

## ТРАНСПОРТ

УДК [331.101.1:656.13]+004.8

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-18-25

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ ОШИБОК  
В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ  
ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ В ПРЕДИКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ***канд. техн. наук, доц. С.В. БОГДАНОВИЧ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)**канд. техн. наук, доц. П.И. БАЛТРУКОВИЧ**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

Рассмотрены современные методы моделирования человеческих ошибок операторов центров управления дорожным движением с целью их последующей интеграции в предиктивные системы безопасности транспортной инфраструктуры. Разработана комплексная трехуровневая аналитическая модель, органично сочетающая качественные и количественные методы оценки, включая детализированные PSF-профили, которые дают возможность оценивать влияние ключевых факторов: степени усталости оператора, уровня когнитивной нагрузки, эргономики рабочих мест и качества визуальных интерфейсов, на вероятность возникновения ошибок оператора. Особое внимание уделено междисциплинарному подходу, объединяющему методы транспортного планирования, когнитивной психологии, искусственного интеллекта и эргономики. Предложены практические механизмы интеграции модели в интеллектуальные транспортные системы. Среди них динамическая корректировка прогнозных алгоритмов с учетом реальных значений вероятности ошибок оператора и автоматизация превентивных управляющих воздействий. Проведенные исследования демонстрируют, что систематический учет человеческого фактора позволяет существенно повысить точность и надежность предиктивных систем безопасности, снижая количество ДТП.

**Ключевые слова:** человеческий фактор, PSF-профили, предиктивные системы, безопасность дорожного движения, вероятность ошибки оператора, интеллектуальные транспортные системы, когнитивная эргономика, искусственный интеллект.

**Введение.** Несмотря на предпринимаемые меры по повышению безопасности дорожного движения, количество ДТП остается на высоком уровне [1–3]. Ежегодно в мире погибают почти 1,2 млн человек и 50 млн получают травмы. По оценкам, дорожно-транспортный травматизм является восьмой причиной смерти во всем мире и основной причиной смерти детей и молодых людей в возрасте от 15 до 29 лет, что в значительной степени затрагивает людей, вступающих в наиболее продуктивный возраст<sup>1</sup>. Эта статистика подчеркивает настоятельную необходимость разработки новых комплексных подходов к повышению безопасности дорожного движения, объединяющих достижения транспортного планирования, когнитивной психологии, искусственного интеллекта (ИИ) и эргономики. Развертывание и использование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) демонстрирует значительный потенциал в улучшении управления дорожным движением и повышении его безопасности [4]. Исследования показывают [5], что в населенных пунктах с камерами фиксации нарушений число погибших или получивших тяжелые травмы в ДТП ниже на 31–67%. Применение знаков, информирующих водителей о дорожной обстановке, привело к снижению числа ДТП с травмами в Великобритании на 28%, всех типов ДТП в Швейцарии на 35% и ДТП с материальным ущербом и травмами в Германии на 10–30%. При анализе результатов реализации федерального проекта Российской Федерации «Безопасные качественные дороги» установлено, что в Самарской области, благодаря в т.ч. и ИТС, удалось повысить безопасность дорожного движения. В 2024 г. по сравнению с 2020-м количество ДТП на дорогах агломерации сократилось на 9%, количество погибших снизилось на 19%, а пострадавших – на 9%<sup>2</sup>.

Однако, несмотря на возрастающую автоматизацию процессов мониторинга и управления дорожной инфраструктурой, человеческий фактор продолжает играть ключевую роль, особенно в критических ситуациях, требующих оперативного принятия решений [6; 7].

<sup>1</sup> Road Safety Performance Review – Uzbekistan [Electronic resource] / The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). – 2024. – <https://unece.org/info/publications/pub/391336> (дата обращения: 28.04.2025).

<sup>2</sup> Федеральный проект Российской Федерации «Безопасные качественные дороги». Развитие ИТС: 25 городских агломераций достигли первого уровня зрелости интеллектуальной транспортной системы [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://bkdrf.ru/news/read/razvitie-its-25-gorodskih-aglomeratsiy-dostigli-pervogo-urovnya-zrelosti-intellektualnoy-transportnoy-sistemy> (дата обращения: 02.05.2025).

В других высокорисковых отраслях, например, атомной энергетике, уже широко применяются методы анализа надежности человека (Human Reliability Analysis, HRA) [8] и вероятностного анализа безопасности (PSA) [9]. Данные методы позволяют системно и количественно оценивать влияние человеческого фактора на безопасность эксплуатации АЭС, выявлять критические сценарии и разрабатывать меры по снижению риска ошибок персонала, применяемых в атомной энергетике. Использование же адаптированных моделей, описывающих ошибки операторов центров управления дорожным движением (ЦУДД) с учетом специфики их задач и рабочих условий в сфере мониторинга и управления дорожной инфраструктурой, остается ограниченным.

*Целью данной работы* является разработка комплексной модели человеческих ошибок операторов ЦУДД, которая объединит качественные и количественные методы анализа с учетом достижений в области ИИ и когнитивных наук. Предлагаемый подход предусматривает не только создание теоретической модели, но и разработку практических механизмов ее интеграции в предиктивные системы безопасности дорожного движения, что даст возможность существенно снизить аварийность на транспорте за счет более точного учета человеческого фактора в процессах управления дорожной инфраструктурой.

**Основная часть.** Деятельность оператора ЦУДД представляет собой сложный многокомпонентный процесс, требующий постоянного взаимодействия с техническими системами, анализа поступающей информации и оперативного принятия решений. В этой связи для количественной оценки ошибок операторов находят применение методы HRA, среди которых наиболее распространены:

- THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) – использует базы данных частот ошибок для типовых операций [10];
- HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) – учитывает влияние «факторов формирования производительности» (Performance Shaping Factors, PSFs), таких, например, как стресс или качество обучения [11];
- SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis) – упрощенный метод, оценивающий вероятность ошибки на основе 8 PSFs [12];
- CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) – фокусируется на когнитивных механизмах ошибок, включая прогнозирование их последствий [8].

Эти методы, однако, требуют адаптации к задачам операторов ЦУДД, где определяющими PSFs могут быть:

- когнитивная нагрузка (число одновременно отслеживаемых событий);
- качество интерфейсов (удобство визуализации данных);
- временные ограничения (скорость реакции на инциденты).

В связи с изложенным с целью адаптации указанных методов к условиям работы ИТС разработана модель человеческих ошибок оператора ЦУДД, которая представляет собой трехуровневую систему, интегрирующую качественные и количественные методы анализа (рисунок).

Основные компоненты модели включают:

1. Базу знаний об ошибках – структурированный каталог типовых ошибок оператора с привязкой к конкретным задачам (мониторинг, управление), условиям выполнения (дневное / ночное время, нагрузка) и последствиям для безопасности.

2. PSF-профили – структурированные наборы параметров, которые количественно описывают факторы, влияющие на работоспособность и эффективность оператора в сложных системах.

Структура PSF-профиля складывается из следующих факторов:

- а) индивидуальные факторы:
  - уровень подготовки – оценивается по шкале от 0,7 (новичок) до 1,3 (высококвалифицированный специалист);
  - физическое состояние – включает показатели усталости (от 1,0 (начало смены) до 3,0 (конец ночной смены)) и стресса;
  - когнитивные способности – учитывает скорость реакции и объем внимания;
- б) факторы рабочей среды:
  - эргономика рабочего места – коэффициент от 0,8 (плохие условия) до 1,2 (оптимальная организация);
  - качество визуальной информации – зависит от разрешения видео, компоновки мониторов (0,7–1,3);
  - уровень шума и освещенности – нормализованный показатель условий труда.
3. Организационные факторы:
  - наличие регламентов – степень регламентированности процедур (0,9–1,1);
  - система подсказок – коэффициент поддержки принятия решений;
  - режим работы – учитывает график сменности и перерывы.
4. Факторы задачи:
  - сложность ситуации – показатель неоднозначности условий (1,0–2,5);
  - временные ограничения – коэффициент срочности реагирования;
  - частота возникновения – учет типичности/уникальности ситуации.

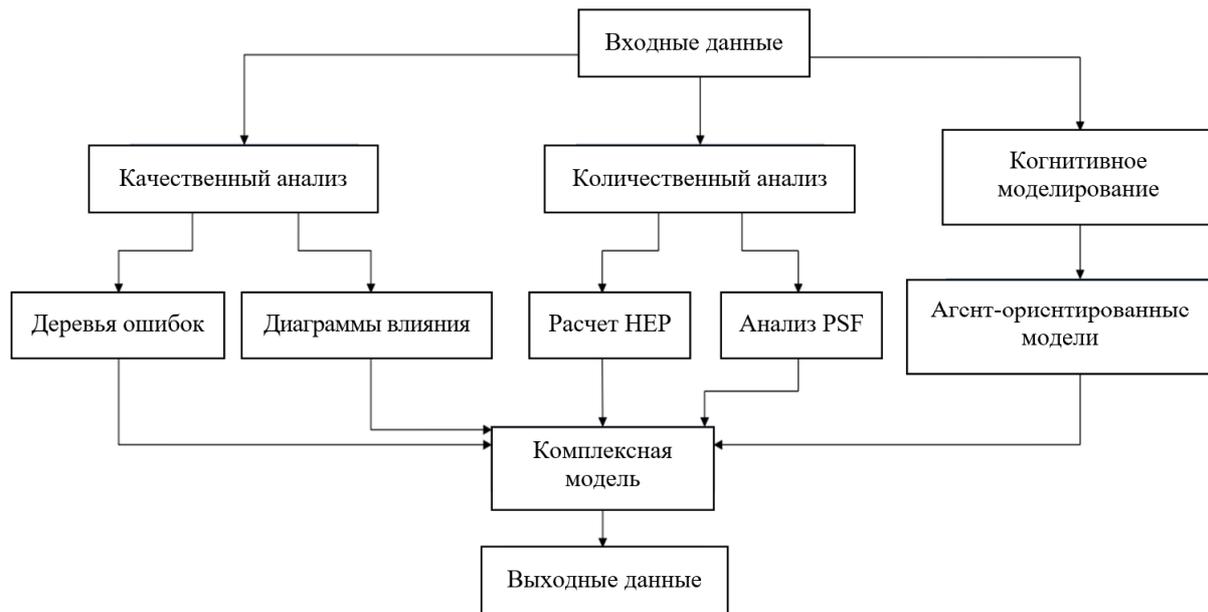


Рисунок. – Модель человеческих ошибок оператора ЦУДД

Каждый фактор в профиле имеет:

- базовое значение (1,0) – нейтральное влияние;
- диапазон модификации (обычно 0,5–3,0) – степень усиления/ослабления эффекта;
- весовой коэффициент – значимость фактора для конкретного типа задач.

Для расчета комплексного влияния можно применить модифицированную версию метода SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis), используемую для расчета вероятности ошибки оператора (Human Error Probability, HEP) с учетом влияния различных факторов среды и состояния человека:

$$HEP = BHEP \times (PSF_{fatigue} \times PSF_{workload} \times PSF_{interface} \times \dots \times PSF_n),$$

где BHEP (Basic Human Error Probability) – базовая вероятность ошибки (без учета внешних факторов); PSF<sub>fatigue</sub> – усталость; PSF<sub>workload</sub> – нагрузка; PSF<sub>interface</sub> – качество интерфейса; PSF<sub>n</sub> – n-параметр.

Рассмотрим применение модели для конкретной задачи: «Своевременное обнаружение ДТП по видеопотоку в условиях ограниченной видимости». Результаты расчета вероятности ошибки оператора с учетом выбранных основных влияющих факторов (операндов) представлены в таблице.

Таблица. – Результаты расчета итоговой вероятности ошибки при обнаружении ДТП по видеопотоку

Этап задачи	Основные влияющие факторы	BHEP	HEP
Сканирование	Усталость (1,8) Видимость (0,6)	0,05	0,05
Выявление	Нагрузка (1,5) Интерфейс (1,1)	0,10	0,17
Верификация	Уровень подготовки (1,1) Стресс (1,3)	0,15	0,22
Реагирование	Процедуры (0,9) Поддержка (1,0)	0,07	0,06

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что наиболее уязвимым этапом является верификация события (HEP = 0,22). Это объясняется необходимостью опыта оператора ЦУДД для распознавания ДТП в условиях ограниченной видимости, а также наличием значительного эмоционального и физического напряжения как реакции организма оператора на воздействие неблагоприятных факторов.

Модель генерирует три типа выходных данных:

1. Профили рисков – таблицы вероятностей ошибок для типовых сценариев.
2. Динамические показатели – изменение вероятностей ошибок в течение смены.
3. Рекомендации по снижению рисков при работе оператора ЦУДД:
  - оптимальная продолжительность непрерывного мониторинга – не более 2 ч;
  - критическое число одновременно отслеживаемых видеопотоков – 6–8;
  - приоритетность модернизации интерфейсов ночной смены.

Разработанная модель позволяет не только оценивать текущие риски, но и проводить анализ «что-если» для различных организационных и технических сценариев, что делает ее ценным инструментом для повышения безопасности дорожного движения.

Модель ошибок оператора ЦУДД, разработанная на стыке транспортного планирования, когнитивной психологии, ИИ и эргономики, может быть эффективно встроена в существующие предиктивные системы безопасности дорожного движения. Архитектура интеграции предусматривает три уровня взаимодействия:

1. Данные оператора (вход модели), где особое внимание уделяется:
  - текущим PSF-параметрам (усталость, когнитивная нагрузка);
  - характеристикам рабочей среды, анализируемым с позиций эргономики;
  - истории принятия решений, что представляет интерес для алгоритмов ИИ.
2. Модель ошибок (обработка):
  - расчет вероятностей ошибок для активных задач с использованием подходов когнитивной психологии;
  - оценка комплексного риска на основе транспортного планирования;
  - генерация сценариев развития с применением алгоритмов ИИ.
3. Предиктивная система (выход):
  - коррекция прогнозов безопасности с учетом эргономических факторов;
  - формирование превентивных мер на основе транспортной аналитики;
  - обратная связь для адаптации с элементами машинного обучения.

Интеграция разработанных моделей человеческих ошибок в существующие предиктивные системы безопасности требует реализации нескольких взаимодополняющих механизмов, каждый из которых решает специфические задачи повышения точности прогнозирования [13].

Перспективным направлением является использование вероятностей человеческих ошибок в качестве дополнительных признаков для алгоритмов машинного обучения [14]. В этом случае входной вектор данных  $X' = [X_{\text{traffic}}, X_{\text{weather}}, X_{\text{NEP}}]$  дополняется показателями, характеризующими текущее состояние оператора и вероятность ошибочных действий. Такой подход особенно эффективен для задач классификации рисков, где человеческий фактор традиционно учитывался лишь косвенно. Например, при прогнозировании вероятности ДТП на участке дороги система теперь может учитывать не только параметры транспортного потока и погодные условия, но и вероятность того, что оператор пропустит первые признаки развивающейся аварийной ситуации.

Альтернативный механизм предполагает использование NEP в качестве модификатора уровня риска. В этом случае после расчета базовой вероятности неблагоприятного события ( $R$ ) система корректирует итоговую оценку вероятности после учета влияния человеческого фактора ( $R'$ ) по формуле

$$R' = R \times (1 + \alpha \times \text{NEP}_{\text{task}}),$$

где коэффициент  $\alpha$  (обычно в диапазоне 0,2–0,5) определяет степень влияния человеческого фактора на конкретный тип риска.

Наиболее комплексный подход связан с генерацией превентивных сценариев на основе моделирования ошибок. Система выявляет критические сочетания факторов, такие как высокая когнитивная нагрузка оператора в условиях ухудшающейся видимости, и автоматически активирует дополнительные защитные механизмы. К ним относятся: увеличение частоты сканирования проблемных участков, предварительная настройка алгоритмов компьютерного зрения на обнаружение специфических типов инцидентов, автоматическая подготовка вариантов управляющих воздействий для оператора.

Особенностью предложенных механизмов является их способность работать в режиме реального времени, адаптируясь к изменяющимся условиям. Это достигается за счет непрерывного мониторинга PSF-параметров и динамического пересчета вероятностей ошибок при изменении рабочей обстановки в ЦУДД. Реализация таких механизмов требует тщательной калибровки и валидации, но обеспечивает принципиально новый уровень точности прогнозных моделей в ИТС.

Проведенное моделирование на стыке транспортного планирования, когнитивной психологии, ИИ и эргономики выявило важные закономерности в структуре человеческих ошибок операторов ЦУДД. Наибольшая вероятность ошибок (NEP 0,22–0,25) наблюдается в когнитивно сложных задачах, требующих:

- одновременной обработки множества визуальных сигналов;
- быстрого принятия решений в условиях неопределенности;
- интерпретации нечетких или противоречивых данных.

Особенно уязвимыми оказались ситуации:

- ночное время работы (коэффициент видимости 0,6–0,7);
- первые 30–40 мин после смены оператора;
- периоды одновременного возникновения нескольких инцидентов.

Полученные значения НЕР хорошо коррелируют с данными исследований в смежных областях (авиадиспетчерские службы – 0,15–0,30, железнодорожные диспетчеры – 0,10–0,25), что подтверждает адекватность модели.

Включение человеческого фактора в предиктивные системы открывает новые возможности и позволяет повысить точность прогнозов за счет учета дополнительного источника риска (ошибки оператора) и возможности прогнозировать каскадные события (пропуск инцидента → ДТП → затор). Также становится возможной динамическая адаптация систем путем автоматической коррекции интерфейсов при росте НЕР и перераспределения задач между операторами. Наконец, открывается возможность проактивного управления рисками, включая заблаговременное предупреждение о «критических часах», а также целевую подготовку операторов к сложным сценариям. Так, например, при прогнозируемом НЕР > 0,20 система может:

- активировать дополнительные алгоритмы детекции;
- увеличить частоту автоматических проверок;
- предложить временную поддержку второго оператора.

На основании результатов моделирования можно предложить ряд мер повышения надежности:

1) по оптимизации рабочих процессов:

- введение 15-минутных перерывов после каждые 2 ч непрерывного мониторинга;
- ротацию операторов между задачами разного типа;
- специальные протоколы для «критических периодов» (ночные смены, плохая видимость);

2) по улучшению интерфейсов:

- приоритетное отображение зон с высоким НЕР;
- автоматическую подсветку аномалий при усталости > 2.0;
- адаптивную компоновку мониторов в зависимости от нагрузки;

3) в подготовке персонала:

- тренировки на симуляторах с имитацией ошибок;
- когнитивные тренинги для сложных условий;
- систему наставничества для новых операторов;

4) организационные изменения:

- введение коэффициента НЕР в KPI (Key Performance Indicator, ключевой показатель эффективности работы центра);
- разработку «цифровых карт рисков» для различных смен;
- создание системы раннего оповещения при опасных сочетаниях факторов.

Все эти меры позволяют снизить базовую вероятность ошибок, что существенно влияет на общий уровень безопасности дорожного движения.

Несмотря на значительный потенциал предложенного подхода, исследование имеет несколько существенных ограничений. В первую очередь это дефицит эмпирических данных: отсутствие стандартизированных баз данных об ошибках операторов ЦУДД, сложность объективного измерения реальных показателей НЕР в рабочих условиях, ограниченная возможность валидации моделей на исторических событиях. Имеются методологические сложности, к которым относятся упрощение комплексных когнитивных процессов до дискретных вероятностей, статический характер большинства PSF-параметров (не учитывающий динамику изменения состояния), проблемы агрегирования индивидуальных различий между операторами. Имеют место достаточно сложные технические барьеры внедрения: необходимость модернизации существующих ИТС для интеграции PSF-моделей, отсутствие стандартов обмена данными между системами мониторинга операторов и предиктивными алгоритмами, вычислительная сложность работы в режиме реального времени. Наконец, следует принимать во внимание и организационные факторы: потенциальное сопротивление внедрению систем мониторинга ошибок со стороны персонала, этические вопросы, связанные с оценкой и прогнозированием человеческих ошибок, необходимость существенных изменений в корпоративной культуре безопасности.

Для преодоления названных ограничений и дальнейшего развития подхода целесообразны следующие направления научных исследований:

1) развитие методов сбора данных:

- разработка неинвазивных систем мониторинга состояния операторов (анализ движения глаз, физиологических показателей);
- создание специализированных симуляторов для генерации данных об ошибках;
- применение методов компьютерного зрения для автоматической фиксации действий оператора;

2) совершенствование моделей:

- разработка динамических PSF-моделей, учитывающих накопление усталости в течение смены, эффект обучения и адаптации, влияние командного взаимодействия;

- интеграция методов когнитивного моделирования с системами ИИ;
- создание персонализированных моделей для разных типов операторов;
- 3) прикладные исследования:
  - пилотные проекты внедрения в реальных ЦУДД;
  - сравнительный анализ эффективности различных методов HRA;
  - разработка стандартов оценки человеческого фактора в ИТС;
- 4) междисциплинарные исследования:
  - изучение нейрофизиологических основ принятия решений;
  - адаптация методов когнитивной эргономики для ЦУДД;
  - исследование организационных факторов, влияющих на надежность.

Перспективным направлением представляется создание цифровых двойников операторов, предоставляющих возможность проводить масштабное моделирование различных сценариев и условий работы. Особое внимание следует уделить этическим аспектам внедрения подобных систем и разработке механизмов защиты персональных данных операторов. Эти исследования помогут создать новое поколение интеллектуальных систем управления дорожным движением, в которых человеческий фактор будет не источником рисков, а важным компонентом системы безопасности.

**Заключение.** Проведенное исследование демонстрирует важность систематического учета человеческого фактора при проектировании современных ИТС. Разработанная методология моделирования ошибок операторов ЦУДД, объединяющая подходы транспортного планирования, когнитивной психологии, искусственного интеллекта и эргономики, создает основу для нового поколения предиктивных систем безопасности дорожного движения.

Основные результаты работы включают:

- разработку комплексной трехуровневой модели человеческих ошибок, интегрирующей качественные и количественные методы анализа;
- создание адаптированных PSF-профилей, учитывающих специфику задач операторов дорожного движения и параметры транспортных ситуаций;
- обоснование механизмов интеграции моделей ошибок в существующие предиктивные системы с использованием ИИ для динамической коррекции параметров ИТС;
- выявление наиболее уязвимых этапов в работе операторов (особенно в условиях ночного времени и высокой нагрузки).

Практическая значимость исследования заключается в возможности повышения точности прогнозирования ДТП за счет учета человеческого фактора, разработки конкретных рекомендаций по оптимизации рабочих процессов в ЦУДД, создания основы для интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием динамических моделей, учитывающих изменение когнитивного состояния оператора в реальном времени, созданием цифровых двойников для масштабного моделирования различных сценариев и разработкой этических стандартов использования подобных систем.

Внедрение предложенных решений позволит принципиально изменить подход к обеспечению безопасности дорожного движения, превратив человеческий фактор из источника рисков в управляемый компонент ИТС. Это особенно актуально в условиях роста сложности дорожной инфраструктуры и увеличения интенсивности транспортных потоков.

Исследование открывает новые направления для междисциплинарных работ на стыке транспортного моделирования и планирования, когнитивной психологии и ИИ, что может привести к созданию принципиально новых стандартов безопасности в управлении критически важной инфраструктурой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В., Богданович С.В., Чернюк А.Н. Анализ ошибок водителей как основной причины ДТП // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-1(88). – С. 100–110. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-100-110
2. Бакланова К.В. Влияние параметров транспортного потока и характеристик дорог на безопасность дорожного движения // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 2. – С. 99–110. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99-110
3. Гатиятуллин М.Х., Пекчёркин А.Г. Влияния транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги на аварийность на примере участка р-177 «Поветлужье» // Техника и технология транспорта. – 2022. – № 2(25). – С. 1–3.
4. Новикова И.И., Павлов Я.П. Мировые тенденции в развитии интеллектуальных транспортных систем // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2023. – № 9(103). – С. 152–155. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-9-152-155
5. Сырцова Е.А. Эффекты внедрения интеллектуальных транспортных систем в регионах России // Государственное управление. Электронный вестник. – 2023. – № 101. – С. 159–169. DOI: 10.24412/2070-1381-2023-101-159-169

6. Бажина М.А. Интеллектуальные транспортные системы – основа de lege ferenda транспортной системы Российской Федерации // *Journal of Digital Technologies and Law*. – 2023. – Т. 1, № 3. – С. 629–649. DOI: 10.21202/jdtl.2023.27
7. Ильина И.Е., Витвицкий Е.Е. Индексы для оценки уровня безопасности дорожного движения в регионах // *Вестн. СибАДИ*. – 2025. – Т. 22, № 1(101). – С. 68–77. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77
8. Hollnagel, E. *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. – Oxford: Elsevier. – 1998. – 287 p.
9. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАБ) / В.В. Бегун, О.В. Горбунов, И.Н. Коленко и др. – Киев: КПИ, 2000. – 568 с.
10. Swain A.D., Guttman H.E. *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. Final Report* // Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-1278. – Washington, 1983. – 728 p.
11. Stojiljkovic E., Bijelic B., Cvetkovic M. Application of Heart Technique for Human Reliability Assessment – a Serbian Experience // *Facta universitatis. Series: Working and Living Environmental Protection*. – 2017. – Vol. 14, No 3. – P. 187–196. DOI: 10.22190/FUWLEP1703187S
12. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method / D. Gertman, H. Blackman, J. Marble et al. // Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-6883. – Washington, 2005. – 230 p.
13. Полежаев М.Н., Финогеев А.А. Предиктивный анализ показателей критических событий с помощью рекуррентной нейронной сети с трансформером // *Современные наукоемкие технологии*. – 2024. – № 4. – С. 63–68. DOI: 10.17513/snt.39974
14. Enhancing road safety with machine learning: Current advances and future directions in accident prediction using non-visual data / A. B. Z. Chai, B. T. Lau, M. K. T. Tee et al. // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2024. – V. 137, Iss. P.A. DOI: 10.1016/J.ENGAPPAL.2024.109086

## REFERENCES

1. Kapskii, D.V., Bogdanovich, S.V. & Chernyuk, A.N. (2025). Analiz oshibok voditelei kak osnovnoi prichiny DTP [Czerniuk Analysis of driver errors as the primary cause of road traffic accidents]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin [World of transport and technological machines]*, 1-1(88), 100–110. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-100-110 (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Baklanova, K.V. (2023). Vliyanie parametrov transportnogo potoka i kharakteristik dorog na bezopasnost' dorozhnogo dvizhe-niya [Influence of traffic flow parameters and road characteristics on road safety]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii [Intellect. Innovations. Investments]*, (2), 99–110. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99-110 (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Gatiyatullin, M.Kh. & Pekcherkin, A.G. (2022). Vliyaniya transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobil'noi dorogi na avariinost' na primere uchastka r-177 «Povetluzh'e» [Impact of Transport and Operation State of the Road on Accident Rate on the Example of the R-177 “Povetluzhye”]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta [Transport equipment and technology]*, 2(25), 1–3. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Novikova, I.I. & Pavlov, Ya.P. (2023). Mirovye tendentsii v razvitiu intellektual'nykh transportnykh sistem [Global Trends in the Development of Intelligent Transport Systems]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika [Economy and business: theory and practice]*, 9(103), 152–155. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-9-152-155 (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Syrtsova, E.A. (2023). Effekty vnedreniya intellektual'nykh transportnykh sistem v regionakh Rossii [Effects of Intelligent Transport Systems Deployment in Russian Regions]. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyi vestnik [Public administration. Electronic Bulletin]*, (101), 159–169. DOI: 10.24412/2070-1381-2023-101-159-169 (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Bazhina, M.A. (2023). Intellektual'nye transportnye sistemy – osnova de lege ferenda transportnoi sistemy Rossiiskoi Federatsii [Intelligent Transport Systems as the Basis de Lege Ferenda of the Transport System of the Russian Federation]. *Journal of Digital Technologies and Law*, 1(3), 629–649. DOI: 10.21202/jdtl.2023.27 (In Russ.).
7. Il'ina, I.E. & Vitvitskii, E.E. (2025). Indeksy dlya otsenki urovnya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v regionakh [Indices for Assessing Road Safety Levels in the Regions of Russia]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta [The Russian Automobile and Highway Industry Journal]*, 22(1(101)), 68–77. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77 (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Hollnagel, E. (1998). *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. Oxford: Elsevier.
9. Begun, V.V., Gorbunov, O.V., Kolenko, I.N., Pis'mennyi, E.N., Zenyuk, A.Yu. & Litvinskii, L.L. (2000). *Veroyatnostnyi analiz bezopasnosti atomnykh stantsii (VAB)*. Kiev: KPI. (In Russ.).
10. Swain, A.D. & Guttman, H.E. (1983). *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. Final Report*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-1278. Washington.
11. Stojiljkovic, E., Bijelic, B. & Cvetkovic, M. (2017). Application of Heart Technique for Human Reliability Assessment – a Serbian Experience. *Facta universitatis. Series: Working and Living Environmental Protection*, 14(3), 187–196. DOI: 10.22190/FUWLEP1703187S
12. Gertman, D., Blackman, H., Marble, J., Byers, J. & Smith, C. (2005). *The SPAR-H Human Reliability Analysis Method*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-6883. Washington.
13. Polezhaev, M.N. & Finogeev, A.A. (2024). Prediktivnyi analiz pokazatelei kriticheskikh sobytii s pomoshch'yu rekurrentnoi neuronnoi seti s transformerom. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, (4), 63–68. DOI: 10.17513/snt.39974 (In Russ.).
14. Lau, B. T., Tee, M. K. T. & McCarthy, C. (2024). Enhancing road safety with machine learning: Current advances and future directions in accident prediction using non-visual data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137(P.A.). DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109086

**FEATURES OF MODELING HUMAN ERRORS  
IN ROAD INFRASTRUCTURE MONITORING AND MANAGEMENT PROBLEMS  
FOR INTEGRATION INTO PREDICTIVE SAFETY SYSTEMS**

**S. BOGDANOVICH**

*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

**P. BALTRUKOVICH**

*(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)*

*The article considers modern methods of modeling human errors of traffic control center operators for their subsequent integration into predictive safety systems of transport infrastructure. A comprehensive three-level analytical model has been developed that organically combines qualitative and quantitative assessment methods, including detailed PSF profiles that allow one to assess the influence of key factors: the degree of operator fatigue, the level of cognitive load, the ergonomics of workplaces and the quality of visual interfaces on the probability of operator errors. Particular attention is paid to the interdisciplinary approach that combines the methods of transport planning, cognitive psychology, artificial intelligence and ergonomics. Practical mechanisms for integrating the model into intelligent transport systems are proposed. Among them are the dynamic adjustment of predictive algorithms taking into account the actual values of the probability of operator errors and the automation of preventive control actions. The conducted studies demonstrate that systematic consideration of the human factor can significantly improve the accuracy and reliability of predictive safety systems, reducing the number of accidents.*

**Keywords:** *human factors, PSF profiles, predictive systems, road safety, operator error probability, intelligent transport systems, cognitive ergonomics, artificial intelligence.*