог может негативно влиять на мобильность населения, экономическую активность и качество жизни в целом. С другой стороны, улучшение дорожной инфраструктуры и повышение безопасности движения могут стать катализатором регионального развития, способствуя экономическому росту и социальному благополучию.

Прогнозируемый эффект от внедрения инновационных решений, систем управления и интеллектуальных транспортных технологий на безопасность движения весьма значителен. По оценкам экспертов, комплексное внедрение современных технологий может снизить количество ДТП на 20–30% в течение 5–10 лет [22]. Это соответствует сохранению сотен тысяч жизней и экономии миллиардов долларов ежегодно в глобальном масштабе.

Ожидаемые эффекты от внедрения инновационных решений:

1. Снижение количества и тяжести ДТП благодаря более эффективному управлению дорожным движением и предотвращению аварийных ситуаций.
2. Уменьшение экономических потерь за счет сокращения времени простоя дорог и снижения расходов на ликвидацию последствий аварий.
3. Улучшение экологической ситуации благодаря оптимизации транспортных потоков и снижению числа заторов.
4. Повышение мобильности населения и стимулирование экономического развития регионов.

Достижение максимального эффекта от внедрения инновационных решений требует комплексного подхода, включающего не только технологические улучшения, но и совершенствование нормативно-правовой базы, образовательные программы для водителей и повышение культуры вождения в целом. Повышение безопасности на автомобильных дорогах имеет широкий спектр положительных социальных, экологических и экономических эффектов. Внедрение инновационных технологий и систем управления рисками представляет собой не только способ сохранения жизней, но и важный фактор устойчивого развития общества в целом.

Заключение. В результате проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

- Предложена многомерная классификация рисков для автомобильных дорог, основанная на системе ВАДС (Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда), которая учитывает степень воздействия факторов риска; типы взаимодействия между элементами системы; компоненты транспортной системы.
- Предложен комплексный индекс риска (CRI), позволяющий количественно оценивать уровень опасности на основе трех ключевых коэффициентов: коэффициента степени воздействия ($C\psi$); коэффициента типа взаимодействия ($T\psi$); коэффициента компонента системы ($K\psi$).
- Показано, что внедрение современных интеллектуальных транспортных систем (ИТС) может снизить количество ДТП на 20–30% за счет оперативного мониторинга дорожной обстановки; предупреждения водителей об опасных ситуациях; автоматизированного управления дорожным движением.
- Экономические потери от ДТП составляют 1–2% ВВП в развитых странах, что подчеркивает важность внедрения инновационных решений для повышения безопасности дорожного движения.
- Определено, что эффективное управление рисками требует комплексного подхода, включающего: модернизацию дорожной инфраструктуры; внедрение современных технологий мониторинга; совершенствование нормативно-правовой базы; повышение культуры вождения.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенной классификации и методики оценки рисков для принятия обоснованных решений по повышению безопасности движения на загородных автомобильных дорогах. Дальнейшие исследования могут быть направлены на детализацию методик определения коэффициентов риска и разработку специализированного программного обеспечения для автоматизации процесса оценки рисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В., Скирковский С.В. Аварийность в дорожном движении: учеб. метод. пособие. – Гомель: БелГУТ, 2024. – 168 с.
2. Капский Д.В., Волюнец А.С. Анализ применимости методов прогнозирования и оценки аварийности на конфликтных объектах транспортной сети и перспективы их развития // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 38–48.
3. Heinrich H. W. Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach. – Second Ed. – McGraw-Hill book Company, Inc., 1941. – 448 с.
4. Tri-level study of the causes of traffic accidents: final report [Electronic resource] / J.R. Treat, N.S. Tumbas, S.T. McDonald et al. – Vol. I: Causal factor tabulations and assessments. – 1977. – Mode of access: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/64993>. – Date of access: 08.11.2024.
5. Рунэ Эльвик, Боргер Мюсен Аннэ, Во Трюле. Справочник по безопасности дорожного движения: [пер. с норв.] / под ред. проф. В. В. Сильянова. – М.: МАДИ (ГТУ), 2001. – 754 с.
6. Incorporating road safety into pavement management / S. Tighe, N. Li, L.C. Falls at al. // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2000. – Vol. 1699, Iss. 1. DOI: 10.3141/1699-01

7. Zegeer C.V., Council F.M. Safety relationships associated with cross-sectional roadway elements // *Transportation Research Record*. – 1995. – Iss. 1512. – P. 29–36. Mode of access: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1512/1512-005.pdf>. – Date of access: 08.11.2024
8. Elvik R. The safety value of guardrails and crash cushions: a meta-analysis of evidence from evaluation studies // *Accident Analysis & Prevention*. – 1995. – Vol. 27, Iss. 4. – P. 523–549. DOI: 10.1016/0001-4575(95)00003-I
9. Carlson P.J., Park E.S., Andersen C.K. Benefits of pavement markings: A renewed perspective based on recent and ongoing research // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2000. – Vol. 2107, Iss. 1. DOI: 10.3141/2107-06
10. Wanvik P.O. Effects of road lighting: an analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006 // *Accident Analysis & Prevention*. – 2009. – Vol. 41, Iss. 1. – P. 123–128. DOI: 10.1016/j.aap.2008.10.003
11. Bullough J.D., Donnell E.T., Rea M.S. To illuminate or not to illuminate: Roadway lighting as it affects traffic safety at intersections // *Accident Analysis & Prevention*. – 2013. – Vol. 53, Iss. 1. – P. 65–77. DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.029
12. Mountain L.J., Hirst W.M., Maher M.J. Are speed enforcement cameras more effective than other speed management measures? The impact of speed management schemes on 30 mph roads // *Accident Analysis & Prevention*. – 2005. – № 37(4). – P. 742–54. DOI:10.1016/j.aap.2005.03.017
13. Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach / Y. Lv, Y. Duan, W. Kang et al. // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2015. – Vol. 16, Iss. 2. – P. 865–873. DOI: 10.1109/TITS.2014.2345663
14. Høyе A. Speed cameras, section control, and kangaroo jumps—a meta-analysis // *Accident Analysis & Prevention*. – 2014. – Vol. 73. – P. 200–208. DOI:10.1016/j.aap.2014.09.001
15. Santero N.J., Masanet E., Horvath A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2011. – Vol. 55, Iss. 9–10. – P. 801–809. DOI:10.1016/j.resconrec.2011.03.010
16. Building digital twins of existing highways using map data based on engineering expertise / F. Jiang, L. Ma, T. Broyd et al. // *Automation in Construction*. – 2022. – Vol. 134. – P. 104081. DOI:10.1016/j.autcon.2021.104081
17. Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe: Current Deployment Status and Outlook / K. Sjöberg, P. Andres, T. Buburuzan et al. // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. – 2017. – Vol. 12, Iss. 2. – P. 89–97. DOI: 10.1109/MVT.2017.2670018
18. Транспортное моделирование и оценка условий дорожного движения с использованием навигационной информации / Д.В. Капский, В.В. Касьяник, О.А. Капцевич и др. – Минск: Капитал Принт, 2019. – 144 с.
19. Богданович С.В. Концепция создания транспортной информационно-сервисной платформы на основе технологии интернета вещей // *Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. В 2 т.* – Минск: БНТУ, 2022. – Т. 2. – С. 117–120.
20. Wijnen W., Stipdonk H. Social costs of road crashes: An international analysis // *Accident Analysis & Prevention*. – 2016. – Vol. 94. – P. 97–106. DOI: 10.1016/j.aap. 2016.05.005
21. Barth M., Boriboonsomsin K. Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2008. – No. 2058. – P. 163– 171. DOI: 10.3141/2058-20
22. Inter-national benchmarking of road safety: State of the art / Yongjun Shen, , Elke Hermans, Qiong Bao et al. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2015. – Vol. 50. – P. 37–50. DOI: 10.1016/j.trc.2014.07.006

REFERENCES

1. Kapskii, D.V. & Skirkovskii, S.V. (2024). *Avariinost' v dorozhnom dvizhenii*. Gomel': BelGUT. (In Russ.).
2. Kapskii, D.V. & Volynets, A.S. (2023). Analiz primenimosti metodov prognozirovaniya i otsenki avariinosti na konfliktnykh ob"ektakh transportnoi seti i perspektivy ikh razvitiya [Analysis of the Applicability of Methods for Predicting and Assessing Accidents at Conflict Sites in the Transportation Network and Prospects for their Development]. In *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii*: sb. nauch. st. (38–48). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Heinrich, H. W. (1941). *Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach*. – Second Ed. McGraw-Hill book Company, Inc.
4. Treat, J.R., Tumbas, N.S., McDonald, S.T., Shinar, D., Hume, R.D., Mayer, R.E., ... Castellán, N.J. (1977). *Tri-level study of the causes of traffic accidents: final report. Vol. I: Causal factor tabulations and assessments* [Electronic resource]. Mode of access: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/64993>. – Date of access: 08.11.2024.
5. Rune, El'vik, Borger, Myusen Anne & Vo, Tryule. (2001). *Spravochnik po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya*. Moscow: MADI (GTU). (In Russ., transl. from Norwegian).
6. Tighe, S., Li, N., Falls, L.C. & Haas, R. (2000). Incorporating road safety into pavement management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1699(1). DOI: 10.3141/1699-01
7. Zegeer, C.V. & Council, F.M. (1995). Safety relationships associated with cross-sectional roadway elements. *Transportation Research Record*, (1512), 29–36. Mode of access: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1512/1512-005.pdf>. – Date of access: 08.11.2024
8. Elvik, R. (1995). The safety value of guardrails and crash cushions: a meta-analysis of evidence from evaluation studies. *Accident Analysis & Prevention*, 27(4), 523–549. DOI: 10.1016/0001-4575(95)00003-I
9. Carlson, P.J., Park, E.S. & Andersen, C.K. (2000). Benefits of pavement markings: A renewed perspective based on recent and ongoing research. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2107(1). Iss. 1. DOI: 10.3141/2107-06
10. Wanvik, P.O. (2009). Effects of road lighting: an analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1), 123–128. DOI: 10.1016/j.aap.2008.10.003
11. Bullough, J.D., Donnell, E.T. & Rea, M.S. (2013). To illuminate or not to illuminate: Roadway lighting as it affects traffic safety at intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 53(1), 65–77. DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.029

12. Mountain, L.J., Hirst, W.M. & Maher, M.J. (2005). Are speed enforcement cameras more effective than other speed management measures? The impact of speed management schemes on 30 mph roads. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 742–54. DOI:10.1016/j.aap.2005.03.017
13. Lv, Y., Duan, Y., Kang, W., Li, Z. & Wang, F.Y. (2015). Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 865–873. DOI: 10.1109/TITS.2014.2345663
14. Høyе, A. (2014). Speed cameras, section control, and kangaroo jumps—a meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, (73), 200–208. DOI:10.1016/j.aap.2014.09.001
15. Santero, N.J., Masanet, E. & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. DOI:10.1016/j.resconrec.2011.03.010
16. Jiang, F., Ma, L., Broyd, T., Chen, W. & Luo, H. (2022). Building digital twins of existing highways using map data based on engineering expertise. *Automation in Construction*, (134), 104081. DOI:10.1016/j.autcon.2021.104081
17. Sjöberg, K., Andres, P., Buburuzan, T. & Brakemeier, A. (2017). Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe: Current Deployment Status and Outlook. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(2), 89–97. DOI: 10.1109/MVT.2017.2670018
18. Kapskii, D.V., Kas'yanik, V.V., Kaptsevich, O.A., Mozalevskii D.V., Poznyak A.S., Katkov, A.V., ... Volynets, A.F. (2019). *Transportnoe modelirovanie i otsenka uslovii dorozhnogo dvizheniya s ispol'zovaniem navigatsionnoi informatsii*. Minsk: Kapital Print. (In Russ.).
19. Bogdanovich, S.V. (2022). Kontseptsiya sozdaniya transportnoi informatsionno-servisnoi platformy na osnove tekhnologii in-terneta veshchei. *Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyi transport: sb. nauch. tr., V 2 t. T. 2*, 117–120. Minsk: BNTU. (In Russ.).
20. Wijnen, W. & Stipdonk, H. (2016). Social costs of road crashes: An international analysis. *Accident Analysis & Prevention*, (94), 97–106. DOI: 10.1016/j.aap.2016.05.005
21. Barth, M. & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2058), 163–171. DOI: 10.3141/2058-20
22. Shen, Y., Hermans, E., Bao, Q., Brijs, T., Wets, G. & Wang, W. (2015). Inter-national benchmarking of road safety: State of the art. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, (50), (37–50). DOI: 10.1016/j.trc.2014.07.006

Поступила 18.11.2024

IMPACT OF ROAD AND INTELLIGENT TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE ON TRAFFIC SAFETY: NEW APPROACHES TO RISK CLASSIFICATION

D. KAPSKI

(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk)

S. BOGDANOVICH, M. BUROVA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents a new approach to the classification and assessment of risks on suburban highways based on the multidimensional analysis of the Driver-Automobile-Road-Environment (DARS) system. The methodology of risk assessment using a comprehensive index (CRI), which takes into account the degree of impact of factors, types of interaction between system elements and components of the transportation system, is developed. Special attention is paid to the role of road infrastructure and the capabilities of intelligent transportation systems (ITS) in risk management. Innovative solutions to improve traffic safety are proposed, including the use of “smart” pavements, vehicular communication systems (V2X) and “road digital twin” technologies. It is shown that the complex introduction of modern technologies can reduce the number of traffic accidents by 20-30% within 5-10 years. The analysis of socio-economic effects from the implementation of the proposed solutions is presented.

Keywords: road safety, risk classification, road infrastructure, intelligent transportation systems, comprehensive risk index.