

Научная статья
УДК 519.816, 614.8, 51-7
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.30.95.003

Способ оценки параметров распределения Вейбулла при моделировании инцидентов, связанных с авариями на автомобильном транспорте

Александр Андреевич Воронин

Российский государственный социальный университет, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Александр Андреевич Воронин, stalkercrow@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема моделирования дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с целью повышения безопасности транспортной инфраструктуры и эффективности реагирования экстренных служб. Приоритетным вектором является разработка комплексного подхода и создание многофакторной модели прогнозирования аварий на автомобильном транспорте. Теоретическая база исследования формируется посредством изучения вероятных сценариев возникновения и развития чрезвычайных ситуаций в результате ДТП. Представленный методический подход базируется на совместном применении уравнений Колмогорова-Чепмена и распределения Вейбулла для количественной оценки временных характеристик переходов между состояниями системы.

В работе проведен детальный анализ возможных состояний системы с учетом работы четырех типов датчиков: температуры, давления, положения транспортного средства и удара. Описаны 16 возможных сценариев развития аварийной ситуации, каждый из которых характеризуется определенным набором параметров.

Особое внимание уделяется вопросу определения параметров распределения Вейбулла, для которых предлагается использовать метод экспертного оценивания ввиду недостатка статистических данных об авариях. Разработана система критериев оценки параметров распределения, включающая коэффициенты масштаба, формы и сдвига.

Прикладной потенциал исследования раскрывается через возможность использования разработанной модели для усиления результативности профилактических мероприятий и оптимизации процессов реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС). Результаты работы могут быть использованы при разработке систем безопасности, планировании действий экстренных служб и совершенствовании методов прогнозирования развития аварийных ситуаций. Предложенный подход позволяет более точно моделировать развитие аварийных ситуаций, что способствует улучшению системы реагирования на чрезвычайные ситуации и повышению общей безопасности транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: моделирование, дорожно-транспортное происшествие, безопасность, транспортная инфраструктура, экстренные службы, прогнозирование, дифференциальные уравнения, датчики, чрезвычайная ситуация

Для цитирования: Воронин А.А. Способ оценки параметров распределения Вейбулла при моделировании инцидентов, связанных с авариями на автомобильном транспорте // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 34-42. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.30.95.003>.

Original article.

A method for estimating the parameters of the Weibull distribution in modeling incidents related to accidents in road transport

Alexander A. Voronin

Russian State Social University, Moscow, Russia

Corresponding author: Alexander A. Voronin, stalkercrow@yandex.ru

Abstract. The article discusses the current problem of modeling traffic accidents (TA) in order to improve the safety of transport infrastructure and the efficiency of emergency services response. The priority vector is the development of an integrated approach and the creation of a multifactorial model for predicting accidents in road transport.

The theoretical basis of the study is formed by studying the possible scenarios of the occurrence and development of emergencies as a result of traffic accidents. The proposed methodological approach integrates the application of Kolmogorov-Chapman differential equations and the three-parameter Weibull distribution to quantify the temporal characteristics of system transitions.

The paper provides a detailed analysis of the possible states of the system, taking into account the operation of four types of sensors: temperature, pressure, vehicle position, and impact. The paper describes 16 possible scenarios for the development of an emergency situation, each of which is characterized by a specific set of parameters.

Special attention is paid to the issue of determining the parameters of the Weibull distribution, for which the method of expert estimation is proposed due to the lack of statistical data on accidents. A system of criteria for evaluating the distribution parameters has been developed, including the scale, shape, and shift coefficients.

The applied potential of the research is revealed through the possibility of using the developed model to enhance the effectiveness of preventive measures and optimize emergency response processes. The results of the work can be used in the development of security systems, planning the actions of emergency services, and improving the methods of forecasting the development of emergency situations.

The proposed approach allows for a more accurate modeling of the development of emergency situations, which contributes to improving the emergency response system and enhancing the overall safety of transport infrastructure.

Keywords: modeling, traffic accident, safety, transport infrastructure, emergency services, forecasting, differential equations, sensors, emergency situation

For citation: Voronin A.A. A method for estimating the parameters of the Weibull distribution in modeling incidents related to accidents in road transport // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 34-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.30.95.003>.

Дорожно-транспортные происшествия представляют собой острую социально-экономическую проблему в Российской Федерации, характеризующуюся высоким уровнем травматизма и существенным материальным ущербом. Благодаря новейшим технологиям и усовершенствованным методикам анализа удастся существенно сократить последствия аварийных ситуаций и улучшить оперативность работы специальных служб. Особое значение имеет прогнозирование инцидентов, позволяющее предупреждать и минимизировать риски возникновения ЧС на транспортных объектах [1].

Внедрение комплексных информационно-аналитических систем мониторинга позволяет значительно ускорить реагирование экстренных служб за счет непрерывного контроля транспортной безопасности, оперативной идентификации инцидентов и моментального оповещения о развитии аварийной ситуации [2;3].

Успешное моделирование аварийных ситуаций требует тщательного анализа вероятных сценариев развития экстренных событий. Табл.1 демонстрирует основные состояния системы при ДТП [4].

Табл.1. Диапазоны функционирования

№ п/п	Датчики				Сценарии
	Термодатчик	Давления	Ориентации ТС	Столкновения ТС	
1.	0	0	0	0	Штатный режим движения
2.	0	0	0	1	Столкновение
3.	0	0	1	0	Сваливание автомобиля
4.	0	0	1	1	Сваливание после удара
5.	0	1	0	0	Нарушение герметичности емкости
6.	0	1	0	1	Столкновение и последующее нарушение герметичности
7.	0	1	1	0	Сваливание и последующее нарушение герметичности
8.	0	1	1	1	Столкновение, сваливание и нарушение герметичности
9.	1	0	0	0	Возгорание в кабине или моторном отсеке ТС
10.	1	0	0	1	Столкновение и возгорание
11.	1	0	1	0	Сваливание и возгорание
12.	1	0	1	1	Столкновение, сваливание и возгорание
13.	1	1	0	0	Нарушение герметичности и возгорание
14.	1	1	0	1	Столкновение нарушение герметичности, возгорание
15.	1	1	1	0	Сваливание, нарушение герметичности, возгорание
16.	1	1	1	1	Столкновение, сваливание, нарушение герметичности, возгорание

Совокупность возможных конфигураций исследуемой системы, включающей четыре измерительных устройства (термодатчик, контроля давления, датчик ориентации ТС и обнаружения столкновений [5]), формирует набор из шестнадцати комбинаций [6].

Симуляция трансформаций между режимами работы системы при возникновении нештатных ситуаций базируется на решении уравнений Колмогорова-Чепмена [7;8]. Описание временной динамики интенсивности переходов между состояниями системы может быть осуществлено с использованием трёхпараметрического распределения Вейбулла [9]:

[illegible]

где, параметры распределения η , Θ и β характеризуют масштаб, сдвиг и форму изменений интенсивности λ^* в процессе переходов между различными состояниями системы.

Методика определения временной характеристики интенсивности переходов между режимами системы базируется на следующих ключевых шагах:

1. Идентификация параметров состояния системы. Представим подразделения, реагирующие на аварии, и их действия в виде многомерных булевых функций:

- f_1 – патрульные службы;
- f_2 – пожарно-спасательная служба;
- f_3 – службы экстренного реагирования;
- f_4 – разведка;
- f_5 – эвакуация населения;
- f_6 – ликвидация последствий аварий;
- x_1 – термодатчик;
- x_2 – устройство контроля давления (уровня);
- x_3 – датчик ориентации ТС;
- x_4 – датчик столкновения.

Табличная форма булевых функций представлена в Табл.2, где для всех датчиков определены бинарные состояния: $x_i = 0$ (режим неактивности) и $x_i = 1$ (режим срабатывания) [10].

Табл.2. Булевы функции

№ п/п	Датчики (измерительные устройства)				Элементы управленческих решений					
					Силы и средства			Мероприятия		
	x_1	x_2	x_3	x_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
1.	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
2.	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
3.	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
4.	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1
5.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1
7.	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1
8.	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
9.	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1
10.	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
11.	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
12.	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
13.	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
14.	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
15.	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
16.	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1

2. Построение системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, описывающей механизм переходов между состояниями исследуемой системы.

3. Модификация модели переходов путём замены интенсивности на функции Вейбулла для учёта временного аспекта.

4. Нахождение решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена посредством подходящих численных алгоритмов (таких как метод Рунге-Кутты или метод конечных разностей).

5. Идентификация параметров трёхпараметрического распределения Вейбулла, обеспечивающих оптимальное соответствие экспертным данным о динамике чрезвычайных ситуаций. Методологически целесообразно использовать метод наименьших квадратов.

В Табл.3 отражены возможные состояния системы и коэффициенты (β , η , Θ), определяемые экспертами как показатели масштаба, формы и сдвига.

Табл.3. Коэффициенты трёхпараметрического распределения Вейбулла

№ п/п	Состояние системы	β	η	Θ
1.	Штатный режим движения			
2.	Столкновение			
3.	Сваливание автомобиля			
4.	Сваливание после удара			
5.	Нарушение герметичности ёмкости			
6.	Столкновение и последующее нарушение герметичности			
7.	Сваливание и последующее нарушение герметичности			
8.	Столкновение, сваливание и нарушение герметичности			
9.	Возгорание в кабине или моторном отсеке ТС			
10.	Столкновение и возгорание			
11.	Сваливание и возгорание			
12.	Столкновение, сваливание и возгорание			
13.	Нарушение герметичности и возгорание			
14.	Столкновение, нарушение герметичности, возгорание			
15.	Сваливание, нарушение герметичности, возгорание			
16.	Столкновение, сваливание, нарушение герметичности, возгорание			

6. Создание временной модели изменения интенсивности переходов между состояниями системы с использованием трёхпараметрического распределения Вейбулла.

Экспертная оценочная таблица коэффициентов распределения Вейбулла представлена в виде Табл.4

Табл.4. Экспертная оценочная таблица

№ п/п	1	2	3	...	16
Состояние системы	Движение без аварии	Удар	Опрокидывание	...	Опрокидывание, разгерметизация, пожар
Коэф. масштаба (β)	Время до первого признака аварии	Время до стабилизации ситуации	Время до полной остановки	...	Комплексное время стабилизации
Оценка	0.0-1.0	0.0-1.0	0.0-1.0	...	0.0-1.0
Основание оценки	Статистика времени до срабатывания датчиков	Статистика стабилизации после удара	Статистика времени остановки	...	Статистика стабилизации всех процессов
Коэф. формы (η)	Скорость нарастания аварийной ситуации	Скорость развития последствий	Скорость процесса опрокидывания	...	Комплексная скорость развития
Оценка	0.0-1.0	0.0-1.0	0.0-1.0	...	0.0-1.0
Основание оценки	Динамика изменения параметров	Динамика последствий удара	Динамика опрокидывания	...	Динамика всех процессов
Коэф. сдвига (Θ)	Время до начала развития аварии	Время до первого сигнала	Время до начала процесса	...	Время до первого признака
Оценка	0.0-1.0	0.0-1.0	0.0-1.0	...	0.0-1.0
Основание оценки	Время от первого сигнала до развития	Время срабатывания датчиков удара	Время до начала опрокидывания	...	Время до первого сигнала

Критерии оценки параметров распределения Вейбулла приведены в Табл.5.

Табл.5. Критерии оценки параметров

Оценка	Коэффициент масштаба (β)	Коэффициент формы (η)	Коэффициент сдвига (Θ)
0.0	мгновенное развитие (менее 1 сек)	линейное нарастание	немедленная реакция
0.2	быстрое развитие (2-5 сек)	слабое ускорение	очень быстрая реакция (1-2 сек)
0.4	среднее развитие (10-30 сек)	умеренное ускорение	быстрая реакция (2-5 сек)
0.6	медленное развитие (1-2 мин)	быстрое ускорение	средняя реакция (5-10 сек)
0.8	затяжное развитие (5-10 мин)	экспоненциальное нарастание	медленная реакция (10-30 сек)
1.0	очень медленное развитие (более 30 мин)	максимально быстрое нарастание	очень медленная реакция (более 30 сек)

Каждый критерий (коэффициент) оценивается по шкале 0–1. Экспертная группа, состоящая из квалифицированных специалистов в области транспортной инфраструктуры и системной безопасности, проводит оценку возможных сценариев развития аварийной ситуации. Формирование экспертного мнения происходит на основе анализа трёх ключевых параметров распределения Вейбулла:

- Коэффициент масштаба (β) – оценивает время до первого признака аварии.
- Коэффициент формы (η) – определяет скорость развития аварийной ситуации.
- Коэффициент сдвига (Θ) – фиксирует момент начала развития аварии.

Стандарты оценки включают объективные показатели (статистика срабатывания датчиков, время стабилизации ситуации, исторические данные по авариям) и субъективные критерии (вероятность развития аварии, скорость нарастания опасности, время до стабилизации).

Процесс формирования оценки включает:

1. Анализ работы датчиков (температуры, давления, положения ТС, удара).
2. Изучение типовых сценариев аварий.
3. Оценку статистических данных.
4. Прогнозирование развития ситуации.

Контроль качества обеспечивается:

1. Сравнением оценок разных экспертов.
2. Проверкой на реальных данных.
3. Анализом согласованности мнений.
4. Корректировкой на основе практики.

Модель повышения эффективности реагирования на чрезвычайные ситуации при ДТП.

Состояние системы описывается через:

1. Параметры датчиков: x_1 (термо), x_2 (давление), x_3 (положение ТС), x_4 (удар).
2. Действия служб: f_1 (патрульные), f_2 (пожарные), f_3 (скорая), f_4 (разведка).

Функция интенсивности переходов между состояниями:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \Theta}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t - \Theta}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2)$$

где, β — коэффициент масштаба (время до первого признака аварии).

η — коэффициент формы (скорость развития ситуации).

Θ — коэффициент сдвига (время до начала развития аварии).

Целевая функция минимизации последствий:

$$F = C_1 \cdot T_r + C_2 \cdot D + C_3 \cdot R \quad (3)$$

где, T_r - время реагирования.

D - прогнозируемый ущерб.

R - затраченные ресурсы.

C₁ - весовые коэффициенты.

Вероятность успешного реагирования:

$$P = 1 - e^{-\alpha \cdot R - \beta / T_r} \quad (4)$$

где, T_r - время реагирования.

R - ресурсы на профилактику.

α, β - коэффициенты эффективности.

Блок-схема алгоритма применения модели представлен на Рисунке.

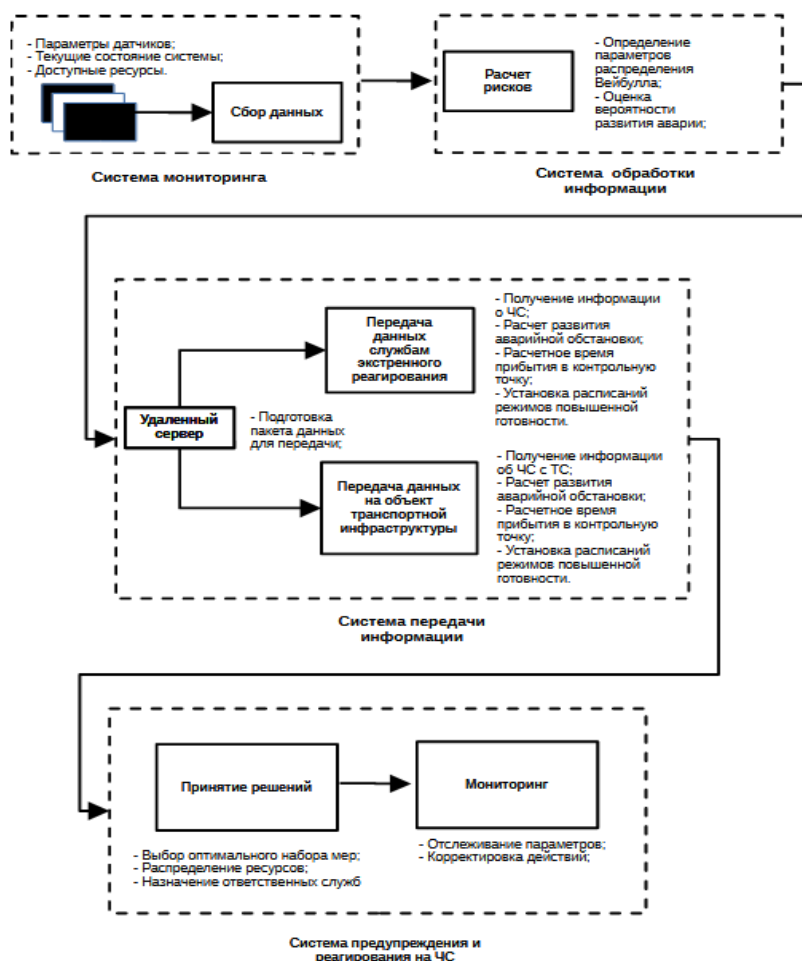


Рисунок. Блок-схема алгоритма применения модели

Практическая значимость проведённого исследования заключается в возможности эффективного применения созданной модели для совершенствования комплекса превентивных мер и повышения скорости реагирования на чрезвычайные ситуации в сфере транспортной инфраструктуры.

Полученные результаты найдут применение при проектировании систем безопасности, разработке стратегий действий экстренных служб и улучшении методик прогнозирования развития аварийных ситуаций.

Список источников

1. Воронин А.А., Хазратзода Д.Т., Прус Ю.В. Особенности автоматизации систем обеспечения безопасности объектов транспортной инфраструктуры при автомобильных перевозках опасных грузов: Сборник материалов X Всероссийской научно-практической

конференции, Иваново, 20 апреля 2023 года // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов, Иваново, 2023. С. 150–155.

2. Синицын В.В., Татаринов В.В., Прус Ю.В., Кирсанов А.А. Совершенствование процессов управления в системе обеспечения безопасности автомобильных перевозок опасных грузов // Технологии техносферной безопасности: электрон. науч. журн. 2019. № 1(83). С. 50–60.

3. Синицын В.В., Татаринов В.В., Прус Ю.В., Кирсанов А.А. Моделирование системы поддержки принятия управленческих решений при ликвидации последствий ДТП с опасными грузами // Технологии техносферной безопасности: электрон. науч. журн. 2019. № 2(84). С. 84–90.

4. Воронин А.А., Прус Ю.В. Моделирование возможных состояний системы, связанных с авариями на автомобильном транспорте: Материалы Второй Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 22–30 ноября 2023 года // Наука. Производство. Образование, Москва, 2024. С. 20–25.

5. Датчик удара: виды, назначение, установка // Autoshtool.ru: сайт. – URL: <http://www.autoshtool.ru/4695-datchik-udara-vidy-naznachenieustanovka.html> (дата обращения: 30.07.2025).

6. Татаринов В.В., Кирсанов А.А. Информационное обеспечение страхования безопасности автомобильных перевозок опасных грузов // Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия: электрон. журн. 2019. С. 492.

7. Прус М.Ю. Стохастическое моделирование каскадных сценариев возникновения и развития чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности: электрон. науч. журн. 2022. № 1(95). С. 170–195.

8. Губина Т.А., Алексеев А.А., Мосолов А.С. Физический смысл барьеров безопасности в методе «Анализ барьеров безопасности» // Успехи в химии и химической технологии: электрон. журн. 2016. Т. 30, № 8 (177). С. 26–28.

9. Пантелеев В.А., Кириллов И.А. Метод описания сценариев каскадных и межсистемных аварий с учётом вероятностных факторов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций: электрон. журн. 2019. № 5. С. 53–61.

10. Кирсанов А.А., Синицын В.В., Прус Ю.В. Автоматизированная система идентификации характера дорожно-транспортных происшествий с опасными грузами // Технологии техносферной безопасности: электрон. науч. журн. 2017. № 4(74). С. 111–115.

References

1. Voronin A.A., Hazratzoda D.T., Prus Yu.V. Features of automation of safety systems for transport infrastructure facilities during automobile transportation of dangerous goods: A collection of materials from the X All-Russian Scientific and Practical Conference, Ivanovo, April 20, 2023 // Actual issues of improving engineering systems for fire safety facilities, Ivanovo, 2023. pp. 150-155.

2. Sinitsyn V.V., Tatarinov V.V., Prus Yu.V., Kirsanov A.A. Improvement of management processes in the system of ensuring the safety of automobile transportation of dangerous goods // Technosphere safety technologies: electron. Scientific Journal 2019. No. 1(83). pp. 50-60.

3. Sinitsyn V.V., Tatarinov V.V., Prus Yu.V., Kirsanov A.A. Modeling of a management decision support system in the aftermath of an accident with dangerous goods // Technosphere safety technologies: electron. Scientific Journal 2019. No. 2(84). pp. 84-90.

4. Voronin A.A., Prus Yu.V. Modeling of possible system states associated with accidents in road transport: Proceedings of the Second All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, November 22-30, 2023 // Science. Production. Obrazovanie, Moscow, 2024. pp. 20-25.

5. Impact sensor: types, purpose, installation // Autoshtool.ru: the website. – URL: <http://www.autoshtool.ru/4695-datchik-udara-vidy-naznachenieustanovka.html> (accessed: 07.30.2025).

6. Tatarinov V.V., Kirsanov A.A. Information support of insurance of safety of automobile transportation of dangerous goods // IOP conference series: Materials science and engineering: electron. Journal. 2019. p. 492.

7. Prus M.Y. Stochastic modeling of cascade scenarios of occurrence and development of emergency situations // Technosphere safety technologies: electron. Scientific journal. 2022. No. 1(95). pp. 170-195.

8. Gubina T.A., Alekseev A.A., Mosolov A.S. The physical meaning of security barriers in the method of "Security barrier analysis" // Advances in chemistry and chemical technology: electron. Journal. 2016. Vol. 30, No. 8 (177). pp. 26-28.

9. Panteleev V.A., Kirillov I.A. Method of describing scenarios of cascade and intersystem accidents taking into account probabilistic factors // Problems of safety and emergency situations: electron. Journal. 2019. No. 5. pp. 53-61.

10. Kirsanov A.A., Sinitsyn V.V., Prus Yu.V. An automated system for identifying the nature of road accidents involving dangerous goods // Technosphere safety technologies: electron. Scientific Journal 2017. No. 4(74). pp. 111-115.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025, одобрена после рецензирования 16.08.2025, принята к публикации 15.09.2025.

The article was submitted 11.06.2025, approved after reviewing 16.08.2025, accepted for publication 15.09.2025.