

Статья

Инновационное решение для оценки безопасности строительной площадки На основе интеграции байесовской сети и аналитических Иерархический процесс

Лицжао Сяо 1,*¹, Ллевеллин СМ Тан  2 и Я Вэнь

¹ Департамент недвижимости и строительства, факультет архитектуры, Университет Гонконга, Покфулам, Гонконг, Китай; lcmtang@hku.hk

² Инженерный факультет Кембриджского университета, Кембридж CB2 1PZ, Великобритания; yw710@cam.ac.uk

* Переписка: u3008759@connect.hku.hk

Аннотация: Строительная отрасль материкового Китая отличается одним из самых высоких показателей аварийности и количества погибших. Таким образом, оценка риска играет важную роль в предотвращении инцидентов безопасности и экономических потерь. Однако традиционные методы оценки риска в основном основаны на опыте, что может привести к значительной неопределенности при оценке цепочки аварий, количественном анализе и обращении с неопределенностью. Несчастные случаи, связанные с безопасностью, трудно оценить, что может привести к принятию неправильных решений, связанных с безопасностью. Для решения этой проблемы была разработана инновационная стратегия количественного анализа, генерирующая индекс потерь для различных аварий на строительной площадке на основе решения байесовской сети и процесса аналитической иерархии. В этом решении можно рассчитать степень вклада каждого фактора риска в определенную аварию. На их основе можно рассчитать индекс потерь для каждой строительной площадки, введя текущие факторы риска на строительной площадке. Более того, можно оценить индекс потерь в режиме реального времени, что может помочь управленческой команде более точно принимать решения по сравнению с традиционными методами. С помощью этой модели можно уточнить ситуацию с безопасностью на строительной площадке и проанализировать приоритет риска в соответствии с динамическим состоянием.

Ключевые слова: байесовская сеть; АХП; оценка безопасности строительства; оценка риска; количественный анализ рисков



Цитирование: Сяо, Л.; Тан, ЛСМ; Вэнь, У. Инновационная строительная площадка

Решение для оценки безопасности, основанное на интеграции байесовской сети и процесса аналитической иерархии. Здания 2023, 13, 2918. <https://doi.org/10.3390/buildings13122918>.

Академические редакторы: Абдулкадри Аде Билау и Эмлин Уитт

Поступила: 19 октября 2023 г.

Пересмотрено: 16 ноября 2023 г.

Принято: 17 ноября 2023 г.

Опубликовано: 23 ноября 2023 г.



Копирайт: © 2023 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Точная оценка рисков безопасности при строительстве зданий всегда является важной темой в строительной сфере. Показатели безопасности строительства зданий в Китае по-прежнему хуже, чем в других развитых странах [1]. В одном строительном проекте участвуют многочисленные команды и заинтересованные стороны. В строительной отрасли Китая рабочие-мигранты составляют большинство многочисленных строительных бригад, причем, по данным Национального бюро статистики в 2021 году, на долю лиц в возрасте 50 лет и старше приходится 24,6% этой рабочей силы [2]. Старение строительных рабочих представляет собой серьезную проблему. Этот демографический сдвиг подчеркивает необходимость немедленного целенаправленного вмешательства в протоколы безопасности и стратегической переоценки существующей практики для обеспечения благополучия этого старшего сегмента рабочей силы. В 2019 году произошло 773 несчастных случая в строительстве и 904 человека со смертельным исходом [3]. Следовательно, управление безопасностью строительства требует повышенного внимания и усиленных стратегий для адаптации к текущей ситуации. Точная оценка рисков безопасности может снизить количество несчастных случаев среди работников и избежать существующих проблем.

В настоящее время большая часть исследований сосредоточена на анализе рисков и обосновании несчастных случаев. Однако он редко предлагает практическое и целенаправленное решение для органов управления по реализации улучшенных стратегий управления безопасностью. В таблице 1 показано сравнительное исследование популярного метода управления на моделях прогнозирования и управления безопасностью и рисками. Байесовская сеть (BN) и процесс аналитической иерархии (АНП) предложены

этот документ для использования в качестве комплексного решения для анализа рисков в строительной отрасли. BN определяется как вероятностная графическая модель, представляющая ряд переменных, состоящих из узлов и ребер, через ориентированный ациклический граф (DAG) [4]. А АНР — это многокритериальная стратегия проектирования, которая используется для решения сложных задач с иерархическим анализом [5]. Благодаря интегрированному методу BN-АНР ситуацию с безопасностью строительства можно легко и точно оценить с принятием решений в режиме реального времени.

Таблица 1. Сравнительный анализ стратегий управления безопасностью.

Исследовать	Управление безопасностью Стратегия	Описание	Ограничения
[6]	Всесторонний Причины несчастных случаев Модель	Предоставить полный обзор потенциальных причин несчастных случаев.	Комплексная, но слишком сложная для предоставления результатов оценки в режиме реального времени.
[7]	Три типа Модель опасности	Обеспечьте детальную основу для опасностей идентификация и оценка риска	Недостаточно учитывает перекрестное влияние причин аварий
[8]	Причина несчастного случая Модель «2–4»	Анализировать и классифицировать причинные факторы несчастных случаев в управляемую структуру.	Слишком полагается на первоначальную категоризацию, не может приспособиться в реальном времени к условиям на месте.
[9]	Интеграция – Динамическая Государственная авария Причинно-следственная модель	Объединяет факторы и динамику причин аварий	Сложность модели может препятствовать практическому применению и реагированию в режиме реального времени.
[10]	Модель «Дерево типа» Причина аварии	Организует причины несчастных случаев в иерархическом порядке.	Может не отражать сложные взаимозависимости между причинами.

В данной статье основное внимание уделяется следующим целям: а. выявление прямых индикаторов риска и косвенных индикаторов риска строительных аварий, б. прогнозирование индекса экономических потерь для оценки строительного риска на основе анализа доли и серьезности каждого из показателей риска с помощью метода BN-АНР, и с. проверка применимости модели экономических потерь. Для достижения вышеуказанных целей в первую очередь анализируются существующие методы оценки рисков. И BN, и АНР широко используются при оценке рисков и управлении безопасностью в различных отраслях промышленности. Однако мало исследователей применяют комплексное решение БН-АХП для управления безопасностью в строительной отрасли из-за сложности строительной площадки. В следующем разделе представлено интегрированное решение BN-АНР, включая сбор данных, анализ BN-АНР и проверку модели.

Перспективы человека, машины, материала, метода и окружающей среды (4M1E) выбраны в качестве пяти критериев в модели АНР для оценки серьезности аварии при управлении безопасностью строительства. Дополнительно представляются и обсуждаются поэтапные результаты. Кроме того, были проанализированы преимущества и ограничения модели. При условии сбора большего количества данных по проекту эта модель оценки безопасности может быть дополнительно оптимизирована на следующем этапе исследования. В этом исследовании автор собрал события аварий на строительной площадке и извлек из базы данных факторы риска. Эта модель способствует способности отдела управления осуществлять своевременную корректировку стратегии управления безопасностью. В результате может быть достигнута дальнейшая оптимизация инвестиций и бюджета на управление безопасностью строительной площадки. В то же время модель можно установить в качестве модуля безопасности и разместить на онлайн-платформе управления строительными проектами (т. е. в цифровой системе надзора за работами) для формирования оценки безопасности всего хода строительства в режиме реального времени.

В настоящее время управление безопасностью на строительной площадке отсутствует системное управление сверху донизу. В основном это зависит от личного опыта руководителей проектов и персонала по управлению безопасностью. Однако качество персонала по управлению безопасностью неравномерно, точный метод мер безопасности также невозможно определить в режиме реального времени, и сотрудники службы безопасности могут принимать разные суждения, что делает процесс крайне неэффективным. Менеджеру по безопасности предоставляется несколько конкретных стратегий управления безопасностью, основанных на убедительном анализе данных. Новаторство данного исследования заключается в его количественном анализе факторов, способствующих распространению инцидентов, связанных с безопасностью в строительном секторе. Используя эту количественную оценку, в документе разрабатывается модель оценки рисков, которая позволяет менеджерам по безопасности устанавливать экономические последствия, связанные с различными стратегиями снижения рисков. Эта модель служит краеугольным камнем для процессов принятия решений сверху вниз, позволяя авторитетным группам разрабатывать точную и основанную на фактических данных политику. Кроме того, представленная здесь модель экономических потерь предназначена для предоставления динамических рекомендаций, адаптирующихся к меняющимся условиям на строительных площадках. Гибкость и оперативность этой модели гарантируют, что она останется актуальной даже в условиях меняющихся реалий на месте, обеспечивая тем самым надежный инструмент для стратегической безопасности и финансового планирования в строительной отрасли.

2. Обзор литературы

2.1. Метод оценки риска

Современные модели оценки рисков в управлении безопасностью строительства предполагают, прежде всего, качественный и количественный анализ [11]. За последние четыре десятилетия в Китае были предложены многочисленные модели анализа аварий, такие как моделирование Монте-Карло, деревья решений, деревья отказов, FMECA, сложные сети и т. д. [12]. Более того, количественный анализ рисков (QRA) применяется во многих отраслях промышленности как метод повышения показателей безопасности [13]. Одним из наиболее известных методов анализа, который широко используется для оценки рисков в строительной отрасли, является структура 4M1E, которая состоит из человека, материала, машины, метода и окружающей среды [14–17]. Однако эффективный анализ риска должен проводиться как с учетом вероятности потенциальных аварий, так и их серьезности [18]. В частности, что касается управления безопасностью в строительной отрасли, оценка риска в первую очередь включает в себя оценку вероятности (вероятности) и потенциальных последствий (серьезности) опасностей. Такая двойная оценка помогает управленческой команде получить всестороннее понимание потенциальных рисков, расставить приоритеты и реализовать соответствующие меры по смягчению последствий [19]. В этом исследовании BN используется для завершения количественного анализа уровня риска. А АНР, основанный на структуре 4M1E, рассматривается как важный метод ранжирования факторов риска для принятия дальнейших решений в процессе управления безопасностью.

2.2. Количественная оценка риска

Преимущества внедрения методов количественной оценки риска (QRA) подчеркиваются в различных областях [20]. Кроме того, широко обсуждается проверка обоснованности количественной оценки проблем, связанных с безопасностью [13,21].

Количественные подходы также используются во многих стандартах и руководствах по управлению рисками, что дает преимущества в виде повышения эффективности управления рисками [22].

В строительной отрасли методы количественной оценки также являются основным направлением, используемым не только для оценки показателей безопасности, но и для прогнозирования строительной деятельности высокого риска на основе данных об авариях [23,24]. Кроме того, тяжесть строительных работ с высоким риском можно проанализировать, обеспечив подтверждение факторов риска с помощью QRA [25].

Прошло около 30 лет с тех пор, как QRA впервые была применена к широким технологическим системам. Первоначально при оценке уровней безопасности с использованием QRA обычно использовался восходящий метод. В настоящее время современные оценки рисков QRA перешли к нисходящему подходу. Его цель – ответить на три вопроса, включая причину риска, его вероятность и каковы его последствия. Помимо этого, некоторые авторы также выступали за оценку воздействия риска.

в том числе и с финансовой точки зрения. Было предложено использовать «стоимость риска» в качестве модели риска общего масштаба PI (вероятность-воздействие) [26,27]. Предложено еще одно уравнение количественной оценки риска, которое показывает, что риск тесно связан с опасностью и воздействием. Это подчеркивает, что стратегии решения проблем безопасности строительства направлены на максимальное улучшение этих двух пунктов.

2.3. Процесс аналитической иерархии

Взаимосвязь серьезности рисков можно проанализировать на основе модели АНР. Впервые он был представлен в 1968 году и позже разработан Саати [28]. Модель АНР обычно используется в теории принятия решений и учитывает противоречивые, измеримые и абстрактные критерии [29,30]. Парные сравнения применяются в методе МАИ. Выбранные критерии подвергаются анализу их весов и приоритетов для расчета зависимости серьезности между различными рисками [5]. Критерии, относящиеся к ключевым вопросам, классифицируются, а затем формируются в иерархию. Оценка риска для охраны труда и промышленной безопасности проводилась на основе пифагорейской нечеткой МАИ и системы нечеткого вывода [31]. Кроме того, ранжирование рисков на основе метода АНР также проводится Герландтом, Хакзадом и Ренье [13].

В строительной отрасли доказано, что АНР может помочь разобраться в наиболее серьезных факторах при рассмотрении риска безопасности строительства [32]. Модель оценки риска падения с высоты проанализирована Shi et al. [33]. Набор весов для 4 категорий и 23 подкатегорий устанавливается на основе метода МАИ. Оценка риска является начальным шагом оптимизации управления безопасностью. Важно проанализировать соотношение серьезности рисков, чтобы власти могли принять обоснованные решения в дальнейшем управлении безопасностью, включая планирование работ и бюджетный контроль. Хотя АНР оказался эффективным методом, существует лишь несколько исследований по использованию АНР в методах оценки критических рисков безопасности в строительных проектах [34,35].

2.4. Оценка риска на основе байесовской сети (BN). BN

представлены в виде ориентированных ациклических графов. Они состоят из узлов и линий, представляющих переменные, а также их направленную связь. Этот метод позволяет выражать неопределенности и вероятностные события. Более того, этот подход позволяет провести первоначальную сортировку причинно-следственных связей [36]. Луу и др. [37] не рассматривали риск как атрибут проекта; вместо этого они смоделировали это как вероятность задержки строительного проекта. Кроме того, Байесовская сеть убеждений (BBN) моделирует взаимосвязь между рисками, вызывающими задержку проекта, и количественно определяет вероятность такой задержки. Для определения факторов безопасности и риска, кроме BN, используется несколько методов, таких как дерево отказов (FT), модель галстука-бабочки, SVM (машина опорных векторов) и ANN (искусственные нейронные сети). Среди них BN известны своей эффективностью в количественной оценке и формулировании неопределенных знаний [29,38–41].

Многие исследователи используют BN при анализе безопасности и рисков в строительных проектах. Сюэ и др. [11] применяют BN для выявления критических и чувствительных факторов безопасности строительства. Он также используется для реализации оценки риска жизненного цикла прогиба стенки диафрагмы, включая контроль до, во время и после аварии [36]. Кроме того, Чжан и др. [4] разработали метод анализа BN для реализации дедуктивных и абдуктивных рассуждений, чтобы повысить вероятность успешного проекта в непредсказуемых и сложных условиях объекта. В данном исследовании BN применяется для непрерывного анализа конкретных причинных факторов строительных аварий, причинно-следственных связей между факторами и их условных вероятностных распределений.

Хотя метод БН-АХП широко применяется при управлении рисками, например, при морских катастрофах [42] и в горнодобывающей промышленности [41], в строительной отрасли он применяется редко из-за своей сложности. Однако выявление потенциальных рисков имеет решающее значение для менеджеров проектов, поскольку оно способствует более гибкому и устойчивому управлению строительными проектами. В этом исследовании предлагается инновационный метод для генерации в реальном времени как вероятности потенциального риска, так и распределения факторов риска, используя интегр

3. Методология

Методология данного исследования состоит из сбора данных, модели на основе BN-AHP. процесс создания и проверки (см. рисунок 1). Во-первых, образец и проверка данные этого исследования собраны из отчетов по безопасности строительной отрасли в материковый Китай. Эти отчеты публикуются на официальных сайтах и во избежание предвзятости, рассматриваются только обычные аварии, вызванные проблемами безопасности строительства. Отчеты предоставить полную информацию о цепочках аварий, включая как прямые, так и косвенные факторы, способствующие несчастным случаям, что позволяет избежать субъективных предположений и повысить эффективность точность модели. Эта извлеченная структурная информация затем синтезируется для последующего включение в структуру BN и AHP.

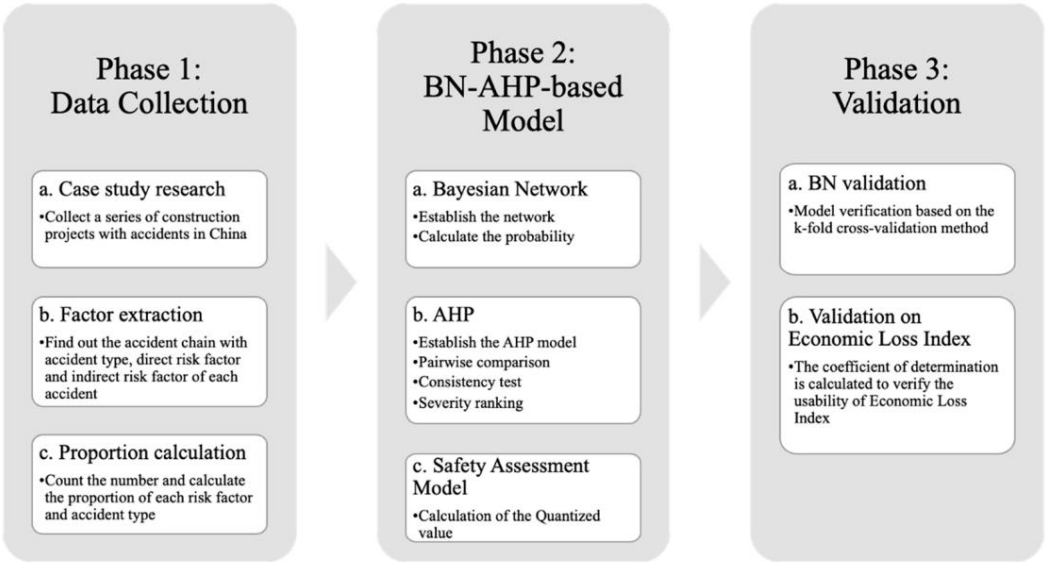


Рисунок 1. Методология исследования.

4. Создание модели оценки рисков BN-AHP

На втором этапе собранные данные помещаются в BN для расчета вероятности. Факторы риска и типы происшествий, согласно приведенной ниже формуле Байеса (уравнение (1)), собранные данные включают: 4.1. Сбор данных .

Сбор данных этого исследования направлен на выявление цепочки происшествий, прямого фактора, и косвенный фактор. Кроме того, он включает в себя подсчет количества и доли каждой формулы Байесовской сети (1) [38]. фактор риска и тип происшествия из собранных отчетов об авариях в Китае. Эти отчеты P(B|A)/P(A) собираются на основе правительственных веб-сайтов, баз данных о происшествиях, связанных с безопасностью интервью с руководителями проектов и менеджерами по безопасности. Предполагается, что для получения исходных данных, которые будут использоваться, будет собрано около 1000 отчетов о происшествиях, связанных с безопасностью строительства. $P(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n) = P(X_i = x_i | X_{i+1} = x_{i+1}, \dots, X_n = x_n)$ для обучения моделированию и K-кратной перекрестной проверки. я-1

Собранные отчеты о несчастных случаях собираются с официальных сайтов фактора риска A = B = тип аварии: X1, X2, X3, ..., Xn = случайные величины. правительство [44]. Каждая авария описывается в одном отчете по безопасности конкретной аварии . На следующем этапе используется метод парного сравнения AHP. Оцениваемая тип с его прямыми и косвенными факторами. Распределенная область отчетов показана в критериях, вытекающих из структуры 4M1E, которая влечет за собой сбор данных с помощью вопросов (рис. 2), и эти отчеты использовались для моделирования построения модели. наеры, отражающие практический опыт. Таким образом, степень тяжести аварии типы генерируются. По результатам методов БН и МАИ получен индекс потерь каждый косвенный фактор рассчитывается путем умножения вероятности возникновения каждого типа аварии и тяжесть каждого типа аварии. Среди них вероятность возникновения каждого косвенного фактора привести к каждому типу аварии рассчитывается на основе BN и тяжести каждой аварии тип ранжируется путем парного сравнения AHP. Доказано, что косвенными факторами являются обычно генерируется уязвимостями управления и может контролироваться службой безопасности сайта. или менеджеры проектов в некоторой степени. Количественная оценка индекса потерь от косвенных факторов более ценно, чем количественная оценка прямых факторов, которые могли бы поддержать управление уровне с принятием решений в практических условиях.

Рисунок 2 и эти отчеты использовались для моделирования построения модели.

Из них из 1000 отчетов выделяются пять типов аварий (A1–A5). Они падение с высоты (A1), оползень (A2), удар предмета (A3), поражение электрическим током (A4), и механические повреждения (A5). Для этих типов аварий суммируется, что «падение с высоты» — наиболее частая из показанных в этих отчетах ситуаций, занимающая почти половина выборочных данных (конкретное количество типов аварий показано на рисунке 3). Такие инциденты обычно случаются, когда рабочие выполняют задачи на высоте, например, на строительные леса, лестницы или крыши без принятия адекватных мер по предотвращению падения механизмы. Прямые индикаторы заметны и включают отсутствие защиты от падения оборудования, такое как перила и защитные сетки, или неиспользование индивидуальных систем защиты от падения. Косвенные показатели включают в себя пренебрежение организацией мерами по защите от падения, недостаточную

выборочные данные (конкретное количество типов аварий показано на рисунке 3). Su обычно возникает, когда рабочие выполняют задачи на высоте, например, на строительных лесах или на крышах, без применения адекватных механизмов предотвращения падения. Индикаторы включают отсутствие перил и защитных сеток для защиты от падения или неспособность использовать средства индивидуальной защиты от падения. системы задержания. К недостаткам относятся организационное игнорирование мер по защите от падения, недостаточное обучение опасностям, связанным с высотными работами, а также отсутствие всестороннего

образование относительно опасностей в условиях работы. Отсутствие информации об опасностях, анализ. Оползни (A2) и оползневые откосы являются собой значительный строительный риск. Они могут раскопки или естественные движения грунта, которые представляют собой потенциальный риск для рабочих. Они могут быть вызваны землетрясениями, разрушениями, целостности конструкций, потенциальными причинами образования трещин грунта, проседания грунта или нарушения целостности опорных конструкций выемки грунта. Случаи ударов рабочими предметами (A3) повторяются в средах, где материалы перемещаются над уровнем земли. Этот риск характеризуется незакрепленными инструментами или материалами, которые могут упасть, а также отсутствием защитных конструкций, таких как сетки или формы для незакрепленные инструменты или материалы, которые могут упасть, а также отсутствием защитных средств. мусора. Кроме того, травмы, вызванные поражением электрическим током (A4), представляют собой серьезную проблему в строительстве и часто являются следствием контакта с источниками электрической энергии или использование неисправного оборудования. Механические повреждения (A5) в строительстве часто представляют собой отказы механических систем или неисправность оборудования. Повреждение (A5) в строительстве часто является результатом неисправности механических систем или оборудования, приводящая к тяжелым последствиям, включая размоложение или травматическую ампутацию.

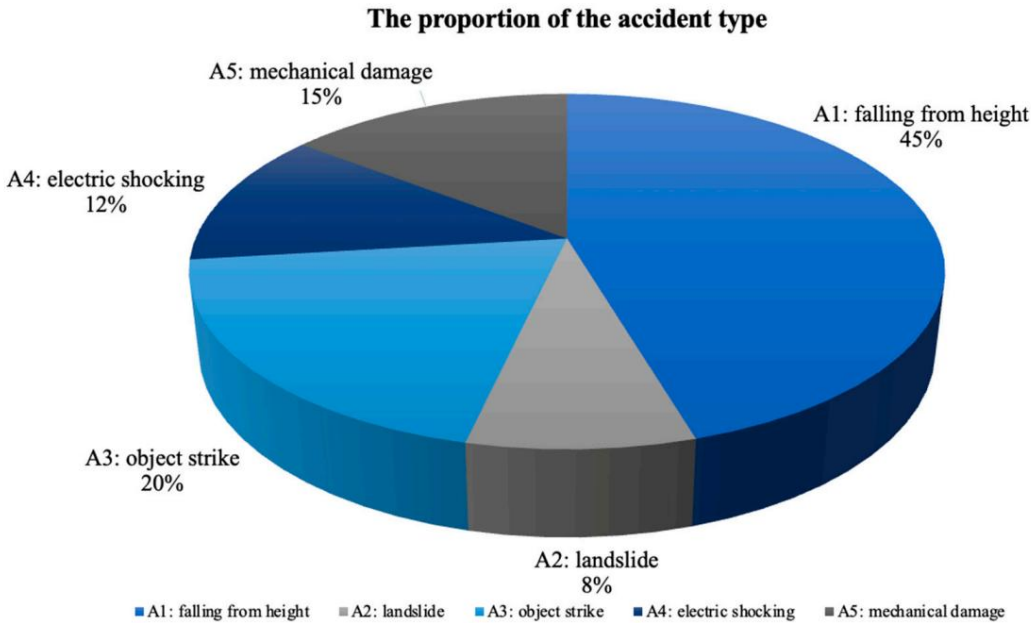


Рисунок 3. Доля типов аварий.

На основе анализа пяти видов аварий составлена аннотация прямых и косвенных факторов приведена в таблице 2. Она также извлечена из аварии на производстве, выпущенного правительством, а не субъективны, и обобщены авторами для доклад, выданный правительством, а не субъективный и обобщенный, обеспечивает исследовательскую нейтральность. В каждом отчете обычно присутствуют один-два прямых и три косвенных фактора, вызвавших заявленную аварию. В этой статье прямой вокруг трех косвенных факторов, вызвавших заявленную аварию. В этом документе факторы представлены D1–D6, а косвенные факторы показаны Ind1–Ind7.

факторы представлены D1–D6, а косвенные факторы показаны Ind1–Ind. В области безопасности строительства факторы и несчастные случаи. причинные факторы несчастных случаев представлены в таблице 2. Аннотировать косвенные факторы, прямые

переплетение прямых и косвенных элементов, которые образуют сложную картину из г	
Косвенный фактор	Прямой фактор
факторов, таких как захламленная строительная площадка, занятость персонала	
Захламленная строительная площадка Ind1	D1 отсутствие защитных средств
Ind2 без строительной квалификации	D2 незаконная операция
Ind3 отсутствие обучения технике безопасности	Земляные работы D3
Ind4 нет стандартных средств защиты	D4 без лицензии
Ind5 без раскрытия информации о безопасности	Старение материала D5
Ind6 нет завершенной системы безопасности	D6 без защиты кромок
Ind7 нет эффективного надзора	

В сфере безопасности строительства причины аварий разнообразны. взаимосвязь прямых и косвенных элементов, образующих сложную картину риска. Косвенный такие факторы, как загроможденная строительная площадка, прием на работу персонала, не обладающего необходимыми строительная квалификация, отсутствие критической подготовки по технике безопасности и дефицит стандартных Защитные поставки демонстрируют фундаментальное пренебрежение к культуре безопасности. отсутствие раскрытия информации о безопасности усугубляет этот сценарий, скрывая важную информацию. относительно существующих опасностей, в то время как отсутствие законченной системы безопасности и эффективных надзор не в состоянии остановить это сползание к небезопасным практикам. И наоборот, прямые факторы сокращают более внимательно к непосредственным причинам несчастных случаев. Отсутствие необходимых защитных оборудование делает рабочих уязвимыми перед грубыми опасностями строительной среды. Более того, незаконные операции без надлежащих лицензий, часто игнорирующие безопасность ради скорости, подготовили почву для серьезных аварий. Эти прямые факторы усугубляются использованием материалов, страдающих от возрастного износа и зловещего отсутствия краев защита при работе на высоте, каждое из которых является потенциальным предвестником катастрофической аварии. Вместе, эти факторы подчеркивают опасный упущение в управлении безопасностью, брешь в системе контроль опасностей, который может спровоцировать целый ряд несчастных случаев, от незначительных до смертельных, в строительном секторе. Таким образом, эффективное смягчение последствий зависит от гармоничного сочетания строгое соблюдение правил техники безопасности, повсеместное обучение технике безопасности и непоколебимое приверженность активной культуре безопасности, каждая из которых является незаменимой опорой в защите благополучие строительного персонала.

4.2. Анализ данных с помощью модели BN и ANP

4.2.1. Байесовская сеть (БН)

BN также известен как Belief Networks или модели DAG. Подходит для принятия решений что условно зависит от множества контролирующих факторов. Между тем, это может сделать выводы из большого количества различных знаний и информации. Согласно собранным отчеты об авариях на производстве, опубликованные на государственных сайтах, причинно-следственные цепочки после аварии извлекают и строят сеть БН.

Сеть DAG (см. рисунок 4) создана, включая восемь вышеупомянутых косвенных факторы, шесть прямых факторов и пять типов аварий, собранных на этапе 1.

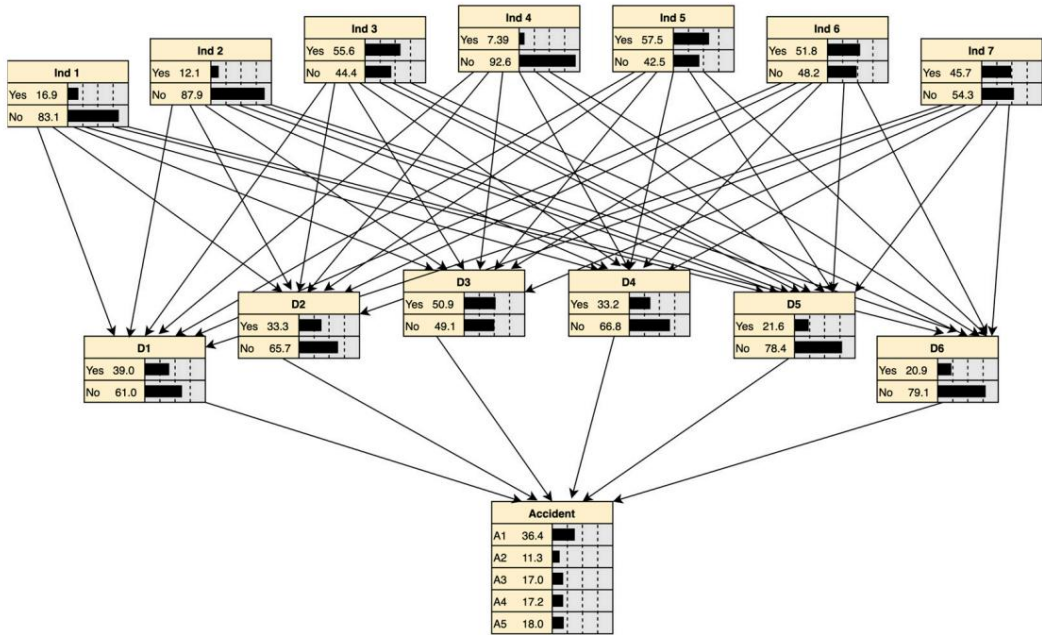


Рисунок 4. Пример DAG.

Согласно методологии исследования, вероятность каждого косвенного фактора рассчитывается путем импорта собранных данных (факторов риска и типов проектов) в BN. Как показано в таблице 3, рассчитывается вероятность каждого отдельного фактора риска, вызвавшего аварию.

Таблица 3. Таблица распределения вероятностей (%).

Согласно методике исследования вероятность каждого косвенного фактора должна быть равна рассчитывается путем импорта собранных данных (факторов риска и типов проектов) в BN. Как показано в таблице 3 представлена вероятность каждого отдельного фактора риска, вызвавшего аварию.

Таблица 3. Таблица распределения вероятностей (%).

	A1	A2	A3	A4	A5
Инди1	38,2	13,9	15,3	17,7	15,0
Инди2	27,4	17,0	17,9	21,2	16,4
Инди3	40,3	11,8	18,8	17,0	12,0
Инди4	35,3	12,7	17,3	21,4	13,3
Инди5	39,0	9,3	14,4	14,3	23,0
Инди6	28,4	14,3	22,5	19,6	15,2
Инди7	39,4	12,2	15,8	17,2	15,4

4.2.2. Процесс аналитической иерархии (АНР)

Поскольку каждый проект имеет свои особенности, одинаковых инцидентов безопасности быть не может. Даже в случае одного и того же типа инцидента безопасности потери не будут одинаковыми. Поэтому, трудно выполнить объективный расчетный метод для оценки тяжести. МАИ - это метод субъективной оценки, который показывает преимущество полного использования экспертных знания в области оценки инцидентов безопасности. В данном исследовании модель АНР состоит из четыре шага.

Вводные данные для парного сравнения собираются из анкеты отраслевые практики. Для заполнения анкет приглашены 10 практиков. Справочная информация об интервьюируемых представлена в Таблице 4. анкета основана на оценке двух из пяти критериев (4M1E) по каждому типу аварии (от A1 до A5). Приглашенные специалисты будут оценивать строгость критериев. к каждому типу несчастного случая, используя диапазон баллов от 1 до 9. Среди них 9 соответствует наиболее тяжелым причина, вызвавшая соответствующую аварию. Например, если практикующим специалистам требуется Чтобы оценить уровень серьезности «Человек» и «Материал», вызывающий A1, пример вопроса: «Как вы думаете, какова серьезность несчастных случаев при падении, вызванных «Человеком» и «Материалом»?». Полный набор анкет в данной статье опущен.

Таблица 4. Справочная информация опрошенных.

Количество интервьюируемый	Позиция	Рабочий период, соответствующий Работы по обеспечению безопасности объекта (год)
1	Руководитель проекта	7
1	Руководитель проекта	10
1	Руководитель строительства	2
2	Руководитель строительства	6
2	Менеджер по безопасности	7
3	Менеджер по безопасности	5

С помощью этого метода создается и демонстрируется модель иерархической структуры. на рисунке 5. Аварии выбираются по причинам и типам, после чего производится МАИ. построен на основе этих элементов.

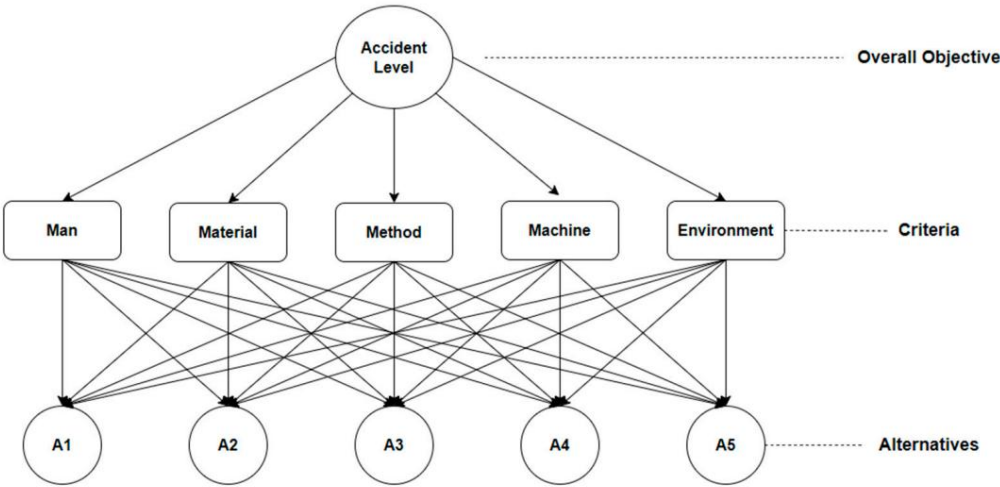


Рисунок 5. Модель иерархической структуры.

1. Подтверждение структуры МАИ

Рисунок 5. Модель иерархической структуры.

Во-первых, проблема должна быть структурирована в иерархическую структуру, основанную на общие цели, критерии и альтернативные типы аварий (см. рисунок 5). Метод попарного сравнения проводится среди пяти факторов 4М1Е в методе парного сравнения среди пяти факторов 4М1Е в пять типов аварий (от А1 до А5). Он должен включать совокупные коэффициенты безопасности по пяти типам аварий (от А1 до А5). Он должен включать в себя собранные коэффициенты безопасности, полученные в результате аварии, отчеты и интервью с менеджерами по безопасности. На следующем этапе используются отчеты матрицы сравнения и интервью с менеджерами по безопасности. На следующем этапе матрица сравнения среди критериев 4М1Е (см. Таблицу 5), проводится парное сравнение среди критериев 4М1Е (см. Таблицу 5), а также парное сравнение среди критериев 4М1Е (см. Таблицу 5), а также парное сравнение среди критериев 4М1Е (см. Таблицу 5). Типы происшествий по каждому критерию также показаны в таблице 6. Оцениваются баллы. в зависимости от того, одинакова ли степень серьезности, и если да, то ей присваивается 1 балл. В случае, если степень тяжести одинакова, и если они одинаковы, то ей присваивается 1 балл. Если степень серьезности выше, будет присвоен больший балл. Если степень серьезности выше, будет присвоен больший балл.

2. Построение матрицы сравнения. Таблица 5. Попарное

сравнение критериев 4М1Е

для каждого набора элементов на данном уровне должна быть создана матрица сравнения (А), в которой каждый элемент попарно сравнивается с другими на этом уровне, обычно с использованием шкалы от 1 до 7 для обозначения их относительной важности.

Мужчина	1				
Материал		1			
Метод			1		
Машина				1	
Среда					1

Таблица 6. Попарное сравнение типов аварий по каждому критерию.

Несчастный случай	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1				
A2		1			
A3			1		
A4				1	
A5					1

2. Построение матрицы сравнения.

Для каждого набора элементов на заданном уровне должна быть создана матрица сравнения (А), где каждый элемент попарно сравнивается с другими на этом уровне, обычно с использованием шкалы от 1 до 7, чтобы указать их относительную важность.

На основе структуры АНР, путем парного сравнения критериев 4М1Е. и типов происшествий, сравниваются веса пяти различных типов происшествий, связанных с безопасностью. и отсортированы (см. рисунок 6). Собранные данные импортируются в модель АНР, чтобы Могут быть сгенерированы веса и ранжирование серьезности.

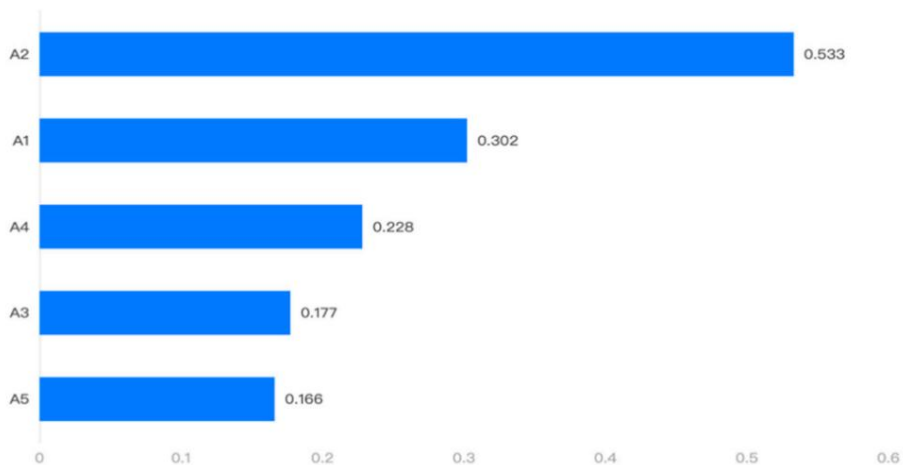


Рисунок 6. Результат модели АНР.

3. Тест на согласованность
4.2.3. Оценка рисков безопасности строительства АНР

используется для проведения тестирования согласованности, чтобы гарантировать логическую последовательность В этом исследовании риски безопасности строительства оцениваются с помощью эталонной матрицы квантованный индекс потерь. Результат индекса потерь по каждому фактору рассчитывается с помощью суждений. В методе АНР λ рассматривается как максимальное собственное значение для вычисления вероятности, умноженная на серьезность (см. уравнение (4)). Уравнение (4) Индекс потерь каждого косвенного фактора [4,19]. CI может быть определен в уравнении (2).

$$\text{Уравнение (2) Проверка согласовности} \quad \begin{matrix} 1, 2, \dots, 5) & 1, 2, \dots, 5) \\ (n = 1, 2, \dots, 7) \lambda \end{matrix} \quad (4)$$

Основываясь на приведенном выше результате метода БН-АХП, индекс потерь каждого косвенного фактора можно рассчитать на основе предложенного уравнения. Как показано на рисунке 7, результат где CI = индекс согласованности. рассчитанная модель показывает степень вреда, который может нанести каждый отдельный фактор риска. При этом для матрицы определенного порядка принят эталонный случайный индекс (RI) авария безопасности. Это указывает на то, что Ind3 (отсутствие обучения по технике безопасности при строительстве) имеет самый высокий коэффициент согласованности (CI) (можно определить с помощью информации о безопасности) и Ind6 (отсутствие управления безопасностью). Если $CR < 0.1$, результат является приемлемым. Система) с баллами 15,16% и 14,08% соответственно, на последнем месте находится Ind4 (нет стандартного уравнения (3) Коэффициент согласованности. средства защиты) с результатом 2,04%.

$$CR = \frac{KI}{PI} \quad (3)$$

где CR = коэффициент согласованности. RI = Случайный индекс.

4. Рейтинг серьезности

На основе предыдущих результатов ранжирование серьезности может быть сгенерировано с помощью ввод собранных данных в модель АНР (см. рисунок 6).

4.2.3. Оценка рисков безопасности строительства

В этом исследовании риски безопасности строительства оцениваются с помощью эталона квантованный индекс потерь. Результат индекса потерь по каждому фактору рассчитывается через вероятность, умноженная на серьезность (см. уравнение (4)).

Уравнение (4) Индекс потерь каждого косвенного фактора [4,19].

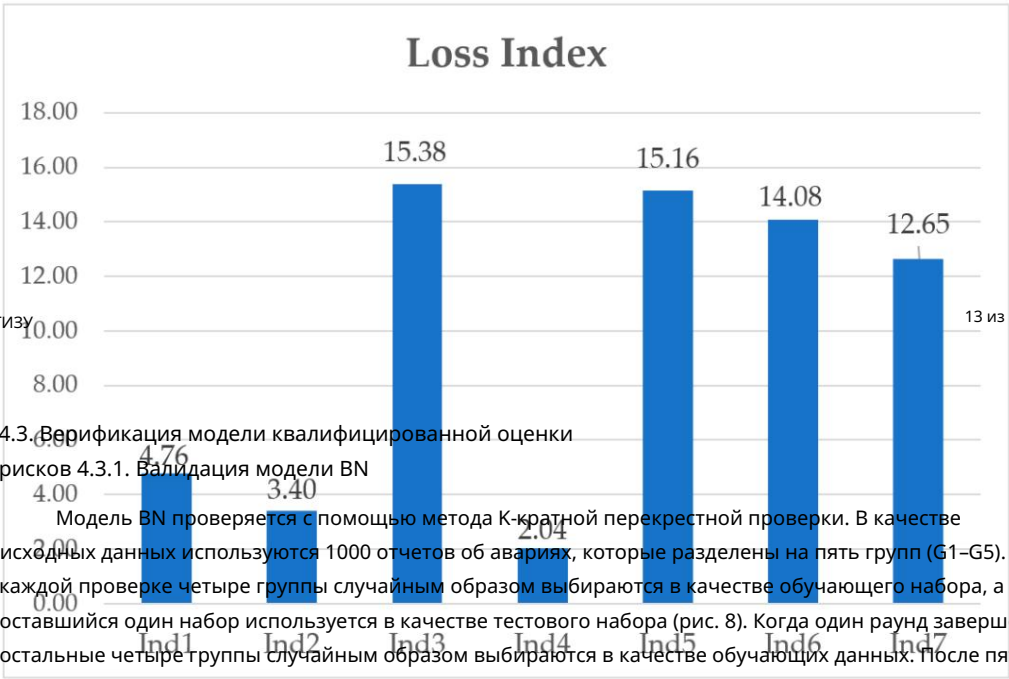
$$\text{Индекс потерь перфактор} = \text{Indn } P(A1, A2, \dots, A5) \times S^T(A1, A2, \dots, A5) \quad (4)$$

(n = 1, 2, \dots, 7)

На основе приведенного выше результата метода БН-АХП индекс потерь каждого косвенного коэффициент можно рассчитать на основе предложенного уравнения. Как показано на рисунке 7, результат рассчитанной модели показывает степень вреда, который может нанести каждый отдельный фактор риска в результате несчастного случая. Это указывает на то, что Ind3 (отсутствие обучения по технике безопасности при строительстве) имеет Рисунок 7. Индекс потерь каждого индикатора.

Здания 2023, 13, 2918 г.

На основе приведенного выше результата метода БН-АХП индекс потерь каждого косвенного коэффициента можно рассчитать на основе предложенного уравнения. Как показано на рисунке 7, результат расчетной модели показывает степень вреда, который может нанести каждый отдельный фактор риска при несчастном случае. Это указывает на то, что Ind3 (отсутствие обучения по технике безопасности при строительстве) имеет наивысший балл 15,38%, за ним следует Ind5 (отсутствие информации о безопасности информации) с баллом 15,16%, Ind6 (незавершенная система) с баллом 14,08%, Ind4 (отсутствие информации о безопасности информации) с баллом 12,65%, Ind1 (отсутствие информации о безопасности информации) с баллом 4,76%, Ind2 (отсутствие информации о безопасности информации) с баллом 3,40% и Ind7 (отсутствие информации о безопасности информации) с баллом 2,04%. Среднее значение результатов составляет 2,04%.



Здания 2023, 13, х НА ЭКСПЕРТНУЮ ЭКСПЕРТИЗУ

4.3. Верификация модели квалифицированной оценки рисков 4.3.1. Валидация модели BN
Модель BN проверяется с помощью метода K-кратной перекрестной проверки. В качестве исходных данных используются 1000 отчетов об авариях, которые разделены на пять групп (G1–G5). При каждой проверке четыре группы случайным образом выбираются в качестве обучающего набора, а оставшийся один набор используется в качестве тестового набора (рис. 8). Когда один раунд завершен, остальные четыре группы случайным образом выбираются в качестве обучающих данных. После пяти раундов выбирается функция потерь для оценки оптимальной модели и параметров.
Рисунок 7. Индекс потерь каждого индикатора
Предлагается, чтобы AUC представлял собой метрику для оценки производительности модели бинарной классификации. Когда значение AUC приближается к 1, это указывает на идеальное дис-
4.3. Верификация модели квалифицированной оценки рисков
преступности, и если оно приближается к 0,5, это означает, что оно не лучше, чем случайная классификация 4.3.1. Валидация модели BN
[43]. Путем построения модели проверки и расчета значения AUC качество модели BN проверяется значение AUC больше 0,75, это означает, что в качестве исходных данных используются отчеты модели. San-cent, которые разбиты на пять групп (G1–G5). В каждом раунде проверки посредством тестирования среднее значение AUC можно рассчитать после пяти групп (рис. табл. 7). Расчеты показывают, что среднее значение AUC и оставшийся набор используются в качестве тестового набора (рис. 8). Когда один раунд завершен, модель равна 0,85, что больше 0,75. В результате эту модель можно считать, остальные четыре группы выбраны случайным образом в качестве обучающих данных. После пяти раундов эффективен. Функция потерь выбирается для оценки оптимальной модели и параметров.

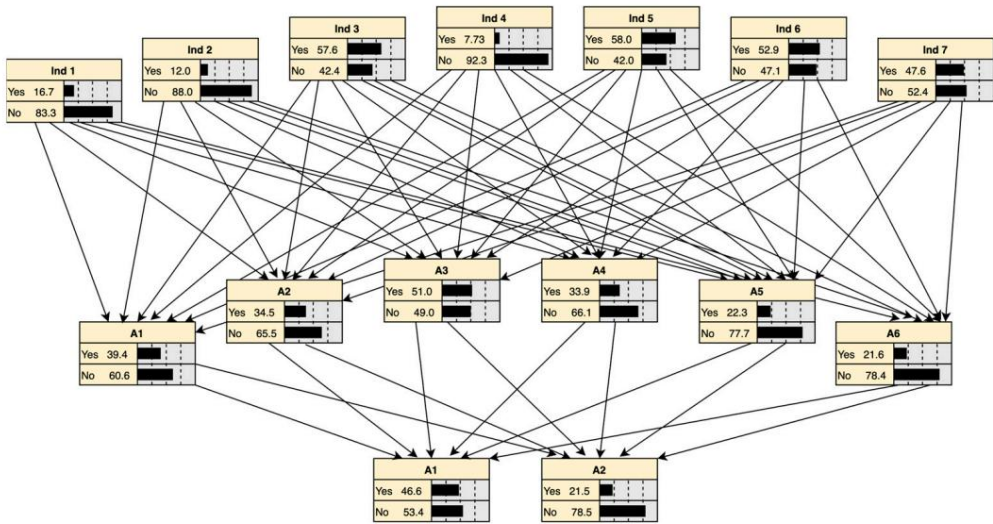


Рисунок 8. Модель проверки.

Таблица 7. Результат AUC.

Тип аварии	A1	A2	A3	A4	A5
АУК (G1)	0,96	0,83	0,91	0,81	0,95
АУК (G2)	0,91	0,84	0,90	0,66	0,89
АУК G3	0,95	0,88	0,92	0,77	0,94

AUC предлагается представлять собой метрику для оценки производительности модель бинарной классификации. Когда значение AUC приближается к 1, это указывает на идеальную дискриминацию, а если оно приближается к 0,5, это означает, что она не лучше, чем случайная классификация [43]. Построив модель проверки и вычислив значение AUC, качество Модель можно оценить. Если значение AUC больше 0,75, это означает, что модель можно принял. Посредством тестирования среднее значение AUC можно рассчитать после прохождения пяти группы (см. табл. 7). Расчет показывает, что среднее значение AUC модель составляет 0,85, что больше 0,75. В результате данную модель можно считать эффективной.

Таблица 7. Результат AUC.

Тип аварии	A1	A2	A3	A4	A5
AУК (G1)	0,96	0,83	0,91	0,81	0,95
AУК (G2)	0,91	0,84	0,90	0,66	0,89
AУК (G3)	0,95	0,88	0,92	0,77	0,94
AУК (G4)	0,94	0,83	0,83	0,68	0,90
AУК (G5)	0,94	0,79	0,90	0,66	0,89

4.3.2. Проверка удобства использования индекса потерь

В базе данных имеется 30 происшествий, связанных с безопасностью, которые случайным образом выбраны для проверить удобство использования Индекса потерь. Потенциальные факторы в каждом случае идентифицируются и экономический ущерб рассчитывается по индексу потерь. Далее проводится сравнительный анализ. проводится между прогнозируемыми значениями модели и экономическими потерями в реальных проектах. И результат представляет собой линейную корреляцию между ними.

В процессе проверки модели данного исследования двусторонний t-критерий и коэффициент определение (R2) используются для оценки статистической значимости связи между переменными и объяснительной силой модели (табл. 8). В частности, через двусторонний t-критерий, при уровне значимости 0,05 получается значение p, которое ниже стандартный порог значимости, равный $1,51 \times 10^{-21}$. Этот результат указывает на то, что Среднее выборочное значение значительно отличается от предполагаемого среднего значения генеральной совокупности. В то же время соответствующее критическое значение t составляет 2,0453, что дополнительно подтверждает значимость статистические результаты.

Таблица 8. t-тест: парные две выборки для средних значений.

	Переменная 1	Переменная 2
Иметь в виду	27.72146967	100,2
Дисперсия	0,404712386	252.16552
Наблюдения	30	30
Корреляции Пирсона	0,77709127	
Гипотетическое среднее	0	
Разница df t	29	
Stat p	25,79380293	
(T t) односторонний t	$7,53 \times 10^{-22}$	
Критический	1,699127027	
односторонний p (T t)	$1,51 \times 10^{-21}$	
двухсторонний t Критический двухсторонний	2.045229642	

Кроме того, R2 модели равен 0,6039 (см. рисунок 9), что указывает на то, что независимый Переменные объясняют 60,39% изменчивости зависимой переменной, показывая корреляцию между объясняющими переменными модели. Таким образом, в сочетании с результатами двустороннего t-критерия и анализа R2, эта исследовательская модель статистически значима и демонстрирует хорошую объяснительную силу, закладывая прочную основу для последующих теоретических исследование и практическое применение. Результаты валидации демонстрируют его потенциал как надежный инструмент прогнозирования потерь риска на строительных объектах в практических условиях.

ДФ	29
т Стат	25,79380293
р (Т т) односторонний t	7,53 × 10 ⁻²²
Критический односторонний	1,699127027
р (Т т) двухсторонний t	1,51 × 10 ⁻²¹
Критический двухсторонний	2.045229642

Здания 2023, 13, 2918 г.

14 из 17

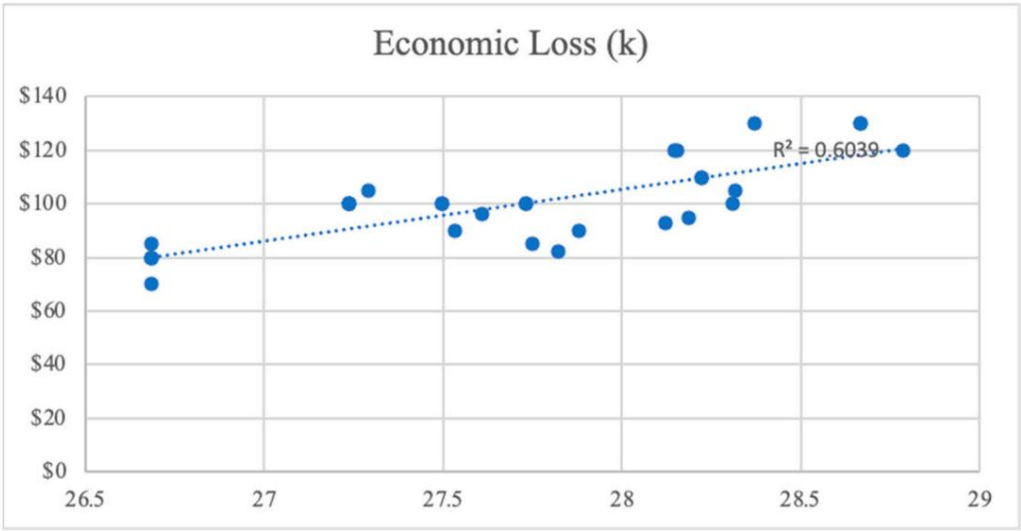


Рисунок 9. Линейная корреляция между индексом риска и прогнозируемыми экономическими потерями (k). Рисунок 9. Линейная корреляция между индексом риска и прогнозируемыми экономическими потерями (k). Рисунок 9. Линейная корреляция между индексом риска и прогнозируемыми экономическими потерями (k).

Этот практический пример служит основой для практического использования модели ИИ-АНР. Этот многообещающий подход для оптимизации управления рисками безопасности и прогнозирования потерь в различных условиях. Введенная модель может быть использована для дальнейшего улучшения результатов. Можно улучшить за счет расширения набора данных.

5. Результаты

Целью данного исследования является создание модели индекса потерь для различных индикаторов риска для безопасности. Практиков управления для оптимизации своей стратегии управления. По модели Результаты показаны на Рисунке 7. Ind3 (отсутствие обучения по технике безопасности при строительстве) имеет наивысший балл - 15,38, что указывает на то, что это наиболее вредный фактор для строительных проектов. Большинство ресурсов предлагается инвестировать в проведение обучения по технике безопасности для специалистов-практиков для реализации эффективных управление безопасностью. Ind5 (без раскрытия информации о безопасности), что составляет 15,16, занимает второе место, указывает на то, что отсутствие эффективного раскрытия информации о безопасности приводит к тому, что строители часто работая по опыту, игнорируя при этом специфику разных проектов.

6. Обсуждение

6.1. Управленческие последствия и вклад

Это исследование предлагает существенные управленческие последствия и вносит значительный вклад в области управления безопасностью строительства. Введенная модель индекса потерь, которая количественно оценивает влияние различных индикаторов риска, исследование представляет собой ключевой инструмент для обеспечения безопасности. Практики управления. Эта модель позволяет специалистам-практикам более точно настроить свое управление. стратегии максимальной эффективности. Со стратегической точки зрения предлагаемое решение является бесценным для менеджеров по безопасности, менеджеров проектов и руководителей высшего звена при организации более тонкая и эффективная стратегия управления безопасностью. Его динамичный характер с корректировками в реальном времени, отражающими фактические условия на объекте, обеспечивает адаптивный подход к безопасности. надзор. Данные ежедневных патрулей и проверок безопасности могут быть обновлены для оценки потерь. индекс в режиме реального времени, что обеспечивает гибкий и информированный процесс управления безопасностью. Это исследование позволяет менеджерам проектов и безопасности принимать превентивные меры. которые соответствуют динамическим условиям строительного проекта. Она действует как система поддержки принятия решений, предлагая авторитетные рекомендации по распределению инвестиций в безопасность. меры, которые могут принести более высокую отдачу. По сути, модель служит прагматичным рекомендации для органов власти, направляя дальнейшие инвестиции и инициативы по обеспечению безопасности, которые не только снизить риск, но и повысить экономическую эффективность, поддерживая двойную цель безопасности и экономическая эффективность управления строительными проектами.

6.2. Ограничения и предложения для будущих

исследований Одно из ключевых ограничений применимости этой модели зависит от данных по конкретному региону внутри Китая, что может ограничивать ее возможность обобщения в различных географических и культурных средах. Таким образом, последующие исследовательские усилия должны подтвердить и, возможно, перекалибровать модель с помощью более широкого международного набора данных, чтобы подтвердить ее применимость в различных контекстах строительства.

Более того, преобладание количественных данных в текущей модели может не отражать многогранную природу человеческого фактора и сложности организационной культуры в управлении рисками. Будущие исследования могут попытаться интегрировать качественные методы исследования, чтобы уловить тонкую динамику практики безопасности в строительной отрасли.

Появление цифровых технологий дает возможность повысить точность прогнозирования модели и ее оперативность в реальном времени. Будущие исследования могут изучить интеграцию алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения для создания более совершенной, прогнозирующей и адаптивной системы управления безопасностью. Более того, алгоритм моделей количественной оценки рисков может быть интегрирован в платформу управления строительными проектами. Платформа «умного строительства» — это мощный выбор, способный обеспечить своевременное управление безопасностью. Интеграция экономического индекса риска в платформу управления проектами может предоставить интуитивные и обоснованные предложения по принятию решений лицам, находящимся на уровне власти.

Наконец, экономические результаты, предусмотренные в модели, не полностью учитывают более широкие социальные последствия аварий на строительстве. Дальнейшие исследования должны выйти за рамки экономических показателей и включить социальные и психологические издержки, связанные с инцидентами, связанными с безопасностью строительства. Расширенный охват обеспечит более целостное понимание последствий безопасности строительства и будет способствовать разработке комплексных стратегий управления рисками.

7. Выводы

В этом исследовании предлагается интегрированное решение для анализа рисков и модель индекса потерь, которая принесет пользу уровню управления с помощью оптимизированных рекомендаций по управлению безопасностью. В этой статье собраны данные о реальных авариях и определены факторы риска на основе BN. На следующем этапе ANP используется для дальнейшего анализа человеческих, материальных, управленческих и экологических факторов. Благодаря сочетанию BN и ANP создается модель индекса динамических потерь, предоставляющая доказательства для принятия решений в процессе управления безопасностью. Важной особенностью этой модели является оценка условий безопасности проекта в режиме реального времени на основе содержания ежедневно собираемого рабочего журнала. В зависимости от хода строительства план безопасности можно корректировать во времени, сортируя и предотвращая различные риски на разных этапах проекта. Кроме того, это также предоставляет возможности для дальнейшего постоянного обогащения модели прогнозирования рисков за счет большего количества вводимых данных в строительной отрасли.

Текущий результат, полученный с помощью предложенной модели в этом исследовании, получен с ограниченным размером и разнообразием данных. Точность модели значительно повысится, если будет проанализировано больше аварий с различными факторами риска. В дальнейших исследованиях автор расширит исследовательский пул, а для улучшения модели также будут использоваться методы Fuzzy BN и Fuzzy ANP. Кроме того, следующей целью исследования будет бюджет и контроль распределения инвестиций в управление безопасностью в строительной отрасли на основе модели индекса потерь текущего исследования. В то же время эта модель будет объединена с теорией портфеля Марковица. На основе количественных данных, предоставляемых моделью, можно сравнить затраты и выгоды от рисков. В конце концов, лучшая ставка инвестиций в управление безопасностью определяется с помощью лучшего венчурного капитала в сфере безопасности для различных строительных проектов.

В контексте совершенствования управления строительством и управления рисками стихийных бедствий в этом исследовании подчеркивается ключевая роль интеграции BN и ANP в количественной оценке вероятности и серьезности рисков, тем самым рассчитывая потенциальные потери. Надежный метод

предложенное в этом исследовании прокладывает путь к устойчивому и безопасному будущему управления строительством посредством анализа многогранной ценности. Благодаря разработке стратегии реагирования на динамические ситуации, связанные с безопасностью строительства, эта модель позволяет специалистам-практикам принимать обоснованные решения. В будущем этот подход будет усовершенствован, чтобы потенциально принести пользу проектам в направлении направлений, которые обещают повышенную ценность и снижение потерь, тем самым создавая ландшафт, который является экономически жизнеспособным и социально выгодным в долгосрочной перспективе.

Вклад автора: концептуализация, LX и YW; Методология, LX; Валидация, LX; Формальный анализ, LX; Расследование, LX; Ресурсы, LX; Курирование данных, LX; Письмо — первоначальный вариант, LX; Написание — обзор и редактирование, LCMT и YW; Визуализация, LX и YW; Надзор, LCMT. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получило внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: данные, представленные в этом исследовании, доступны по запросу у соответствующего автора. Данные не являются общедоступными из-за конфиденциальности.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Мисюрек, К.; Мисюрек, Б. Методика повышения безопасности труда в строительной отрасли на основе TWI программа. Саф. наук. 2017, 92, 225–231. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
2. Национальное бюро статистики. Отчет о мониторинге трудовых мигрантов за 2020 год. Апрель 2021 г. Доступно онлайн: http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202104/t20210430_1816937.html (по состоянию на 24 апреля 2022 г.).
3. Чжан С.; Лусмор, М.; Суниндихо, РЮ; Гу, Д. Исследование климата безопасности в крупных строительных проектах Китая. Межд. Дж. Констр. Менеджер. 2021, 23, 1365–1375. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
4. Чжан Л.; Ву, Х.; Скибневский, МЮ; Чжун, Дж.; Лу, Ю. Анализ рисков безопасности на основе байесовских сетей в строительных проектах. Надежный. англ. Сист. Саф. 2014, 131, 29–39. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
5. Фанг, Д.; Шен, Кью; Ву, С.; Лю, Г. Комплексная основа для оценки и выбора подходящих строительных лесов на основе Аналитическая иерархия процессов. Дж. Саф. Рез. 2003, 34, 589–596. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
6. Фу, Г.; Цао, Ж.-Л.; Чжоу, Л.; Сян, Ю.-К. Сравнительное исследование моделей причин аварий HFACS и 24Model. Домашний питомец. наук. 2017, 14, 570–578. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
7. Ван, Б.; Ву, К. Информатика безопасности как новая, перспективная и устойчивая область науки о безопасности в информационную эпоху. Дж. Чистый. Прод. 2020, 252, 119852. [\[CrossRef\]](#)
8. Лю, К.; Фу, Г.; Ван, Ю.; Ли, Дж.; Хан, М.; Пэн, Ф.; Ян, К. Как теория причин аварий может способствовать разумному управлению безопасностью: Приложение 24Model. Процесс Саф. Окружающая среда. Прот. 2022, 162, 878–890. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
9. Заде, В.З.; Патнаик, А. Конечно-элементное моделирование динамической реакции композитного железобетонного моста для структурных мониторинг здоровья. Межд. Дж. Адв. Структура. англ. 2014, 6, 2. [\[CrossRef\]](#)
10. Фэн, Кью; Ша, С.; Дай, Л. Байесовская модель анализа выживаемости для прогнозирования разрушения кольцевого сварного шва. Прил. наук. 2019, 9, 1150. [\[CrossRef\]](#)
11. Сюэ, Н.; Чжан, Дж.; Чжан, В.; Чжао Т. Исследование причин несчастных случаев на строительстве с использованием байесовской сети. Дж. Сив. англ. Менеджер. 2021, 38, 176–194.
12. Ге, Дж.; Чжан, Ю.; Чен, С.; Сюй, К.; Яо, Х.; Ли, Дж.; Лю, Б.; Ян, Ф.; Ву, К.; Ли, С. Модели причин аварий, разработанные в Китае между 1978 и 2018 годами: обзор и сравнение. Саф. наук. 2022, 148, 105653. [\[CrossRef\]](#)
13. Герландт, Ф.; Хакзад, Н.; Ренье, Г. Валидность и валидация количественного анализа рисков, связанных с безопасностью: обзор. Саф. наук. 2017, 99, 127–139. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
14. Мао Ю.; Сюй, Т. Исследование влияния 4M1E на качество проектирования на основе модели структурных уравнений. Сист. англ. Процедура 2011, 1, 213–220. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
15. Ли, П. Факторы качества строительного проекта на основе анализа метода АНР. AMP Adv. Матер. Рез. 2013, 838–841, 3151–3155. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
16. Тиан, Х.В. Исследование управления безопасностью строительства высотных зданий на основе модели оценки серой иерархии. AMP Adv. Матер. Рез. 2014, 919–921, 1477–1481. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
17. Чжан, В.; Чжан, Х.; Луо, Х.; Чжао, Т. Модель надежности и идентификация критических факторов управления безопасностью строительства. основанное на системном мышлении. Дж. Сив. англ. Менеджер. 2019, 25, 362–379. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
18. Чжан Л.; Скибневский, МЮ; Ву, Х.; Чен, Ю.; Дэн, К. Вероятностный подход к анализу рисков безопасности в строительстве метро. Саф. наук. 2014, 63, 8–17. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
19. Ким, Ж.-М.; Ким, Т.; Сон, К.; Бэ, Дж.; Сон, С. Разработка количественной оценки риска с использованием индикаторов риска для прогнозирования экономического ущерба на строительных площадках Южной Кореи. Дж. Азиатский Архит. Строить. англ. 2019, 18, 472–478. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
20. Апостолакис Г.Е. Насколько полезна количественная оценка рисков? Рисковый анализ. 2004, 24, 515–520. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
21. Авен, Т.; Хайде, Б. Надежность и обоснованность анализа рисков. Надежный. англ. Сист. Саф. 2009, 94, 1862–1868. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

22. Пурнус, А.; Боеда, К.-Н. Соображения по количественному анализу рисков проекта. *Procedia-Soc. Поведение. наук.* 2013, 74, 144–153. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
23. Фунг, IWN; Тэм, WWY; Ло, Тай; Лу, LLH Разработка модели оценки рисков для безопасности строительства. *Межд. Дж. Прож. Менеджер.* 2010, 28, 593–600. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
24. Санны-Анибире, Миссури; Махмуд, А.С.; Хасанаин, Массачусетс; Салами, Б.А. Подход к оценке рисков для повышения показателей безопасности строительства. *Саф. наук.* 2020, 121, 15–29. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
25. Фунг, IWN; Ло, Тай; Тунг, KCF На пути к повышению надежности оценки рисков: Разработка модели качественной и количественной оценки рисков (QREM) для различных отраслей строительных работ в Гонконге. *Ацид. Анальный. Пред.* 2012, 48, 167–184. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
26. Франке А. Анализ рисков в управлении проектами. *Межд. Дж. Прож. Менеджер.* 1987, 5, 29–34. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
27. Тарун, А. На пути к лучшему моделированию и оценке строительного риска: выводы из обзора литературы. *Межд. Дж. Прож. Менеджер.* 2014, 32, 101–115. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
28. Саати, Т.Л. Принятие решений — аналитическая иерархия и сетевые процессы (АНР/АНР). *Дж. Сист. наук. Сист. англ.* 2004, 13, 1–35. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
29. Хакзад, Н.; Хан, Ф.; Амиотт, П. Анализ безопасности на технологических объектах: сравнение подходов, основанных на дереве отказов и байесовской сети. *Надежный. англ. Сист. Саф.* 2011, 96, 925–932. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
30. Равив Г.; Шапира, А.; Фишбеин, Б. Анализ потенциального риска происшествий на основе АНР: практический пример кранов в строительной отрасли. *Саф. наук.* 2017, 91, 298–309. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
31. Ильбахар, Э.; Караёсан, А.; Себи, С.; Кахраман, К. Новый подход к оценке рисков для охраны труда и техники безопасности с использованием Пифагорейская нечеткая МАИ и система нечеткого вывода. *Саф. наук.* 2018, 103, 124–136. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
32. Дагдевирен, М.; Юксель, Т. Разработка модели процесса нечеткой аналитической иерархии (АНР) для управления безопасностью на основе поведения. *Инф. наук.* 2008, 178, 1717–1733. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
33. Ши, С.; Цзян, М.; Лю, Ю.; Ли, Р. Оценка риска падения с высоты на основе АНР-fuzzy. *Процедия англ.* 2012, 45, 112–118. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
34. Чан, АНС; Квок, Вайоминг; Даффи, В.Г. Использование АНР для определения приоритета в системе управления безопасностью. *Индийский менеджер. Система данных.* 2004, 104, 430–445. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
35. Аминбахш, С.; Гундуз, М.; Сонмез, Р. Оценка рисков безопасности с использованием процесса аналитической иерархии (АНР) во время планирования и бюджетирования строительных проектов. *Дж. Саф. Рез.* 2013, 46, 99–105. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
36. Чжоу, Ю.; Ли, К.; Чжоу, К.; Луо, Х. Использование байесовской сети для анализа рисков безопасности при прогибе мембранной стены на основе полевых данных. *Надежный. англ. Сист. Саф.* 2018, 180, 152–167. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
37. Луу, В.Т.; Ким, С.-Ю.; Туан, Невада; Огуллана, С.О. Количественная оценка риска графика в строительных проектах с использованием байесовских сетей доверия. *Межд. Дж. Прож. Менеджер.* 2009, 27, 39–50. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
38. Хакзад, Н.; Хан, Ф.; Амиотт, П. Количественный анализ рисков морских буровых операций: байесовский подход. *Саф. наук.* 2013, 57, 108–117. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
39. Лян, В.; Чжуан, Д.; Цзян, Д.; Пан, Дж.; Рен, Х. Оценка опасности селевых потоков с использованием байесовской сети. *Геоморфология* 2012, 171–172, 94–100. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
40. Ли, П.; Чен, Г.; Дай, Л.; Чжан, Л. Подход нечеткой байесовской сети для улучшения количественной оценки организационного влияния в рамках HRA. *Саф. наук.* 2012, 50, 1569–1583. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
41. Ли, М.; Ван, Д.; Шан, Х. Оценка риска источников возгорания в шахтах с использованием нечеткой байесовской сети. *Процесс Саф. Окружающая среда. Прот.* 2019, 125, 297–306. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
42. Пинг, П.; Ван, К.; Конг, Д.; Чен, Г. Оценка вероятности успеха побега, эвакуации и спасения (EER) на морской платформе путем интеграции байесовской сети и нечеткой АНР. *Дж. Потеря Пред. Process Ind.* 2018, 54, 57–68. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
43. Галлас, Б.Д. Однократная оценка дисперсии MRMC: AUC. *акад. Радиол.* 2006, 13, 353–362. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
44. Платформа раскрытия правительственной информации Бюро по управлению чрезвычайными ситуациями района Юэсю Гуанчжоу. Доступно онлайн: <http://www.yuxiu.gov.cn/gzyxyj/gkmlpt/index> . (по состоянию на 8 ноября 2023 г.).

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и участникам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.