

*Ю. А. Денисова, Д. А. Рудиков*

## **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНО-ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ**

**Аннотация.** В статье решается проблема доминирования человеческого фактора как ключевой причины производственного травматизма в высокорисковых отраслях, на примере железнодорожного транспорта. В отличие от традиционных реактивных подходов, предлагается комплексная проактивная методология, интегрирующая когнитивное моделирование причинно-следственных связей с вероятностно-статистическим профилированием профессиональной пригодности. Ядром исследования является оригинальная математическая модель системы «человек-технология-среда», формализованная с применением теории взвешенных графов и нечетких когнитивных карт. На ее основе разработан новый метод количественной оценки соответствия работника профессии через построение эталонного статистического профиля. Доказана эффективность интеграции методов FMEA и HRA в алгоритм риск-ориентированного проектирования технологических процессов. Апробация подтвердила результативность предложенных решений, выразившуюся в статистически значимом снижении уровня травматизма. Научная новизна заключается в синтезе когнитивного и квалиметрического подходов, что позволяет перейти от констатации ошибок к прогнозированию и системной минимизации рисков, обусловленных человеческим фактором.

**Ключевые слова:** управление профессиональными рисками, человеческий фактор, железнодорожный транспорт, когнитивно-профилирующая модель, проактивная безопасность, функциональные сети, эталонный профиль профессии, риск-ориентированное проектирование.

**Для цитирования:** Денисова, Ю. А. Системный подход к управлению профессиональными рисками на железнодорожном транспорте на основе когнитивно-профилирующей модели / Ю. А. Денисова, Д. А. Рудиков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 19–25. – DOI 10.46973/1818-5509\_2025\_4\_19.

### **Введение**

Современные системы управления безопасностью на критически важных объектах, таких как железнодорожный транспорт, сталкиваются с парадоксом: несмотря на повсеместную автоматизацию и цифровизацию, вклад человеческого фактора в аварийность и травматизм не только не снижается, но в определенных аспектах возрастает. Статистика ОАО «РЖД» недвусмысленно указывает, что от 50% до 75% инцидентов инициируются ошибочными или несанкционированными действиями персонала [1, 4–6]. Существующие, в основном, реактивные подходы, фокусирующиеся на расследовании уже произошедших событий, исчерпали свой потенциал. Они позволяют фиксировать, но не прогнозировать и системно предотвращать рискованные действия человека.

Возникает научно-практическая проблема, заключающаяся в необходимости разработки такого методологического аппарата, который позволил бы не просто учитывать человеческий фактор, а управлять им на основе предиктивного анализа и количественной оценки. Целью данного исследования является создание и верификация интегрированной

когнитивно-профилирующей модели, обеспечивающей проактивное управление профессиональными рисками за счет синтеза методов оценки системных взаимосвязей в цепи «человек-технология-среда» и вероятностного определения эталонных требований к профессиональной пригодности.

### Методология и методы исследования

Методологический фундамент работы составляет принцип системного единства технических, технологических и человеческих компонентов производственной безопасности. Для декомпозиции этой сложной системы был применен синтез следующих методов:

1. Когнитивное моделирование. Использован аппарат нечетких когнитивных карт (Fuzzy Cognitive Maps) для визуализации и анализа нелинейных причинно-следственных связей между антропометрическими, физиологическими, психосоциальными ( $H$ ) и технологическими ( $S$ ), техническими ( $T$ ), средовыми ( $E$ ) факторами. Это позволило перейти от качественных описаний к полуколичественным оценкам силы влияний.

2. Вероятностно-статистическое профилирование. Разработан оригинальный метод построения эталонного профиля профессии  $P_{этал}$ , основанный не на нормативных предписаниях, а на статистическом анализе свойств  $H_i$  референтной группы «эталонных» работников (стаж > 10 лет, отсутствие нарушений, признанная высокая квалификация). Закон распределения каждого свойства  $H_i$  определялся эмпирически, а в качестве эталонного значения принималась мода распределения.

3. Функционально-сетевой анализ технологий. Технологические процессы были формализованы с помощью функциональных сетей (развитие идей А. И. Губинского [2]), что дало возможность не только декомпозировать процесс на типовые функциональные единицы (ТФЕ), но и количественно оценить его надежность через вероятность безошибочного выполнения  $V$ , выступающую ключевым критерием оптимизации.

4. Гибридный подход к оценке рисков. Предложена двухуровневая система:

– макроуровень: матричный анализ ретроспективных данных о травматизме и микротравмах с расчетом интегрального рейтинга потенциальной опасности подразделения  $R_j$ ;

– микроуровень: экспертно-аналитическая идентификация опасностей на рабочих местах с адаптацией методов FMEA [3] и HRA для оценки рисков отдельных операций через Приоритетное Число Риска (ПЧР).

### Результаты и их обсуждение

*Когнитивно-профилирующая модель системы.* В результате исследования разработана и формализована интегральная модель (1), позиционирующая технологию как системообразующий элемент, связывающий человеческий потенциал ( $H$ ) с техническими средствами ( $T$ ) и средой ( $E$ ):

$$\langle H, T, S, E, L \rangle, \quad (1)$$

где  $H = \{H^{ph}, H^{pl}, H^{ps}, H^{pr}\}$  – множество антропометрических, физиологических, психосоциальных и профессиональных характеристик работника;  $T = \{T^{re}, T^{sa}, T^{er}\}$  – множество показателей надежности технического средства, безопасности технического средства, эргономических характеристик технического средства;  $S = \{S^{qu}, S^{qt}\}$  – множество качественных и количественных характеристик технологии;  $E = \{E^{in}, E^{ex}\}$  – множество характеристик внутренней и внешней окружающей сред;  $L = \{L^{ne}, L^{fa}\}$  – множество – ближних и дальних социальных окружений, а связи между компонентами описаны матрицей смежности

взвешенного ориентированного графа  $W = \|w_{ij}\|, w_{ij} \in [0, 1]$ .

Научная новизна данного представления заключается в том, что весовые коэффициенты  $w_{ij}$  отражают не статические свойства, а динамическую вероятность нарушения связей (например,  $w_{сч}$  – вероятность неприменения СИЗ при выполнении

операции). Это позволяет проводить сценарное моделирование и выявлять наиболее уязвимые точки системы до реализации негативного события.

*Метод вероятностного профилирования профессии и оценка соответствия.* В отличие от традиционных методов профотбора, опирающихся на жесткие нормативы, предложен динамический подход к формированию эталонного профиля профессии  $P_{этал}$  (2):

$$P_{этал} = \{M(H_1), M(H_2), \dots, M(H_N)\}, \quad (2)$$

где  $M(H_i)$  – мода распределения  $i$ -го свойства в референтной группе.

Для количественной оценки соответствия конкретного работника  $W$  эталону предложен показатель рассогласования  $\Delta_w^p$  (3), имеющий ясную вероятностную интерпретацию:

$$\Delta_w^p = \frac{\sum_{i=1}^N f_{этал}(H_i) - f_w(H_i)}{n \cdot (1 - \theta(-\prod f_w(H_i)))} \quad (3)$$

где  $f_w(H_i)$  – частота значения свойства в его статистическом распределении,  
 $\theta(x)$  – функция Хевисайда.

Практическая значимость метода состоит в переходе от бинарной оценки «годен/не годен» к непрерывной шкале рассогласования, что позволяет выстраивать адресные программы развития и компенсации для персонала.

*Алгоритм риск-ориентированного проектирования технологических процессов.* Разработан комплексный алгоритм (рис. 1), ключевым отличием которого является интеграция анализа технологических и человеческих рисков на этапе проектирования:

1. Выявление критичных процессов на основе данных систем КАСАНТ и КАСАТ.
2. Их формализация в виде функциональных сетей и оценка базовой надежности  $B_0$ .
3. Для каждой операции ТФЕ проводится параллельный анализ:
  - FMEA: определение ПЧР для технико-технологических несоответствий;
  - HRA: идентификация потенциальных ошибок персонала и их причин.
4. Синтез результатов FMEA и HRA для определения операций с максимальным совокупным риском.
5. Оптимизация процесса путем редизайна высокорисковых операций, что приводит к новому значению надежности  $B_{opt} > B_0$ .

Эффективность алгоритма подтверждена на примере редизайна технологии проверки замыкания стрелок, где ПЧР по ключевым операциям был снижен на 40–60 %.

*Двухуровневая система оценки профессиональных рисков.* Предложенная система устраняет разрыв между макро- и микроуровнем управления:

1. Макроуровень (регион, предприятие). Интегральный рейтинг  $R_j$  рассчитывается по формуле (4) на основе восьми нормированных показателей  $X_i$  (от частоты микротравм до результатов аудита СУОТ [7]) с весами  $k_i$ , определенными методом экспертных оценок ( $W$  Кендалла  $> 0.7$ ):

$$R_j = \sum_{i=1}^8 k_i \cdot \left( \frac{X_{ij}}{\sum_j X_{ij}} \right) \quad (4)$$

2. Микроуровень (рабочее место). Проводится анкетирование работников и экспертное обследование рабочих мест с заполнением карт идентификации опасностей. Риски ранжируются, и формируется реестр недопустимых рисков для немедленного устранения [8, 9].

Такой подход позволяет руководству распределять ресурсы на основе объективных данных  $R_I$ , а на линейном уровне – фокусироваться на конкретных, локальных опасностях.

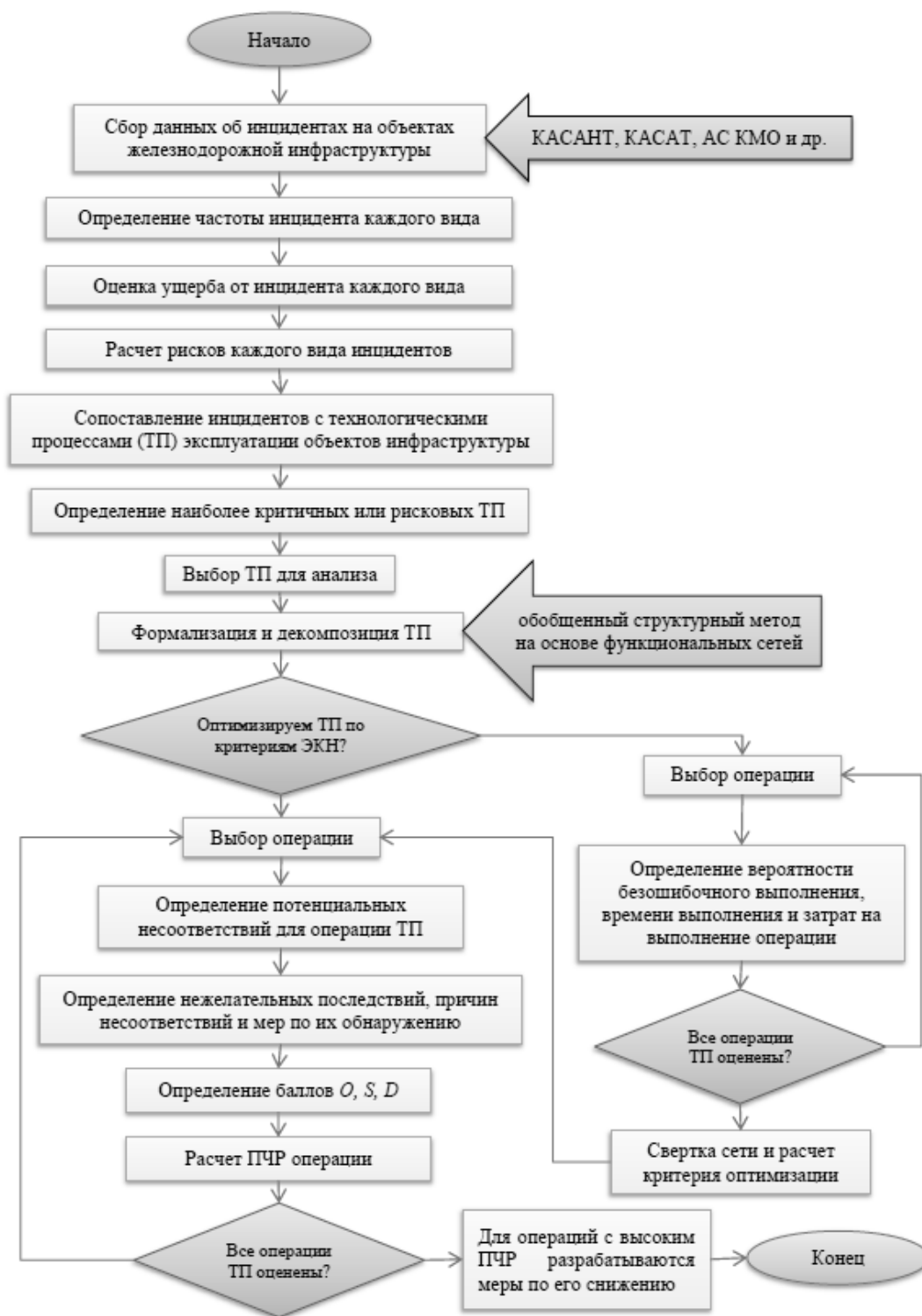


Рис. 1. Блок-схема алгоритма риск-ориентированного проектирования технологических процессов

### Заключение и перспективы

Проведенное исследование демонстрирует результативность синтеза когнитивного и квалиметрического подходов для управления сложной социотехнической системой. Основные научные результаты заключаются в следующем:

1. Разработана и верифицирована когнитивно-профилирующая модель, позволяющая количественно оценивать влияние человеческого фактора на безопасность через призму надежности технологических связей.

2. Предложен инновационный метод вероятностного профилирования профессий, повышающий объективность профотбора и позволяющий прогнозировать потенциальную надежность работника.

3. Создан гибридный алгоритм риск-ориентированного проектирования, обеспечивающий синергию методов FMEA и HRA для превентивного снижения рисков на этапе разработки технологий.

4. Апробирована двухуровневая система оценки рисков, обеспечивающая сквозное управление безопасностью от рабочего места до уровня дирекции.

Практическая реализация разработанных решений показала не только снижение коэффициента частоты травматизма, но и рост производительности за счет оптимизации технологических процессов и повышения уровня компетенций персонала.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой программного комплекса, реализующего предложенные модели в режиме реального времени, и с адаптацией методологии для других высокорисковых отраслей, таких как энергетика и добывающая промышленность.

### Список литературы

1. **Завьялов, А. М.** Повышение безопасности труда на железнодорожном транспорте на основе снижения влияния человеческого фактора: Дис. ... докт. техн. наук. – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – 395 с.
2. **Губинский, А. И.** Надежность человеко-машинных систем. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
3. ГОСТ Р 51814.2-2001 Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. – М.: Стандартиформ, 2001. – 27 с.
4. Risk Management in Transportation Safety System / T. A. Finochenko, L. V. Dergacheva, I. A. Yaitskov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 022050. – DOI 10.1088/1755-1315/666/2/022050. – EDN JZEOEI.
5. **Финоченко, Т. А.** Достойный труд – безопасный труд / Т. А. Финоченко, И. А.

### References

1. **Zavyalov, A. M.** Improving labor safety in railway transport by reducing the influence of the human factor: Diss. ... Doctor of Technical Sciences. – M.: RUT (MIIT), 2017. – 395 p.
2. **Gubinsky, A. I.** Reliability of human-machine systems. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 256 p.
3. GOST R 51814.2-2001 Quality systems in the automotive industry. Method for analyzing the types and consequences of potential defects. – M.: Standartinform, 2001. – 27 p.
4. Risk Management in Transportation Safety System / T. A. Finochenko, L. V. Dergacheva, I. A. Yaitskov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 022050. – DOI 10.1088/1755-1315/666/2/022050. – EDN JZEOEI.
5. **Finochenko, T. A.** Decent work – safe work / T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo

Яицков // Труды РГУПС. – 2018. – № 2 (43). – С. 5–6.

6. **Борисова, А. В.** Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности труда / А. В. Борисова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (50). – С. 5-7.

7. Специальная оценка условий труда как информационная база для внедрения риск-ориентированного подхода в сфере охраны труда / Т. А. Финоченко, В. А. Финоченко, Л. И. Воробинская // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (51). – С. 107–110.

8. **Новиков, Н. Н.** Несчастные случаи обусловленных человеческим фактором / Н. Н. Новиков, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2(67). – С. 87-98. – EDN VRESFY.

9. **Баланов, И. А.** Безопасный труд при эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. А. Баланов, Ю. А. Антонов, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2(67). – С. 19-24. – EDN MAQZQE.

universiteta putey soobshcheniya. - 2018. - No. 2 (43). - P. 5-6.

6. Borisova, A. V. Risk-oriented approach to ensuring occupational safety / A. V. Borisova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2020. - No. 1 (50). - P. 5-7.

7. Special assessment of working conditions as an information base for the implementation of a risk-oriented approach in the field of occupational safety / T. A. Finochenko, V. A. Finochenko, L. I. Vorobinskaya // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2020. - No. 2 (51). - P. 107-110.

8. Novikov, N. N. Accidents caused by human factors / N. N. Novikov, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 2 (67). - P. 87-98. - EDN VRESFY.

9. Balanov, I. A. Safe work during operation of railway rolling stock / I. A. Balanov, Yu. A. Antonov, I. A. Yaitkov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 2 (67). - P. 19-24. - EDN MAQZQE.

*Yu. A. Denisova, D. A. Rudikov*

## **A SYSTEM APPROACH TO MANAGING OCCUPATIONAL RISKS IN RAILWAY TRANSPORT BASED ON A COGNITIVE-PROFILING MODEL**

**Abstract.** The article addresses the problem of the human factor dominance as a key cause of occupational injuries in high-risk industries, using railway transport as an example. In contrast to traditional reactive approaches, a comprehensive proactive methodology is proposed, integrating cognitive modeling of cause-and-effect relationships with probabilistic-statistical profiling of professional suitability. The core of the research is an original mathematical model of the "human-technology-environment" system, formalized using the theory of weighted graphs and fuzzy cognitive maps. Based on it, a new method for quantitative assessment of an employee's compliance with the profession has been developed through the construction of a benchmark statistical profile. The effectiveness of integrating FMEA and HRA methods into the algorithm for risk-based design of technological processes is proven. Testing confirmed the effectiveness of the proposed solutions, resulting in a statistically significant reduction in the injury rate. The scientific novelty lies in the synthesis of cognitive and qualimetric approaches, which allows for a transition from stating errors to predicting and systematically minimizing risks caused by the human factor.

**Keywords:** occupational risk management, human factor, railway transport, cognitive-profiling model, proactive safety, functional networks, benchmark profession profile, risk-based design.

**For citation:** Denisova, Yu. A. A System Approach to Managing Occupational Risks in Railway Transport Based on a Cognitive-Profiling Model / Yu. A. Denisova, D. A. Rudikov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 19–25. – DOI 10.46973/1818-5509\_2025\_4\_19.

#### Сведения об авторах

**Денисова Юлия Андреевна**

Ростовский государственный университет  
путей сообщения (РГУПС),  
кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,  
студент,  
e-mail: kat101203@gmail.com

**Рудиков Дмитрий Алексеевич**

Ростовский государственный университет  
путей сообщения (РГУПС),  
кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,  
кандидат технических наук, доцент  
e-mail: d-studio@mail.ru

#### Information about the authors

**Denisova Yulia Andreevna**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Life safety»,  
Student,  
e-mail: kat101203@gmail.com

**Rudikov Dmitry Alekseevich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Life safety»,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: d-studio@mail.ru