

УДК 504.06, 519.216.3

## БАЙЕСОВСКОЕ СЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РИСКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Чикир Мария Васильевна

Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших система и машин» УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье предложен байесовский сетевой подход к моделированию природно-технологических аварий на железной дороге. Изучен комплекс природных и организационных факторов, влияющих на величину риска возникновения аварий при железнодорожном транспортировании. Моделирование проведено в программном комплексе GeNIe для машинного обучения на основе байесовских сетей. Структура модели определена путем объединения экспертных знаний с реальными сведениями об авариях на железной дороге. Были выполнены такие процессы, как детальный анализ причин аварии на железной дороге из-за наводнения (цветовая визуализация зависимостей между параметрами и их ранжирование) и прогнозирование подобных происшествий. Статистические данные, используемые в исследовании, были предварительно подготовлены в среде разработки Python. Тестирование модели реализовано на примере весеннего паводка 2024 г. реки Урал в городе Орске. Результаты расчета показали, что природно-климатические факторы могут вызывать серьезные сбои в работе железнодорожного транспорта, а также создавать условия для развития каскадных аварий в процессе перевозки опасных грузов. Разработанная модель может применяться в планировании и в качестве научной вероятностной основы для управления транспортными системами в случае неопределенных сценариев природного характера.

**Ключевые слова:** вероятность, железнодорожное транспортирование, сеть Байеса, неопределенность, природный фактор

**Для цитирования:** Чикир М. В. Байесовское сетевое прогнозирование природных рисков на железной дороге // Техносферная безопасность. 2025. № 2 (47). С. 98–110.

## BAYESIAN NETWORK PREDICTING NATURAL RISKS ON THE RAILWAY

Maria V. Chikir

Science and Engineering Centre "Reliability and Safety of Large Systems and Machines", Ural Branch, RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

**Abstract.** The article proposes a Bayesian network approach to modeling natural and technological accidents on the railway. The complex of natural and organizational factors influencing the risk magnitude of railway transportation is studied. The modeling in a specialized software package GeNIe for machine learning based on Bayesian networks is carried out. The structure of the

model is determined by combining expert knowledge with real information about accidents on the railway. The following processes are performed: detailed analysis of the causes of a railway accident due to flooding (color visualization of dependencies between parameters and their ranking) and similar accidents are predicted. The statistical data used in the study were prepared in the Python development environment. The model was tested using the example of the spring flood of 2024 on the Ural River in the town of Orsk. The calculation results showed that natural and climatic factors can cause serious disruptions in the operation of railway transport, as well as create conditions for the development of cascading accidents during the transportation of dangerous goods. The developed model can be used in planning and as a scientific probabilistic basis for managing transport systems in the event of uncertain natural scenarios.

**Keywords:** probability, railway transportation, Bayesian network, uncertainty, natural factor

**For Citation:** Chikir M. V. Bayesian network predicting natural risks on the railway // Technosphere Safety. 2025. № 2 (47). pp. 98–110.

## Введение

По оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата при ООН, экстремальные климатические события являются серьезной угрозой и будут случаться все чаще, приводя к нарушению работы различных инфраструктур. В настоящее время масштабы стихийных бедствий значительно превышают возможности человека по ликвидации их последствий.

Железная дорога является важнейшей частью городских транспортных систем и играет значительную роль в экономике страны. Выход ее из строя приводит к смещению поставок грузов и последующим убыткам, расходам на восстановление инфраструктуры, гибели людей и нанесению вреда окружающей среде. Природные аномалии могут приводить к более серьезным последствиям на железной дороге, чем обычные технологические аварии, т. к. происходит блокировка или полное разрушение линий жизнеобеспечения (инженерные

сети, трубопроводы, дорожно-транспортная инфраструктура), что серьезно ограничивает проведение аварийно-спасательных работ и усугубляет тяжесть последствий. Кроме того, перемещение опасных грузов по территории городских агломераций увеличивает риск перехода обычных аварий в разряд каскадных.

Так, из-за урагана «Милтон» в октябре 2024 г. было приостановлено движение всех грузовых и пассажирских поездов из-за повышенной опасности: значительная часть путей была затоплена, смыта или завалена деревьями. Весной 2011 г. крупнейшее цунами в Японии нанесло значительный ущерб железнодорожной инфраструктуре. Водной стихией было разрушено около 1 тыс. ЛЭП, 5 станций, 100 опор мостов. В результате большую часть железных дорог северо-востока страны пришлось строить заново. В 2004 г. произошла крупнейшая авария в Перали (Шри-Ланка). Цунами, вызванное землетрясением, уничтожило всю прибрежную линию железнодорожных путей и смы-

ло переполненный пассажирский поезд. Жертвами стали более 1,5 тыс. чел.

Природные риски не поддаются управлению, их можно только анализировать и оценивать количественно. По сравнению с другими видами средств передвижения железнодорожный транспорт больше всего подвержен такому виду риска, т. к. является менее гибким в пространственном отношении [1, 7]. Меры по борьбе с воздействием климата разрабатываются в глобальном масштабе и могут быть бесполезны на региональном и местном уровнях, поскольку не учитывают социально-экономические возможности, ограниченность ресурсов, географические и климатические особенности конкретной территории. При этом ситуация может усугубиться под воздействием таких факторов, как халатное отношение персонала и износ оборудования.

Проблеме влияния природы на функционирование инженерных систем посвящено множество исследований. Останкович и др. [2] провели анализ рисков экстремальных температур и снегопадов для оценки состояния железнодорожной сети Нидерландов. Alabbad и др. [3] провели пространственный анализ объектов железнодорожной инфраструктуры (сортировочные станции, мосты и переезды) во время сезонных паводков в штате Айова. Стружкова и др. [4] исследовали влияние вечной мерзлоты на функционирование железнодорожной сети. Зависимость работоспособности персонала железной дороги Сербии от погодных условий изучалась в [5]. Последствиями природных аварий на железной дороге и результатами исследований подтверждается важность оценки рисков и разработки мероприятий для противостояния стихийным бедствиям, осо-

бенно для регионов, подверженных экстремальным погодным условиям.

Первой частью представленного в статье исследования являлось изучение комплекса причин железнодорожной аварии. Результатом стало применение гибридной сети Байеса для оценки риска аварии на железной дороге (159 причин-переменных) [6], являющейся обобщенным вариантом модели железнодорожной аварии. В настоящей работе акцент сделан на группе природных факторов аварии.

### **Теоретические основы**

#### **Влияние климата на функционирование железной дороги**

Железнодорожное движение — сложная динамичная система, безопасность которой зависит от многомерного воздействия факторов различной природы, таких как люди, транспортные средства, дороги и окружающая среда. Важно четко понимать особенности этой связи и учитывать их при оценке рисков.

Из всех элементов железной дороги железнодорожный путь сильнее всего подвержен влиянию внешних факторов. Табл. 1 содержит перечень возможных воздействий. Самыми распространенными метеорологическими факторами являются температура воздуха и атмосферные осадки (снегопады, обильные дожди, гололед и др.).

В настоящем исследовании акцент сделан на наводнениях, т. к. по повторяемости, площади распространения и суммарному материальному ущербу наводнения занимают первое место среди стихийных бедствий в России [8].

Масштаб наводнений зависит от множества факторов природного и организа-

**Таблица 1**  
**Природные явления и их последствия для железной дороги**  
 Table 1  
 Natural phenomena and their consequences for railway

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Геологические</b><br>Geological<br>Повреждение/разрушение путей, насыпей и откосов, падение ЛЭП/деревьев и др., блокировка железнодорожных станций<br>Damage/destruction of railway tracks, embankments and slopes, falling power lines/trees, etc., blocking of railway stations                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Геофизические</b><br>Geophysical<br>Повреждение/разрушение железнодорожного пути<br>Damage/destruction of railway tracks                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Метеорологические</b><br>Meteorological<br>Деформация (коробление) железнодорожных путей, провисание воздушных линий, перегрев/сбои электроники, пожары на откосах и отказ оборудования, ограничение скорости, сокращение срока эксплуатации оборудования, потребность в охлаждении оборудования, повреждение контактных сетей, скачки напряжения, поломки устройств сигнализации, централизации, блокировки, падение ЛЭП/деревьев и др., замораживание, обледенение, повышение хрупкости рельсов, обмерзание стрелочных переводов, блокировка железнодорожных станций, скопление снега вдоль путей<br>Deformation and warping of railway tracks, sagging of power lines, overheating/electronic failures, fires on slopes, equipment failure, speed limitation, shortening of equipment life, the need for cooling equipment, damage to contact networks, power surges, breakdowns of alarm devices, centralization, blocking, falling of power lines/ trees, etc., freezing, icing, increased fragility of rails, freezing of switches, blocking of railway stations, accumulation of snow along railway tracks |
| <b>Гидрологические</b><br>Hydrological<br>Затопление, повреждение железнодорожной насыпи и склона, размыв опор мостов, путей, контактных сетей, проникновение воды в подземные сооружения, туннели, затопление прибрежной инфраструктуры<br>Inundation, damage to railway embankment and slope, erosion of bridge supports, railway tracks, contact networks, water penetration into underground structures, tunnels, flooding of coastal infrastructure                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Природные пожары</b><br>Wildfires<br>Тепловое воздействие на все металлические, горючие элементы железнодорожного оборудования<br>Thermal effects on all metal, combustible elements of railway equipment                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

ционного характера (табл. 2). Кроме того, необходимо учитывать их синергетический эффект, т. к. в сочетании друг с другом они повышают риск возникновения аварии.

Стоит отметить, что основной причиной возникновения технологических аварий чаще

всего является человеческий фактор. Однако при оценке рисков важно учитывать особенности конкретного объекта или территории, т. к. в регионах, подверженных природно-климатическому воздействию, природный фактор будет иметь преобладающее значение.

**Таблица 2**  
**Возможные факторы наводнений**

Table 2  
Possible flood factors

| <p><b>Природно-климатические</b><br/>Natural and climatic</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <p><b>Неклиматические (организационные)</b><br/>Non-climatic (organizational)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Количество осадков за зиму, запас воды в снежном покрове и температурный режим перед началом весеннего таяния, увлажнение почвы осенью, интенсивность снеготаяния, рельеф русла реки, уклон рек, ландшафт местности (лесополосы, степная или лесистая почва с подстилкой), наличие сужений в русле реки, наличие препятствий по течению, воздействие землетрясений, обвалов, оползней, повышение уровня грунтовых вод, глубокое промерзание грунта, запасы снега, его быстрое таяние, рельеф местности</p> <p>The amount of the winter precipitation, the water supply in the snow cover, the temperature condition before the start of spring melting, soil moisture in autumn, the snowmelt intensity, the terrain of the riverbed, the slope of rivers, the landscape of the area (forest belts, steppe or wooded soil with underlays), the presence of constrictions in the riverbed, the presence of obstacles to the flow, the earthquake impact, landslides, landslides, rising groundwater levels, deep freezing of the soil, snow reserves and its rapid melting, terrain</p> | <p>Уровень воды в створе плотины, рабочее состояние гидротехнических сооружений, расстояние от плотины, недостаточность сбросов воды, конструкторские ошибки при проектировании, некачественное обслуживание, уменьшение пропускной способности реки в районе мостов, сужений, застройка в пойме рек, потери в результате ведения хозяйственной деятельности, развития экономики, городское планирование</p> <p>The water level in the dam site, the technical condition of hydraulic structures, the distance from the dam, insufficient water discharges, design errors, poor-quality construction and maintenance, reduction of river capacity in the area of bridges, narrows, buildings in the floodplain, losses as a result of business activities, economic development, urban planning</p> |

### Доступность данных

В работе используется методология байесовской сети для решения проблемы неопределенности в оценке рисков наводнений. С байесовской точки зрения вероятность позволяет измерить неопределенность параметров модели, а теорема Байеса — механизм правильного обновления этих вероятностей при поступлении новых данных, уменьшающий существующую неопределенность. Байесовский подход делает возможным объединение частотных данных со знаниями предметной области. Числовые значения вероятностей могут извлекаться из баз данных, опираться на экспертное заключение или определяться комбинацией вышеперечисленного.

Эксперты отмечают серьезные проблемы в сборе статистической информации о состоянии железных дорог из-за воздействия климата [3, 7–9]. Это обусловлено:

- сложностью метеорологических наблюдений, слабой изученностью водного режима рек, отсутствием гидрологических постов наблюдения, особенно на региональном и местном уровнях;
- отсутствием четкого алгоритма отчетности железнодорожных аварий;
- умышленным искажением информации ответственными лицами во избежание ответственности;
- противоречивостью или неточностью сведений из разных источников.

Кроме того, регистрация железнодорожных аварий как результата воздействия

наводнений не ведется нигде. Поэтому в настоящей работе объединены два набора статистических данных по наводнениям и авариям на железной дороге для построения двух взаимосвязанных сетей Байеса. Первая сеть предназначена для расчета вероятности возникновения аварии в результате наводнения. Результаты ее расчета частично используются в качестве входных данных для запуска второй сети, устанавливающей тип вероятной железнодорожной аварии и величину возможного ущерба.

### **Построение модели и статистический вывод**

Первый набор данных содержит более 200 тыс. записей о последствиях прошлых наводнений по 50 признакам. Второй набор данных включает более 100 тыс. записей о железнодорожных авариях за рубежом по 160 параметрам с 1975 по 2022 г. Эти исходные данные были обработаны в среде разработки Python: очищены от пропусков, недопустимых символьных и нулевых значений, дубликатов; все количественные характеристики были переведены в систему СИ, часть из них категоризованы для удобства построения моделей. После выполнения исследовательского анализа данных из всех регистрируемых параметров было выделено лишь несколько.

Данные о наводнениях включают 19 признаков (из 50): дренаж рельефа, дренажные системы, управление реками, обезлесение, урбанизация, изменение климата, качество плотин, заиливание, вторжения, эффективная готовность к стихийным бедствиям, уязвимость прибрежных районов, оползни, ухудшение инфраструктуры, потеря водно-болотных угодий, неадекватное пла-

нирование, политические факторы, вероятность аварии.

Данные о железнодорожных авариях включают 18 признаков (из 160): месяц аварии, тип аварии, опасные вагоны, эвакуированные люди, видимость, погодные условия, тип трассы, общий тоннаж, сошедшие с рельсов груженные грузовые вагоны, сошедшие с рельсов груженные пассажирские вагоны, стоимость повреждения пути.

Отформатированные данные были импортированы в программный комплекс GeNie. Столбцы в файлах данных соответствуют переменным (будущим узлам сети), а строки (записи) — различным значениям этих переменных. Непрерывные переменные дискретизированы. На основе знаний предметной области [4–5, 10–13] изучены причинно-следственные связи параметров модели и затем созданы базовые структуры сетей Байеса. Алгоритм жадного прореживания использован в качестве основного алгоритма структурного обучения (на основе метода максимальной апостериорной вероятности).

В результате были получены две байесовские модели, включающие ряд факторов, описанных в табл. 1 и 2. Можно заметить, что климатические изменения влияют на вероятность возникновения аварии не напрямую, а косвенно: они существенны при плохой организации служб в случае аварии (рис. 1 и 2).

### **Оценка точности моделей**

Точность моделей оценивалась двумя способами. На основе первого набора данных о наводнениях был сгенерирован новый файл данных для проверки точности первой модели с 200 тыс. записями. Вторая



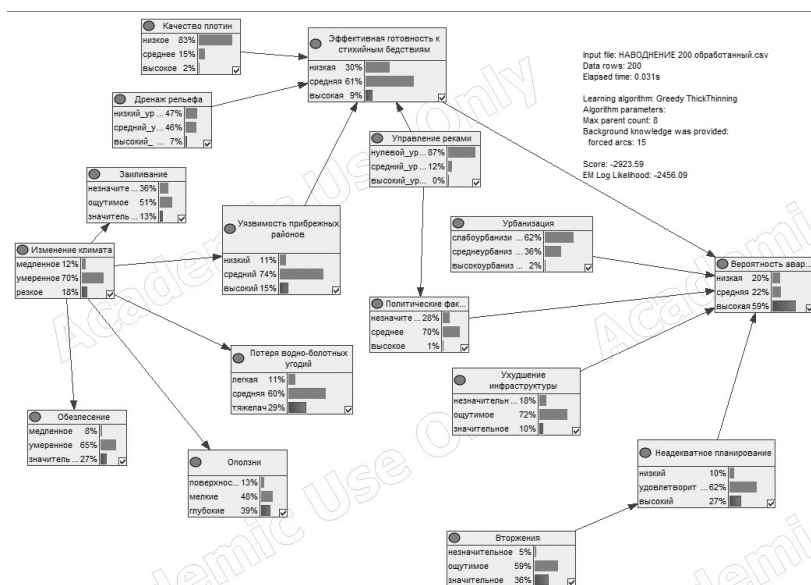


Рис. 1. Сеть Байеса для расчета вероятности аварии

Fig. 1. Bayes network for calculating the accident probability

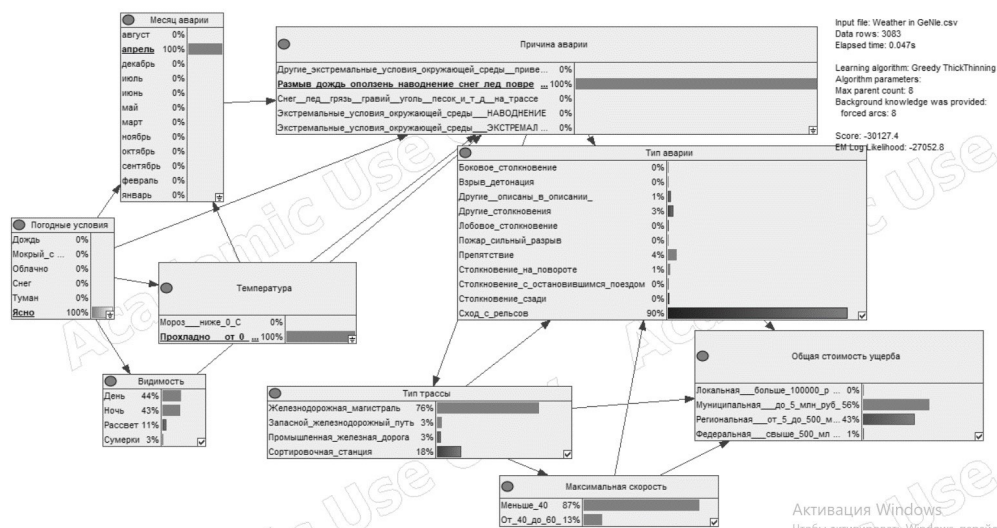


Рис. 2. Сеть Байеса для определения последствий железнодорожной аварии

Fig. 2. Bayes network for determining the consequences of a railway accident

модель оценивалась методом 10-кратной перекрестной валидации. В этом случае исходной набор данных о железнодорожных авариях был разделен на 10 равных частей. В обучении модели участвовали первые 9 частей, последняя, 10-я часть, использовалась как тестовая выборка. Визуально точность модели представлена в виде ROC-кривых с общей точностью для главных узлов сети 89 и 75 % соответственно (рис. 3).

## Результаты и их обсуждение

В апреле 2024 г. ряд регионов России оказался подвержен катастрофическому наводнению, вызванному весенним половодьем на реке Урал. Сильнее всего пострадал г. Орск Оренбургской области, для которого наводнение — явление довольно редкое. Частота наводнения здесь составляет 0,0145 раза в год. Последние случались

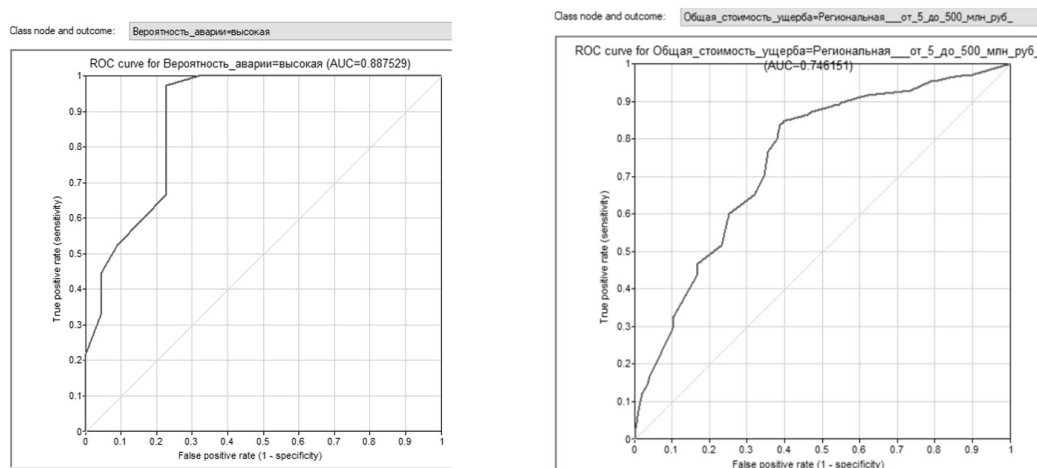


Рис. 3. ROC-кривые построенных моделей

Fig. 3. ROC-curves of the models

в 1922, 1942 и 1957 гг. В Орске в результате разрушения дамбы было затоплено около 6,6 тысяч жилых домов, дачных участков. Общий ущерб оценен более чем в 21 млрд руб. Наводнение привело к разрушению зданий и коммуникаций, гибели скота, размыву канализации, городских свалок, кладбищ и скотомогильников, что создало угрозу заражения питьевой воды и последующего заболевания людей. Это событие было выбрано для демонстрации расчетов полученных сетей Байеса.

Вероятностные модели были отредактированы для рассматриваемого случая. Расчет сетей показал новые апостериорные распределения вероятностей в узлах сетей. Далее анализировалось взаимное влияние их параметров.

Анализ чувствительности выявил «Готовность к стихийным бедствиям», «Уровень урбанизации», «Ухудшение инфраструктуры» в качестве ключевых факторов, влияющих на вероятность возникновения аварии на железной дороге. Это означает, что незначительные изменения окрашенных узлов оказывают существенное влияние на риск возникновения аварии (рис. 4).

Ранжирование факторов наводнения показало, что самыми критическими из них стали «Управление реками на нулевом уровне», «Низкое качество гидрозащитных сооружений», «Ухудшение инфраструктуры». Если бы руководство города приняло во внимание указанные факторы, то удалось бы не допустить развитие весеннего паводка до ЧС федерального уровня. Список на рис. 5 составлен по мере уменьшения вклада каждого наблюдаемого фактора в развитие аварии и их возможные наблюдаемые состояния.

## Выводы

Разработанные сети являются лишь приблизительной моделью для прогнозирования риска наводнений, т. к. построены на основе зарубежной статистики без учета расположения местности. В настоящее время накопленного научного материала недостаточно для создания более реальной модели наводнений в рассматриваемом регионе. Исследование необходимо продолжить в направлении сбора сведений, охватывающих более широкий диапазон



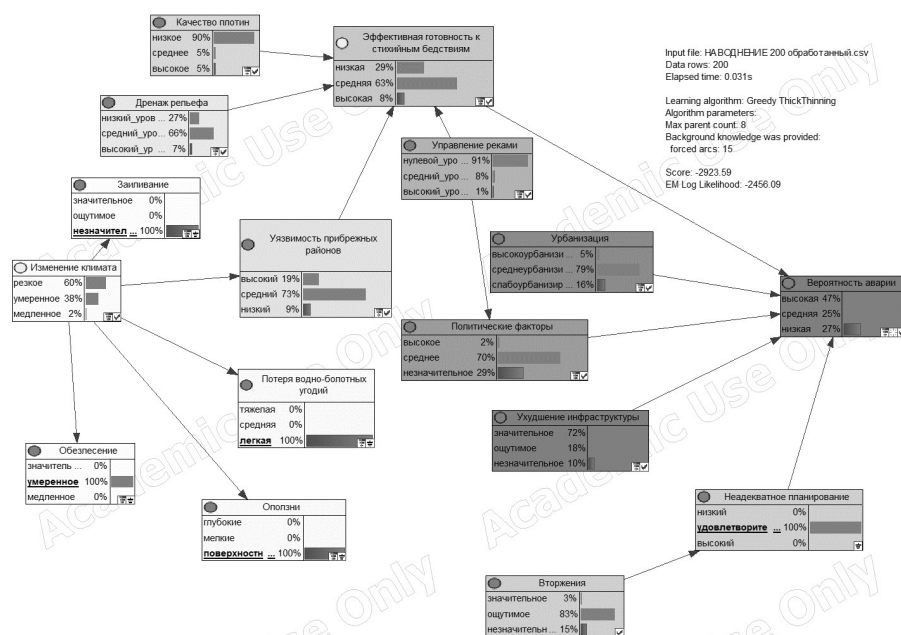


Рис. 4. Анализ чувствительности главного узла

Fig. 4. Sensitivity analysis of the main node

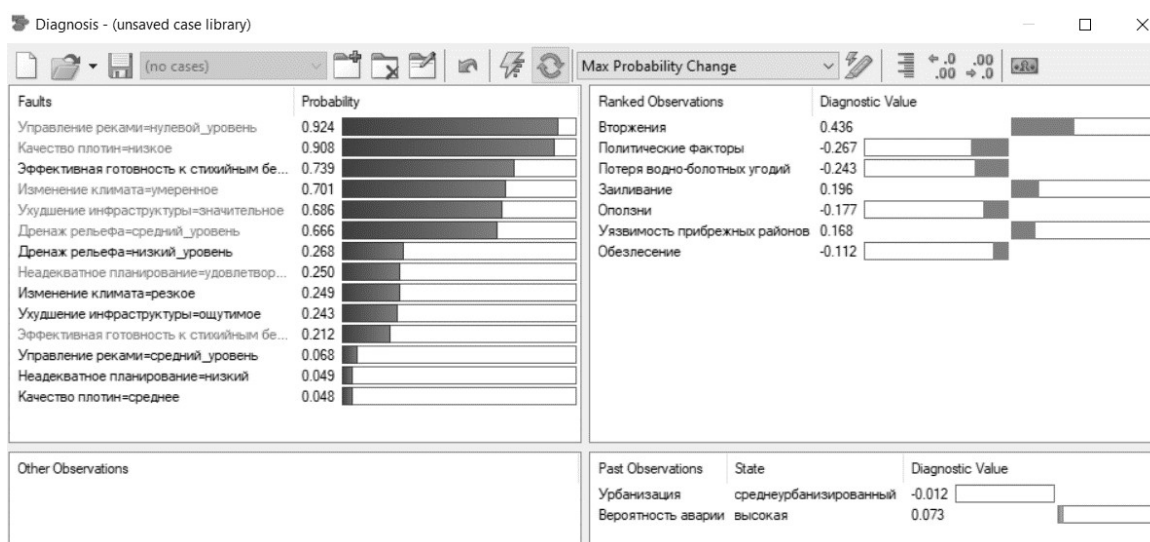


Рис. 5. Ранжирование причин наводнения

Fig. 5. Ranking of flood causes

климатических факторов, и создания базы данных по авариям на отечественных железных дорогах.

В дополнение к оценке факторов наводнения в Орске стоит отметить следующее.

- **Особенности реки Урал.** Река имеет наибольший размах водности среди европейских рек из-за неравномерности

стока: в многоводный год сток Урала может быть в 10 раз больше, чем в маловодный. Глубина реки небольшая, но из-за перепадов высот в истоке и устье реки скорость ее может достигать 10 км/ч.

- **Высокий темп урбанизации.** Массовая застройка жилыми и хозяйственными зданиями, дорогами в пойме реки при-

вело к сокращению естественной поймы в четыре раза.

В статье рассмотрены особенности природных аварий на железной дороге из-за наводнений в условиях изменения климата. Предложено использование двух тематических наборов данных (по наводнениям и по ж/д авариям). В результате созданы две байесовские сети для прогнозирования аварий на железной дороге в условиях наводнения.

На примере реального наводнения в г. Орске продемонстрирована эффективность использования байесовского подхода для всестороннего анализа железнодорожной аварии в результате наводнения, в т. ч. анализ чувствительности и ранжирование причин с цветовой визуализацией.

Предложенные вероятностные модели могут помочь в создании стратегий управления последствиями природных рисков на железной дороге, особенно в случаях транспортирования опасных грузов. Это мо-

жет стать решающим моментом в создании транспортной системы, более устойчивой к стихийным бедствиям.

Среди превентивных мероприятий для районов, подверженных наводнениям, следует выделить следующие:

- запрет на строительство и ведение хозяйственной деятельности на пойменных территориях и низменностях, которые представляют собой постоянную потенциально опасную зону для урбанистики;
- создание системы постоянного мониторинга для сбора климатических данных;
- учет влияния климатических изменений при проектировании и эксплуатации железной дороги;
- укрепление конструкции железнодорожных сетей для адаптации к изменяющимся климатическим условиям и минимизации ущерба будущих природных аварий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Changnon, S. A. Impacts of the 2008 Floods on Railroads in Illinois and Adjacent States // Transactions of the Illinois State Academy of Science. 2009. Vol. 102. pp. 181–190. URL: <https://ilacadofsci.com/wp-content/uploads/2013/03/102-17MS2819-print.pdf> (date of application: 24.05.2025).
2. Risk assessment of climate change impacts on railway infrastructure / I. S. Oslakovic et al. // Proceedings – EPOC 2013 Conference. 2013. pp. 1–16.
3. Comprehensive Flood Risk Assessment for Railroad Network: Case Study for Iowa / A. B. Cikmaz et al. // Research Square. 2024. № 2. pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4171938/v1>.
4. Struchkova G. P., Kapitonova T. A., Levin A. I. Safety of Railway Transport Facilities Operating in Extreme Climatic Conditions // Advances in Engineering Research. 2019. № 188. pp. 328–332. DOI: <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.61>.

5. Analysis of impact of meteorological conditions on human factors in estimating the risk of railway accidents / D. Aleksic et al. // *Transport*. 2017. № 33 (5). pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1332684>.
6. Chikir M. V., Poluyan L. V. Bayesian Network Modeling for Analysis and Prediction of Accidents in Railway Transportation of Dangerous Goods // *Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety ICCATS 2022*. 2023. № 2. pp. 554–563. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21120-1\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21120-1_53).
7. Gonzva M., Barroca B., Gautier P. E. A modeling of disruptions cascade effect within a rail transport system facing a flood hazard // *Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars*. 2015. № 6 (3). pp. 53–60.
8. Махинов А. Н., Ким В. И., Воронов Б. А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // *Вестник ДВО РАН*. 2014. № 2. С. 5–14.
9. A Novel Approach for Modeling and Evaluating Road Operational Resilience Based on Pressure-State-Response Theory and Dynamic Bayesian Networks / Y. Gang et al. // *Applied Sciences*. 2023. № 13. pp. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137481>.
10. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods / G. Antonioni et al. // *Reliability Engineering and System Safety*. 2015. Vol. 142. pp. 334–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.020>.
11. Симонов В. В., Осадчий О. В. Природа возникновения наводнений, затоплений и характеристика их поражающих факторов // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2014. № 1. С. 9–19.
12. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas / V. Cozzani et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. № 28. pp. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.07.009>.
13. Khakzad N. Impact of wildfires on Canada's oil sands facilities // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. № 18 (11). pp. 3153–3166. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3153-2018>.

## REFERENCES

1. Changnon, S. A. Impacts of the 2008 Floods on Railroads in Illinois and Adjacent States // *Transactions of the Illinois State Academy of Science*. 2009. Vol. 102. pp. 181–190. URL: <https://ilacadofsci.com/wp-content/uploads/2013/03/102-17MS2819-print.pdf> (date of application: 24.05.2025).
2. Risk assessment of climate change impacts on railway infrastructure / I. S. Oslakovic et al. // *Proceedings – EPOC 2013 Conference*. 2013. pp. 1–16.
3. Comprehensive Flood Risk Assessment for Railroad Network: Case Study for Iowa / A. B. Cikmaz et al. // *Research Square*. 2024. Vol. 2. pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4171938/v1>.

4. Struchkova G. P., Kapitonova T. A., Levin A. I. Safety of Railway Transport Facilities Operating in Extreme Climatic Conditions // *Advances in Engineering Research*. 2019. Vol. 188. pp. 328–332. DOI: <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.61>.
5. Analysis of impact of meteorological conditions on human factors in estimating the risk of railway accidents / D. Aleksic et al. // *Transport*. 2017. Vol. 33 (5). pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1332684>.
6. Chikir M. V., Poluyan L. V. Bayesian Network Modeling for Analysis and Prediction of Accidents in Railway Transportation of Dangerous Goods // *Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety ICCATS 2022*. 2023. Vol. 2. pp. 554–563. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21120-1\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21120-1_53).
7. Gonzva M., Barroca B., Gautier P. A modeling of disruptions cascade effect within a rail transport system facing a flood hazard // *Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars*. 2015. Vol. 6 (3). pp. 53–60.
8. Makhinov A. N., Kim V. I., Voronov B. A. Flooding in the Amur basin in 2013: causes and consequences // *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2014. № 2. pp. 5–14.
9. A Novel Approach for Modeling and Evaluating Road Operational Resilience Based on Pressure-State-Response Theory and Dynamic Bayesian Networks / Y. Gang et al. // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. pp. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137481>.
10. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods / G. Antonioni et al. // *Reliability Engineering and System Safety*. 2015. Vol. 142. pp. 334–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.020>.
11. Simonov V. V., Osadchiy O. V. Nature of the occurrence of floods, inundations and characterization of their striking factors // *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2014. № 1. pp. 9–19.
12. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas / V. Cozzani et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. Vol. 28. pp. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.07.009>.
13. Khakzad N. Impact of wildfires on Canada's oil sands facilities // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 18 (11). pp. 3153–3166. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3153-2018>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Чикир Мария Васильевна**, магистр строительства, младший научный сотрудник, аспирант НИЦ «НИР БСМ» УрО РАН (620049, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54-А); ПИНЦ ID: 1230207; ResearcherID: GWD-0052-2022; ORCID: 0000-0003-4295-098X; e-mail: mary-catchikir2012@yandex.ru

---

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Maria V. Chikir**, Master of Civil Engineering, Junior Researcher, Postgraduate student, SIC “NIR BSM” Ural Branch of RAS (54-A Studencheskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation); RSC ID: 1230207; ResearcherID: GWD-0052-2022; ORCID: 0000-0003-4295-098X; e-mail: mary-catchikir2012@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.02.2025

Одобрено после рецензирования 24.02.2025

Принята к публикации 15.06.2025