

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 331.452

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-61-72>

### Методология применения барьерно-ориентированного подхода для оценки рисков травмирования персонала на основе модели Хаддона

В.А. Гарт

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
г. Москва, Российская Федерация

✉ [gart\\_v@mail.ru](mailto:gart_v@mail.ru)

EDN: XUJVSZ

#### Аннотация

**Введение.** Модернизация производств с ростом автоматизации и усложнением технологических процессов повышает психофизиологическую нагрузку на работников и вероятность ошибок, что усиливает риск производственного травматизма. Наблюдаемый рост числа пострадавших на рабочих местах подчеркивает экономическую и социальную значимость предотвращения несчастных случаев: травматизм снижает производительность и увеличивает расходы на компенсации. Современные подходы управления профессиональными рисками требуют системной оценки не только вероятности инцидента и тяжести последствий, но и состояния защитных механизмов — барьеров безопасности, ограничивающих воздействие опасных факторов. Методология Хаддона, изначально разработанная для транспортной безопасности, показала свою способность выявлять слабые звенья и анализировать последовательность развития инцидентов; её барьерно-ориентированные принципы теоретически применимы в промышленной среде. Однако существующие исследования барьерных моделей в промышленности фрагментарны и не дают универсального инструмента для количественной оценки эффективности барьеров и их вклада в снижение рисков травмирования. В связи с этим цель настоящего исследования — разработать методику применения барьерно-ориентированного подхода на основе модели Хаддона для комплексной количественной оценки рисков травмирования персонала.

**Материалы и методы.** Для решения задачи снижения производственного травматизма была использована барьерная модель обеспечения безопасности. Исследование включало три части. Первая — комплексный анализ требований российского законодательства в сфере оценки профессиональных рисков, а также научных публикаций, посвящённых применению барьерно-ориентированного подхода. Вторая — описание методологии определения вероятности реализации опасности на основе результатов оценки показателей надежности барьеров безопасности. Оценка барьеров безопасности выполнялась по чек-листам с использованием адаптированной модели Хаддона. Третья — иллюстрация практического применения барьерного подхода на модельном примере.

**Результаты исследования.** Разработана методология применения барьерно-ориентированного подхода для оценки рисков травмирования. Определён способ количественной оценки влияния актуальных опасностей с учётом показателей надежности барьеров безопасности. Сформированы уровни риска реализации опасности. Отражены как предлагаемые в рамках данного исследования, так и уже применяемые методологические принципы с указанием их преимуществ и ограничений. Приведён пример расчёта вероятности реализации опасности, возникающих при подъёме и перемещении грузов с использованием подъемных сооружений.

**Обсуждение.** Представленная методология применения барьерно-ориентированного подхода позволяет учитывать влияние организационных факторов и человеческого фактора на безопасность производственных процессов и получать количественные оценки возможности реализации опасности. Кроме того, подход обеспечивает комплексную оценку барьеров безопасности, учитывающую не только их наличие и результативность, но и показатели надежности — эффективность и устойчивость функционирования. Это создаёт основу для упрощения процедуры определения приоритетности реализации мероприятий по профилактике травматизма и оптимизации системы управления профессиональными рисками.

**Заключение.** Основными результатами проведённого исследования являются: обоснованный способ расчёта вероятности реализации опасных производственных факторов и рекомендации по поэтапному внедрению разработанной методологии в практику управления охраной труда. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции предложенного подхода с инструментами оперативного мониторинга в области охраны труда и в его применимости для решения задач, связанных с управлением риском травмирования работников в различных производственных условиях.

**Ключевые слова:** опасный производственный фактор, риск травмирования, барьер безопасности, оценка рисков, производственный травматизм

**Благодарности.** Автор благодарит руководителя научного проекта Е.П. Потоцкого, рецензента и редакционную команду журнала за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

**Для цитирования.** Гарт В.А. Методология применения барьерно-ориентированного подхода для оценки рисков травмирования персонала на основе модели Хаддона. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(1):61–72. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-61-72>

*Original Empirical Research*

## Methodology for Implementing a Barrier-Oriented Approach to Risk Assessment of Personnel Injuries Based on the Haddon Model

Victoria A. Gart 

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

✉ [gart\\_v@mail.ru](mailto:gart_v@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Modernization of production facilities, with increased automation and complexity of technological processes, leads to a greater psychophysiological burden on workers and a higher likelihood of errors. This, in turn, increases the risk of occupational injuries. The increasing number of workplace accidents underscores the economic and social importance of accident prevention, as injuries reduce productivity and increase compensation costs. Modern approaches to occupational risk management require a systematic assessment of not only the probability of an incident and the severity of its consequences, but also the state of protective mechanisms — safety barriers that limit the impact of hazardous factors. Haddon's methodology, originally developed for transportation safety, can be used to identify weak links and analyze the sequence of incidents. Its barrier-oriented principles are theoretically applicable to industrial environments. However, existing research on barrier models in industry is fragmented and does not provide a unified tool for quantifying the effectiveness of barriers and their contribution to reducing injury risks. Therefore, the aim of this study is to develop a method for applying a barrier-oriented approach based on the Haddon model for a comprehensive quantitative assessment of personnel injury risks.

**Materials and Methods.** A barrier safety model was used to solve the problem of reducing occupational injuries. The study consisted of three parts. The first was a comprehensive analysis of the requirements of Russian legislation in the field of occupational risk assessment, as well as scientific publications on the use of a barrier-oriented approach. The second was the description of the methodology for determining the likelihood of a hazard based on the results of an assessment of the reliability of safety barriers. The assessment of safety barriers was conducted according to checklists using the adapted Haddon model. Finally, an illustration of practical application of barrier approach using model example was provided.

**Results.** A methodology for using a barrier-oriented approach to assess injury risks has been developed. A method for quantifying the impact of current hazards has been defined, taking into account the reliability of safety barriers. Risk levels for the hazard realization have been determined. Both the methodological principles proposed in this study and those already applied have been considered, indicating their advantages and limitations. An example of calculating the probability of hazards occurring when lifting and moving goods using hoisting devices has been given.

**Discussion.** The presented methodology for applying the barrier-oriented approach allows us to take into account the influence of organizational factors and human factor on the safety of production processes and to obtain quantitative estimates of the possibility of hazard occurrence. Additionally, this approach provides a comprehensive assessment of safety barriers, considering not only their presence and effectiveness, but also reliability indicators — efficiency and sustainability of operation. This creates a basis for simplifying the process of prioritizing injury prevention measures and optimizing occupational risk management systems.

**Conclusion.** The main results of the research include a practical way to calculate the probability of hazardous production factors, as well as recommendations for gradual implementation of the developed methodology into the practice of occupational safety and health management. The practical significance of this work lies in its potential for integration of the proposed approach with operational monitoring tools in the field of occupational safety and health and in its applicability to solving problems related to worker injury risk management in various production conditions.

**Keywords:** hazardous production factor, risk of injury, safety barrier, risk assessment, industrial injuries

**Acknowledgements.** The author would like to thank the Head of the research project, E.P. Pototskii, the reviewer, and the Editorial team of the journal for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

**For Citation.** Gart VA. Methodology for Implementing a Barrier-Oriented Approach to Risk Assessment of Personnel Injuries Based on the Haddon Model. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(1):61–72. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-61-72>

**Введение.** В настоящее время одной из наиболее актуальных задач промышленности является модернизация производств за счёт внедрения современного оборудования и передовых технологий. Однако рост уровня автоматизации и усложнение технологических процессов отрицательно сказываются на безопасности труда персонала, сопровождаясь увеличением числа ошибок работников на фоне возрастания напряжения психофизиологических функций.

Указанные негативные тенденции подтверждаются статистическими данными. Согласно [1], по сведениям Международной организации труда (МОТ), ежегодно во всём мире регистрируется примерно 340 млн. несчастных случаев на производстве, при этом около 2,3 млн. работников погибают в результате производственных травм. Согласно [1], в 2022 году в США было зафиксировано 2,8 млн. несчастных случаев на производстве, а за 2021 год зарегистрировано 5,19 тыс. смертельных исходов. Согласно [1], в Великобритании в 2022–2023 годах 561 тыс. работников получили травмы на рабочих местах. Согласно аналитическому обзору ФГБУ «ВНИИ труда» Минтруда России «Анализ производственного травматизма»<sup>1</sup>, в Российской Федерации в 2024 году 21,4 тыс. сотрудников получили травмы на производстве, из них 1,04 тыс. случаев сопровождались смертельным исходом. При этом с 2021 года численность пострадавших на рабочих местах увеличилась на 1,1 тыс. человек.

Анализ статистических данных демонстрирует устойчивое сохранение высокого уровня производственного травматизма в различных странах. Это обстоятельство определяет возрастающую значимость вопросов охраны труда на промышленных предприятиях в условиях ускоренного технологического развития. Современные мировые тренды в области снижения производственного травматизма охватывают следующие направления: цифровизацию процессов охраны труда; использование искусственного интеллекта для мониторинга условий труда и состояния работников; внедрение «умных» средств индивидуальной защиты; применение виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR) для обучения сотрудников безопасным методам работы; формирование устойчивой культуры безопасности; переход от традиционного, преимущественно реактивного подхода, основанного на анализе несчастных случаев постфактум, к проактивному управлению профессиональными рисками.

Необходимость внедрения проактивного управления рисками подтверждается письмом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 14.07.2025 г. № 15-3/10/В-11850 «О росте производственного травматизма»<sup>2</sup>. В документе указано, что основными причинами несчастных случаев на производстве являются: неудовлетворительная организация производства работ, нарушение правил дорожного движения, отклонения от установленного технологического процесса, а также несоблюдение работниками трудового распорядка и дисциплины труда. Также указано, что среди несчастных случаев с тяжёлыми последствиями, произошедших в Российской Федерации в 2024 году по причине неудовлетворительной организации производства работ, преобладали события, обусловленные отсутствием должного контроля со стороны руководителей и специалистов подразделений за ходом выполнения работ и соблюдением трудовой дисциплины. Совокупность организационных факторов и особенностей человеческого поведения в структуре травматизма указывает на системные недостатки в обеспечении безопасности труда. Эти недостатки можно устранить посредством внедрения эффективных мероприятий по управлению профессиональными рисками на рабочих местах, включая выявление опасностей, оценку уровней рисков и реализацию мер по их снижению с целью минимизации вероятности травмирования персонала.

С учётом изложенного задача оценки и снижения уровней рисков травмирования работников представляет собой актуальное научное направление исследования.

<sup>1</sup> *Анализ производственного травматизма в России:* Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт труда» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации. Отчет 2025 года.

<sup>2</sup> *О росте производственного травматизма:* письмо Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 14.07.2025 г. № 15-3/10/В-11850

Одним из ключевых документов, регламентирующих подходы к оценке рисков, является международный стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 «Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Методы оценки риска». <sup>3</sup> Данный стандарт описывает широкий спектр методов оценки рисков, каждый из которых обладает собственной областью применения и спецификой практической реализации. Некоторые из указанных методов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Обзор методов оценки профессиональных рисков

№	Название метода	Описание	Преимущества	Недостатки
1	Метод Делфи	Метод обобщения мнений экспертов на основе анонимного опроса и многократного итерационного процесса согласования мнений	Подходит для решения сложных вопросов, где нет однозначных научных подходов или имеется недостаточная статистика. Большая вероятность получения объективной оценки	Длительность процедуры: проведение множества циклов опроса занимает значительное количество времени. Высокая зависимость результатов от компетентности экспертов
2	Контрольные листы	Форма выявления и анализа потенциальных профессиональных рисков путем составления перечня вопросов и критериев проверки	Простота реализации и доступность понимания сотрудниками разных уровней квалификации. Удобство использования в качестве инструмента первичного контроля	Трудоемкость разработки качественных и полных контрольных списков, особенно для крупных предприятий с разнообразием рабочих процессов
3	Анализ дерева событий	Оценка возникновения нежелательных последствий путем пошагового рассмотрения последовательности возможных исходов каждого события	Наглядность, возможность детального учета множества факторов и условий, влияющих на развитие ситуации	Зависимость от качества данных, ограниченность вероятностных оценок (предполагает наличие статистической базы для расчета вероятностей)
4	Анализ видов и последствий отказов (FMEA)	Используется для выявления потенциальных неисправностей системы, анализа возможных причин возникновения дефектов	Повышение надежности оборудования и техники благодаря выявлению критичных узлов и компонентов	Требуются значительные временные ресурсы и усилия квалифицированных специалистов для детального анализа
5	Исследование опасности и работоспособности (HAZOP)	Детальное изучение технологического процесса группой экспертов. Анализ проводится последовательно по каждому элементу системы, оценивая возможные отклонения от нормального режима работы	Четкая процедура анализа позволяет выявить скрытые угрозы, рассматривает широкий спектр возможных отклонений и последствий.	Трудоемкость, метод трудно применять для крупных сложных объектов без упрощений
6	Метод Байеса	Используется для оценки вероятности наступления нежелательных событий на основании имеющейся априорной информации и новых поступающих данных	Снижение степени субъективности оценки. Возможность оперативно реагировать на новые данные и улучшать точность прогнозирования	Зависимость от качества априорных данных. Сложно точно определить вероятность редких событий

<sup>3</sup> Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Методы оценки риска: ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 сентября 2021 г. №1011-ст.

Существующий инструментарий по оценке профессиональных рисков в основном ограничен традиционным подходом, основанным на анализе вероятности происшествий и тяжести его последствий. При этом уровень безопасности производства определяется степенью ограничения воздействия опасных производственных факторов на работников путём последовательного размещения «барьеров» между источником потенциальной опасности и объектом, находящимся под угрозой. Поэтому при оценке рисков травмирования важно учитывать состояние «барьеров», минимизирующих воздействие опасных производственных факторов. Оценка риска травмирования должна проводиться в источнике его формирования на конкретном рабочем месте с учётом взаимодействия работника с конкретной опасностью и состояния защитных механизмов.

Методология Хаддона [2], разработанная в сфере транспортной безопасности, успешно применяется для выявления слабых звеньев системы безопасности. Применение аналогичного подхода в промышленной среде представляется перспективным направлением развития практики оценки рисков травмирования. Вместе с тем, имеющиеся публикации по барьерным моделям безопасности ограничиваются отдельными примерами реализации — они не предлагают универсального метода количественного анализа эффективности барьеров применительно к промышленному производству. Следовательно, существующая практика оценки профессиональных рисков требует разработки нового инструмента, позволяющего комплексно оценить эффективность барьеров безопасности и оптимизировать управление ими. Исходя из этого, целью настоящего исследования является разработка методологии применения барьерно-ориентированного подхода на основе модели Хаддона в оценке рисков травмирования персонала.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проанализированы современные методы оценки профессиональных рисков, определены ограничения по их применению;
- предложен способ расчёта вероятности реализации опасных производственных факторов, основанный на оценке надёжности барьеров безопасности, определённых в соответствии с моделью Хаддона;
- проведена оценка вероятности реализации опасности, связанной с подъёмом и перемещением грузов подъёмными сооружениями.

**Обзор существующих методов барьерных моделей.** В русскоязычных источниках одно из первых упоминаний о барьерах безопасности встречается в материале российско-норвежского проекта «Баренц-2020»<sup>4</sup>. В рамках этого проекта основная задача состояла в оценке влияния арктических условий на работоспособность защитных барьеров. Появление и развитие концепции барьеров было вызвано потребностью в оценке эффективности технических и организационных средств защиты, применяемых на объекте [3, 4].

В настоящее время российская практика нормативно-правового регулирования в области оценки профессиональных рисков включает рекомендации по использованию барьерной модели безопасности. Так, в «Рекомендациях по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков»<sup>5</sup>, утверждённых приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 28.12.2021 г. № 926, приведены следующие подходы:

1. Метод «галстук-бабочка» (Bow-Tie), описанный в работах [5, 6], позволяет оценивать полноту системы защиты анализируемого объекта. Его преимущество — наглядная визуализация взаимосвязей между потенциальными источниками опасности и негативными последствиями через центральную точку («нежелательное событие»). Метод получил широкое распространение благодаря ясности представления и универсальности. Вместе с тем он не всегда обеспечивает получение количественных оценок, необходимых для приоритизации профилактических мероприятий.

2. Метод анализа уровней защиты (Layer of Protection Analysis), рассмотренный в работах [7, 8], представляет собой количественную оценку надёжности защитных барьеров на основе вероятностных характеристик их отказов. Этот метод рекомендован при обосновании необходимости установки новых барьеров или модернизации существующих.

Описанные подходы составляют методологическую основу концепции барьерной защиты, направленную на снижение риска травмирования. Однако они имеют ряд ограничений, снижающих эффективность применения в производственной практике:

- ориентированы на локальные объекты и отдельные опасные ситуации, что приводит к фрагментарности анализа и не позволяет выявлять взаимосвязи между элементами системы безопасности;
- опираются на статистические данные о вероятности возникновения негативного события и эффективности действующих барьеров — эти предположения могут оказаться неверными при изменении условий эксплуатации оборудования, что требует регулярного обновления исходных данных и корректировки расчётных моделей и усложняет управление рисками;
- недостаточно учитывают влияние организационных факторов и человеческого фактора на безопасность производства.

<sup>4</sup> Оценка международных стандартов для безопасной разведки, добычи и транспортировки нефти и газа в Баренцевом море: Отчет проекта «Баренц-2020».

<sup>5</sup> Рекомендации по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков: Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 28.12.2021 г. № 926.

Идея учёта надёжности барьеров при оценке рисков травмирования, развиваемая в российских исследованиях [9, 10], частично снимает перечисленные ограничения, однако остаётся открытым вопрос о необходимости дополнительного учёта следующих критериев:

- динамики состояния барьеров, подверженных естественному износу (технические барьеры) и изменению требований (процедурные и поведенческие барьеры);
- человеческого фактора как показателя корректности взаимодействия персонала с оборудованием и средствами защиты.

Таким образом, несмотря на достоинства, рассмотренные методы обладают недостатками, препятствующими их полноценному внедрению в практику управления рисками травмирования. Требуется разработка комплексной методики, объединяющей достоинства количественного анализа с адаптивностью к меняющимся условиям эксплуатации и способностью учитывать как инженерные, так и организационно-психологические аспекты функционирования системы безопасности. Формирование таких методик создаст надёжную основу для эффективного управления рисками.

**Материалы и методы.** В основе предлагаемой методологии лежит единый механизм возникновения несчастного случая на производстве: пострадавший в конкретной производственной локации вступает в контакт с объектом (оборудование, инструмент, материалы), обладающим достаточным количеством энергии, что и придаёт этому объекту опасные для человека свойства [11, 12]. Учитывая, что спусковым механизмом несчастного случая в 80–90 % опасных ситуаций выступают активные (преднамеренные либо ошибочные) действия самих пострадавших [13, 14], а также руководствуясь статьей 209 ТК РФ<sup>6</sup>, предлагается определять персональный уровень риска травмирования в источнике его формирования (конкретной локации) с учетом действующих в ней опасностей и влияния человеческого фактора следующим образом:

$$R = \sum P_j \cdot W \cdot F_j, \quad (1)$$

где  $P_j$  — вероятность реализации  $j$ -го опасного производственного фактора;  $W$  — склонность работника к риску травмирования;  $F_j$  — тяжесть негативных последствий при воздействии  $j$ -го опасного производственного фактора.

Оценка вероятности реализации  $j$ -го опасного производственного фактора проводилась на примере оперативного персонала предприятия металлургической отрасли по следующему алгоритму. На первом этапе выполнялась идентификация опасных производственных факторов, воздействующих на работника в процессе выполнения трудовых операций. Источниками информации для идентификации служили:

- обследование рабочего места;
- наблюдение за проведением работ;
- опрос персонала;
- анализ нормативно-правовых актов;
- анализ локальных нормативно-правовых актов предприятия.

Идентификация осуществлялась по всем объектам исследования — видам работ, местам проведения работ, нештатным и аварийным ситуациям.

На втором этапе для каждого идентифицированного фактора с потенциалом несчастного случая был разработан электронный чек-лист по проверке функционирования барьеров безопасности (таблица 4) с использованием on-line сервиса MSForms. Графа 2 чек-листа сформирована в соответствии с моделью Хаддона и обладает универсальным характером для всех опасных производственных факторов, независимо от специфики производства. Графа 3 чек-листа содержит наиболее критичные требования безопасности, предусмотренные нормативно-правовыми актами и локальными актами производственного объекта (стандарты, положения, инструкции по охране труда, технологические инструкции), которые способны препятствовать передаче энергии от источника (оборудования) к человеку — невыполнение этих требований может привести к несчастному случаю на производстве. Для внедрения риск-ориентированного подхода подбор таких критичных требований выполнялся с их адаптацией к особенностям конкретного производственного объекта с учётом конструктивных характеристик оборудования и эксплуатационных условий с применением метода «галстук-бабочка» (рис. 1). В графе 4 чек-листа фиксируется результативность барьеров безопасности, определённая в соответствии с [15].

<sup>6</sup> Трудовой кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 197-ФЗ от 30.12.2001г.

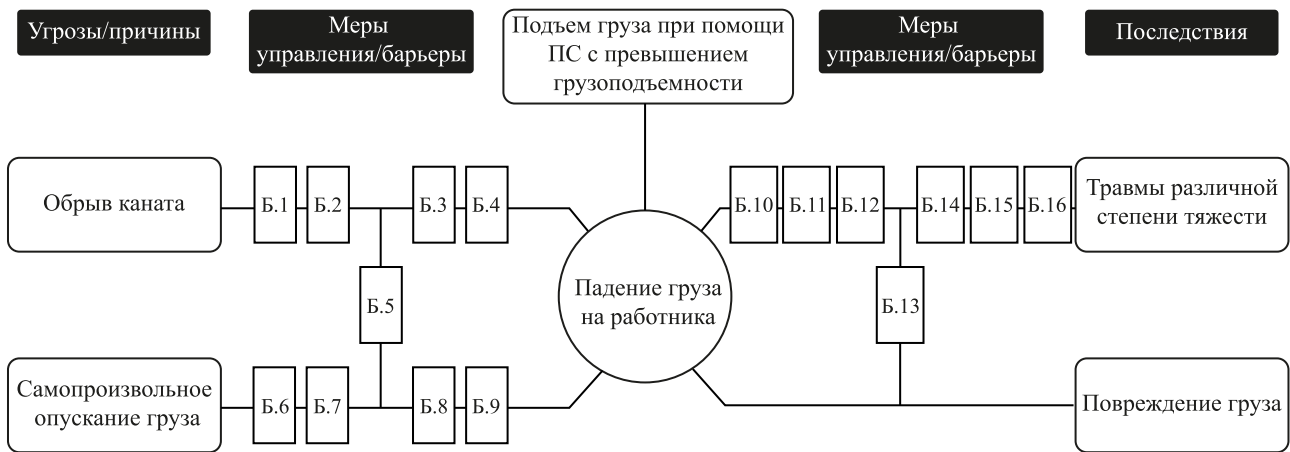


Рис. 1. Анализ риска методом «галстук–бабочка»: Б1 — оценка состояния каната машинистом крана перед началом работы; Б2 — инструментальный контроль износа каната; Б3 — ограничитель грузоподъемности; Б4 — конечный выключатель переподъема; Б5 — отсутствие людей в опасной зоне; Б6 — оценка износа колодок тормоза главного подъема; Б7 — проверка нулевой блокировки; Б8 — подъем груза на безопасную высоту; Б9 — регламентное обслуживание ПС; Б10 — защитные ограждения опасных участков; Б11 — предупредительный сигнал; Б12 — применение СИЗ; Б13 — навыки действий в аварийных ситуациях; Б14 — обучение по оказанию первой помощи; Б15 — оперативная связь с медицинской службой; Б16 — аптечка первой помощи

На третьем этапе выполняли оценку функционирования барьеров безопасности руководителями производственных участков по чек-листу в рамках мониторинга состояния охраны труда с использованием QR-кодов, размещённых в локалях риска, в соответствии со шкалой, представленной в таблице 2. Результаты производственного контроля исправности барьеров безопасности фиксировали в электронной системе MCForms (графа 5 чек-листа). В качестве модельного примера рассматривалась ситуация, при которой ответственный за содержание подъемного сооружения в работоспособном состоянии в ходе периодических осмотров в установленные графиком сроки совместно с оператором ПС проводит оценку приборов безопасности. Значение «0» по показателю эффективности ставилось при отсутствии или неисправности прибора, значение «1» — при наличии технических замечаний без ограничения работоспособности (например, ограничитель подъёма крюка ПС срабатывает, когда расстояние между крюком и лебёдкой составляет 100 мм при норме 200 мм и более). Значение «3» присваивалось при полной технической исправности в соответствии с паспортом прибора. При этом при расчёте вероятности реализации опасности по формуле (2) использовали не конкретную экспертную оценку, а обобщённую оценку, основанную на максимально возможном количестве баллов.

На четвёртом этапе проводили математическую обработку результатов оценки вероятности реализации опасности и относили полученные значения к уровням реализации опасных производственных факторов с помощью Excel.

**Результаты исследования.** Показатель вероятности реализации идентифицированных опасных производственных факторов ( $P_j$ ) из формулы (1) предлагается оценивать с учетом критериев динамического состояния барьеров безопасности следующим образом:

$$P_j = \prod_{i=1}^n (1 - E_i \cdot N_i \cdot S_i), \quad (2)$$

где  $E_i$ ,  $N_i$ ,  $S_i$  — результативность, эффективность и устойчивость  $i$ -го барьера безопасности соответственно ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в процессе его эксплуатации.

Результативность ( $E_i$ ), отражающая значимость барьера в системе обеспечения безопасности производственного объекта, определялась согласно ГОСТ 12.0.011-2017 «Методы оценки и расчета профессиональных рисков работников железнодорожного транспорта», утвержденного приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2017 г. № 2065-ст<sup>7</sup>.

Оценка эффективности барьера безопасности ( $N_i$ ), являющаяся фактором исправности, оценивалась по критериям в соответствии со шкалой и представлена в таблице 2.

<sup>7</sup>Методы оценки и расчета профессиональных рисков работников железнодорожного транспорта: ГОСТ 12.0.011-2017. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2017 г. № 2065-ст.

Таблица 2

Критерии эффективности барьеров безопасности

Уровень	Описание состояния	Значение
Удовлетворительный	Состояние соответствует заданному уровню	3
Приемлемый	Состояние не в полной мере соответствует заданному уровню	1
Критический	Барьер безопасности не функционирует	0

Устойчивость ( $S_i$ ), характеризующая частоту выявляемых несоответствий в функционировании барьеров безопасности, рассчитывалась по формуле:

$$S_i = e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где  $\lambda = b/B$  — коэффициент частоты несоответствий,  $b$  — общее количество несоответствий,  $B$  — количество проверок исправности (для технического барьера)/количество проверок функционирования (для организационного барьера),  $t$  — анализируемый период ( $t = 1$ , если анализируемый период составляет 1 год).

Определение приоритетности реализации мероприятий по охране труда производилось в зависимости от расчетного уровня риска реализации опасности (таблица 3).

Таблица 3

Уровень реализации опасных производственных факторов

Вероятность реализации опасности	Категория риска травмирования	Срочность мероприятий
0	Риск отсутствует	Мероприятия не требуются
<0,24	Умеренный	Требуются мероприятия со сроками устранения
0,25–0,49	Существенный	Требуются неотложные мероприятия
0,5–1,0	Высокий	Требуется остановка работ до реализации мероприятий

В качестве примера применения предложенного методологического подхода выполнена оценка вероятности реализации опасных ситуаций, связанных с подъёмом и перемещением грузов с использованием подъёмных сооружений. Оценка проведена для оператора подъёмных сооружений металлургического предприятия, выполняющего строповку и обвязку грузов перед их последующим перемещением мостовым краном (далее — оператор ПС). Для анализа указанного опасного производственного фактора был разработан чек-лист, фрагмент которого представлен в таблице 4.

Таблица 4

Фрагмент чек-листа по проверке функционирования барьеров безопасности по опасностям, связанным с подъемом и перемещением грузов с помощью подъемных сооружений

№	Функция группы барьеров безопасности	Объект проверки	Результативность ( $E_i$ )	Эффективность ( $N_i$ )	Устойчивость ( $S_i$ )
1	2	3	4	5	6
1.	Предотвращение выделения энергии	1.1 Состояние металлоконструкций и оснастки	0,9	3	1
2.	Блокировка распространения энергии	2.1 Прибор, ограничивающий подъем грузозахватного органа выше максимально допустимого уровня	0,8	2	0,51
		2.2 Аварийный выключатель для обесточивания ПС в экстренных ситуациях	0,8	3	0,71

3.	Установка защитных конструкций	3.1 Ограждения, другие системы контроля, исключая внезапный вход, проникновение в опасную зону	0,7	1	0,36
4.	Предупреждение об опасности	4.1 Звуковой сигнал	0,6	1	0,71
		4.2 Прибор, сигнализирующий о превышении грузоподъемности...	0,6	3	1
5.	Описание процедур обращения с опасностью	5.1 Приемы работы для машинистов кранов и стропальщиков	0,5	0	0,51
		5.2 Выполнение графика ТО и ППР ПС	0,5	3	1
6.	Готовность к выполнению должностных обязанностей (обучение, медицинский осмотр)	6.1 Машинисты кранов и стропальщики обучены, успешно прошли стажировку и проверку знаний	0,2	0	0,51
		6.2 Отсутствуют противопоказания по состоянию здоровья	0,2	3	1
7.	Обеспечение СИЗ	Комплект спецодежды	0,1	1	0,71

В графе 6 чек-листа указывается устойчивость барьеров безопасности ( $S_i$ ), формируемая автоматически на основании результатов проводимых оценок барьеров безопасности в течение календарного года. Например, в течение года было проведено 3 проверки исправности барьера 3.1 модельного примера, приведенного в таблице 4. В ходе 2-х проверок были отмечены замечания по его исправности. Таким образом, коэффициент устойчивости ( $S_i$ ), рассчитываемый по формуле (3), будет равен:

$$S_i = e^{-0,67 \cdot 1} = 0,51.$$

Вероятность реализации опасностей, связанных с подъемом и перемещением грузов с помощью подъемных сооружений, рассчитанная по формуле (2), в рассматриваемом примере составляет:

$$P_{ПС} = (1 - 0,9 \cdot 1 \cdot 1) \cdot (1 - 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,51) \cdot (1 - 0,8 \cdot 1 \cdot 0,71) \cdot (1 - 0,7 \cdot 1 \cdot 0,36) \cdot (1 - 0,6 \cdot 0,3 \cdot 0,71) \cdot (1 - 0,6 \cdot 1 \cdot 1) \cdot (1 - 0,5 \cdot 0 \cdot 0,51) \cdot (1 - 0,5 \cdot 1 \cdot 1) \cdot (1 - 0,2 \cdot 0 \cdot 0,51) \cdot (1 - 0,2 \cdot 1 \cdot 1) \cdot (1 - 0,1 \cdot 0,3 \cdot 0,71) = 0,025.$$

Согласно таблице 3, это соответствует умеренному риску травмирования, для снижения которого требуется плановая разработка мероприятий со сроками устранения.

**Обсуждение.** Предлагаемый барьерно-ориентированный подход к оценке профессиональных рисков принципиально отличается от традиционных методов, которые ориентированы преимущественно на частоту и тяжесть происшествий. Главное преимущество нового метода — оценка результативности, эффективности и устойчивости барьеров безопасности на рабочих местах. Применение барьерной модели, основанной на концепции Хаддона, предполагает создание многоуровневой системы защиты, каждый уровень которой нацелен на снижение вероятности реализации воздействия опасного производственного фактора. Эта концепция объединяет комплексную систему предотвращения травматизма, сочетающую технические, организационные и поведенческие мероприятия.

Проведённый литературный обзор подтверждает согласованность представленных выводов с результатами исследований [9, 10], подчёркивающих значимость барьерных систем безопасности в профилактике производственного травматизма. При этом ранее предложенные методы акцентируют внимание на оценке результативности отдельных барьеров, тогда как в данном исследовании учитывается динамика изменения их функций.

Динамический характер модели позволяет отражать изменение условий эксплуатации, влияющих на надёжность и устойчивость защитных механизмов, что повышает эффективность превентивных мер. Таким образом, применение предложенного подхода предоставляет специалистам по охране труда и производственным руководителям возможность:

- получить более полную и точную оценку уровня защищённости рабочих мест;
- обосновывать профилактические мероприятия, направленные на предупреждение производственного травматизма, при решении вопросов целесообразности их внедрения;
- своевременно реализовывать профилактические меры;
- прогнозировать возможные нежелательные события.

Преимущество подхода — его совместимость с инструментами оперативного мониторинга, например, с любыми формами производственного контроля, действующими на рассматриваемом объекте. Это повышает качество производственного контроля, отсутствие которого в должной мере, в свою очередь, стало причиной 61,5 % травматизма в Российской Федерации в 2024 году, зарегистрированного по причине неудовлетворительной организации производства работ.

Несмотря на указанные достоинства, барьерно-ориентированный подход имеет ограничения в универсальности и масштабируемости. Требуется адаптация к особенностям различных отраслей и конкретных производственных условий. Сложность внедрения связана с необходимостью сбора, накопления и обработки большого объёма информации о текущем состоянии барьеров и истории их отказов. Для получения достоверной оценки вероятности реализации опасности предъявляются высокие требования к точности и полноте данных по критериям эффективности (Ni) и устойчивости (Si) барьеров безопасности. При этом человеческий фактор при подготовке исходных данных остаётся потенциальным источником погрешностей.

Преодоление указанных ограничений возможно при расширении объёма собираемой статистики, разработке программного модуля, реализующего предлагаемую модель, внедрении современных технологий мониторинга технического состояния объектов и применении методов машинного обучения. Эти мероприятия обеспечат непрерывный контроль состояния барьеров безопасности и повысят точность оценки вероятности реализации опасности.

**Заключение.** В результате исследования разработан барьерно-ориентированный подход к оценке и управлению риском травмирования персонала, основанный на учёте эффективности и устойчивости барьеров безопасности. Показано, что предложенная модель может быть интегрирована с существующими системами оперативного мониторинга в области охраны труда, что способствует повышению качества управления рисками.

Установлено, что практическая реализация подхода ограничена требованием наличия достоверных данных о состоянии барьеров и их отказах, а также влиянием человеческого фактора при подготовке исходной информации. Эти ограничения снижают универсальность и масштабируемость модели и требуют её адаптации к специфике отдельных отраслей и производственных условий.

Перспективы дальнейших исследований связаны с наращиванием статистической базы, созданием программного модуля на основе предложенной модели, а также применением современных технологий мониторинга технического состояния объектов и методов машинного обучения для автоматизации сбора и обработки данных. Реализация указанных направлений позволит обеспечить непрерывный контроль состояния барьеров безопасности и повысить точность оценки вероятности реализации опасности.

Таким образом, предложенный подход обладает практической значимостью для управления риском травмирования персонала и может способствовать снижению уровня производственного травматизма.

#### Список литературы / References

1. Бисенгалиев А., Дауталин К.А., Митрофановская Ю.В., Мариныч О.В., Шамсутдинова К.Н. Обзор мировых тенденций в области охраны труда и здоровья работников, снижения и предупреждения случаев производственного травматизма с позиции мониторинга профессиональной пригодности. *Национальная ассоциация ученых*. 2024;99:21–26.

Bissengaliyev A, Dautalin DA, Mitrofanskaya YuV, Marynich OV, Shamsutdinova KN. Overview of Global Trends in Occupational Safety and Health of Employees, Reduction and Prevention of Occupational Injuries from the Standpoint of Monitoring Professional Suitability. *National Association of Scientists*. 2024;99:21–26. (In Russ.)

2. Haddon WJr. Energy Damage and the 10 Countermeasure Strategies. *Injury Prevention*. 1995;1(1):40–44. <https://doi.org/10.1136/ip.1.1.40>

3. Жуков И.С. Барьеры безопасности: понятие, классификация, концепции. *Безопасность труда в промышленности*. 2017;1(5):49–56. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-5-49-56>

Zhukov IS. Safety Barriers: Notion, Classification, Concepts. *Occupational Safety in Industry*. 2017;1(5):49–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-5-49-56>

4. Пааске Б., Лисанов М.В., Сафонов В.С., Петрулевич А.А. Российско-норвежский проект Баренц-2020: гармонизация стандартов в области анализа риска. *Безопасность труда в промышленности*. 2011;1(4):11–15.

Paaske B, Lisanov MV, Safonov VS, Petrulevich AA. The Russian-Norwegian Barents 2020 Project: Harmonization of Standards in the Field of Risk Analysis. *Occupational Safety in Industry*. 2011;1(4):11–15. (In Russ.)

5. Nima Khakzad, Faisal Khan, Paul Amyotte. Dynamic Risk Analysis Using Bow-Tie Approach. *Reliability Engineering & System Safety*. 2012;104:36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.04.003>

6. de Ruijter A, Guldenmund F. The Bowtie Method: A Review. *Safety Science*. 2016;88:211–218. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>

7. Willey RJ. Layer of Protection Analysis. *Procedia Engineering*. 2014;84(1):12–22. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.405>

8. Darwish AS, Mansour MS, Farag H, Ezzat KH. Applying LOPA and Fuzzy Logic to Identify SIL Requirement for Safety Critical Functions in a Direct Reduction Iron Industry. *Alexandria Engineering Journal*. 2020;59(5):3575–3585. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.003>

9. Федорец А.Г. Практическая реализация современных принципов риск-менеджмента в национальном стандарте ГОСТ Р 12.0.011–2017. *Безопасность и охрана труда*. 2018;1(4):10–15.

Fedorets AG. Practical Implementation of Modern Principles of Risk Management in the National Standard GOST R 12.0.011–2017. *Bezopasnost' i Okhrana Truda*. 2018;1(4):10–15. (In Russ.)

10. Маженов С.А. Формализованный подход к оценке экономической эффективности мероприятий по охране труда. *Экономика труда*. 2022;9(8):1295–1306. <https://doi.org/10.18334/et.9.8.114790>

Mazhkenov SA. A Formalized Approach to Assessing the Economic Effectiveness of Labour Protection Measures. *Russian Journal of Labour Economics*. 2022;9(8):1295–1306. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/et.9.8.114790>

11. Balmert PD. *Alive and Well at the End of the Day: The Supervisor's Guide to Managing Safety in Operations*. New York: John Wiley & Sons; 2010. 274 p.

12. Friis RH. *Occupational Health and Safety for the 21st Century*. Burlington, MA: Jones & Bartlett Learning; 2020. 429 p.

13. Карначев И.П., Левашов С.П., Челтыбашев А.А., Панарин В.М. О концепциях и методах оценки уровня рисков травматизма, связанных с профессиональной деятельностью работников. *Известия тульского государственного университета. Науки о земле*. 2018;1(3):94–104.

Karnachev IP, Levashov SP, Cheltybashev AA, Panarin VM. About Concepts and Methods of Assessing the Level of Risk by Injury Related to the Professional Activity of Employees. *News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2018;1(3):94–104. (In Russ.)

14. Потоцкий Е.П., Гарт В.А. Оценка риска травмирования персонала с учетом показателя профессиональной пригодности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;1(1):144–153. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-1-144-153>

Pototskii EP, Gart VA. Assessment of the Risk of Injury of Personnel Taking into Account the Indicator of Professional Suitability. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;1(1):144–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-1-144-153>

15. Маженов С.А. Оценка и управление профессиональными рисками на основе модифицированного метода контрольных листов. *Экономика труда*. 2023;10(12):2145–2156. <https://doi.org/10.18334/et.10.12.119798>

Mazhkenov SA. Assessment and Management of Occupational Risks Based on the Modified Checklist Method. *Russian Journal of Labour Economics*. 2023;10(12):2145–2156. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/et.10.12.119798>

#### Об авторах:

**Виктория Алексеевна Гарт**, аспирант, кафедра «Техносферной безопасности» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.), [SPIN-код](mailto:SPIN-код), [ORCID](https://orcid.org/), [gart\\_v@mail.ru](mailto:gart_v@mail.ru)

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

*About the Authors:*

**Victoria A. Gart**, Postgraduate Student of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Ave, building 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [gart\\_v@mail.ru](mailto:gart_v@mail.ru)

***Conflict of Interest Statement:*** the author declares no conflict of interest.

***The author has read and approved the final version of manuscript***

**Поступила в редакцию / Received** 22.12.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 16.01.2026

**Принята к публикации / Accepted** 28.01.2026