

Функциональная зависимость между количеством вагонов в сходе из-за неисправностей вагонов или пути и факторами движения¹

Алексей М. Замышляев, АО «НИИАС», Москва, Россия

Алексей Н. Игнатов, Московский Авиационный институт, Москва, Россия

Андрей И. Кибзун, Московский Авиационный институт, Москва, Россия

Евгений О. Новожилов, АО «НИИАС», Москва, Россия



Алексей М.
Замышляев



Алексей Н. Игнатов



Андрей И. Кибзун



Евгений О.
Новожилов

Цель. Одним из наиболее опасных видов транспортных происшествий являются сходы железнодорожного подвижного состава, которые в зависимости от тяжести последствий могут также классифицироваться как аварии и крушения. Последствия схода могут быть весьма различны: от незначительного повреждения верхнего строения железнодорожного пути и повреждения вагонов в объеме текущего отцепочного ремонта до повреждения пути, требующего усиленного капитального ремонта, и повреждения вагонов до исключения из инвентаря, а также утраты груза и прерывания железнодорожного движения на длительный период времени. Необходимо отметить, что помимо ущерба от повреждения инфраструктуры и подвижного состава, при сходе вагонов существует риск создания экологической катастрофы. Российская Федерация наряду с США, Китаем и Индией обладает наиболее протяженной железнодорожной сетью в мире, которая проложена, в том числе, вдоль особо охраняемых природных территорий, например, национальных заповедников и парков. Поэтому, если поезд перевозил опасные грузы, например, бензин или токсичные газы, и часть его вагонов сошла с рельсов, то к последствиям схода добавится ущерб от экологической катастрофы. В этой связи актуальной задачей представляется оценка функциональной зависимости между потенциальным числом вагонов в сходе и различными факторами, например, скоростью движения поезда, его весом, для последующей выработки рекомендаций по снижению потенциального числа вагонов в сходе, а, следовательно, и по снижению возможного ущерба. **Методы.** Использованы методы теории вероятностей и математической статистики: метод максимального правдоподобия, отрицательная биномиальная регрессия. **Результаты.** Для различных групп происшествий: сход вследствие неисправности вагона или секций локомотива вне стрелки; сход вследствие неисправности рельсов вне стрелки; сход на стрелке, не вызванный ранее сошедшим составом – определены специфические функции среднего количества вагонов в сходе. Получена формула, которая позволяет при заданном наборе различных факторов движения: скорости поезда, плана и профиля пути, длины, веса поезда – определить ряд распределения количества вагонов в сходе. **Выводы.** В результате предварительного анализа имеющихся российских протоколов по сходам с рельсов подвижного состава в грузовых поездах было выявлено, что для различных групп транспортных происшествий описательные статистики соответствующих выборок значительно отличаются, что соответствует данным аналогичных американских протоколов. В результате построения функциональной зависимости между средним количеством вагонов в сходе и различными факторами по причине неисправности вагонов или секций локомотива вне стрелок было выявлено, что имеющихся протоколов недостаточно для прогнозирования количества вагонов в сходе в прямых участках пути. Для сходов по причине неисправности пути вне стрелок и сходов на стрелках построены математические модели с небольшим параметром сверхдисперсии.

Ключевые слова: сход с рельсов, крушение, факторы движения, метод максимального правдоподобия, отрицательная биномиальная регрессия.

Формат цитирования: Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Новожилов Е.О. Функциональная зависимость между количеством вагонов в сходе из-за неисправностей вагонов или пути и факторами движения¹// Надежность. 2018. Т. 18, № 1. С. 53-60. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-1-53-60

¹ Результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки № 2.2461.2017/ПЧ и при поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта № 17-20-03050 офи_м_РЖД

1. Введение

Отправной точкой при анализе факторов, приводящих к наиболее тяжелым последствиям при сходе вагонов при поездной работе, является исследование протоколов транспортных происшествий. За 2013-2016 гг. имеется 262 протокола сходов с рельсов вагонов в грузовых и пассажирских поездах, которые произошли в Российской Федерации, не считая протоколов транспортных происшествий, которые классифицированы как крушения. Если рассматривать железные дороги США и Индии, то из [1, 2] следует, что в США за 2015-2016 гг. произошло 2493 схода, а в Индии за промежуток с 2010-2011 по 2014-2015 годы произошло 293 сходов, данные по Китаю являются закрытыми. Логичным представляется использование для анализа американских протоколов, как это было сделано, например, для оценки ущерба от транспортных происшествий в [3], или индийских протоколов. Однако хотя содержание протоколов транспортных происшествий в России и в США в целом является похожим, существуют и отличия: в российских протоколах имеется информация о наличии или отсутствии стрелочного перевода в месте схода, плане и профиле участка пути, на котором произошел сход. Данные факторы мы полагаем влияющими не только на сам сход вагонов, но и на тяжесть последствий от схода. По транспортным происшествиям в Индии детальная информация в открытых источниках отсутствует. Поэтому использование американских или индийских протоколов не представляется целесообразным, и анализ будет производиться исключительно по российским данным.

При исследовании количества вагонов в сходе можно построить доверительный интервал для потенциального числа сошедших вагонов или попытаться установить закон распределения числа вагонов в сходе, однако этих характеристик недостаточно, поскольку они будут такими же, например, и для поезда, состоящего из 3 вагонов, и для поезда, состоящего из 63 вагонов. Поэтому необходимо отыскание функциональной зависимости между количеством вагонов в сходе и различными факторами. В [4] в качестве факторов, влияющих на последствия схода, были выделены скорость поезда в момент схода, остаточная длина состава (общее количество подвижных единиц, начиная с первой сошедшей), наличие дополнительных локомотивов в середине/хвосте состава, доля груженых вагонов. Однако информация о радиусе кривой и наличии уклона в месте схода в расчет не принималась. В [5] оценивался уровень схода (уровень опасности), зависящий от класса пути, пропущенного тоннажа, наличия систем сигнализации (например, контролирующей занятость поездом секции). Но получаемая зависимость носит интегральный характер и не позволяет для конкретного поезда снизить риск схода вагонов. В [6] исследовалась схожая задача поиска функциональной зависимости между вероятностью схода и длиной подвижного состава, пройденным количеством

километров поездом и классом пути. Однако геометрические особенности пути также не были учтены. В этой связи необходимо уточнение и модификация предложенных в [4-6] зависимостей для исследуемой задачи с целью выработки практических рекомендаций.

Исследование российских протоколов по случаям схода вагонов показало, что некоторые из них заполнены частично, т.е. имеет место проблема пропущенных данных. Пропущенные значения имеют место как по скорости движения поезда, при которой произошел сход, так и по количеству вагонов в поезде. Поскольку восстановить эти параметры довольно сложно, то из дальнейшего анализа эти наблюдения были исключены. Помимо этого некоторые сходы произошли не вследствие технических причин (состояния пути, состояния тележек вагонов), а вследствие погодных условий или человеческого фактора, которые невозможно выразить в номинальной шкале, потому такие наблюдения также были исключены из рассмотрения. Вследствие чего построение различных функциональных зависимостей в работе проводилось на основе 172 наблюдений, а также было проведено сравнение выборок с пропущенными данными и без таковых.

2. Предварительный анализ данных

Вначале построим диаграмму частот количества вагонов в сходе, а также найдем описательные статистики количества вагонов в сходе.

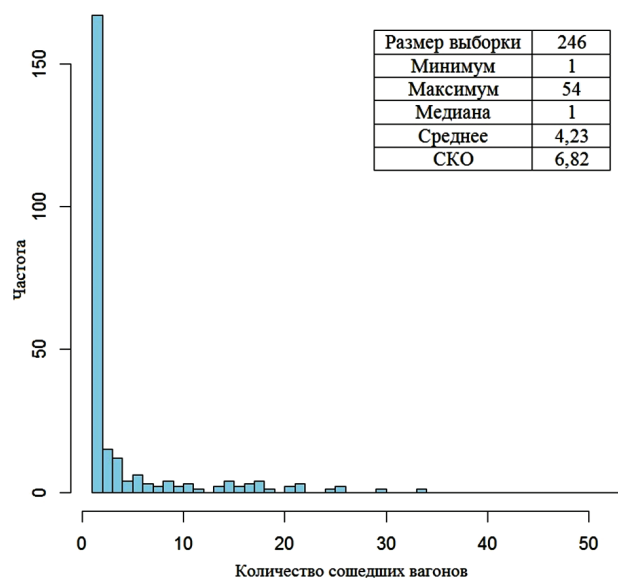


Рисунок 1 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов и крушении грузовых поездов

Как видно из рисунка 1, большинство происшествий происходит с одним вагоном в сходе, при этом среднее количество вагонов в сходе находится примерно на уровне 4 вагонов, а СКО составляет примерно 1,5 выборочного среднего. Поэтому важно отыскать функ-

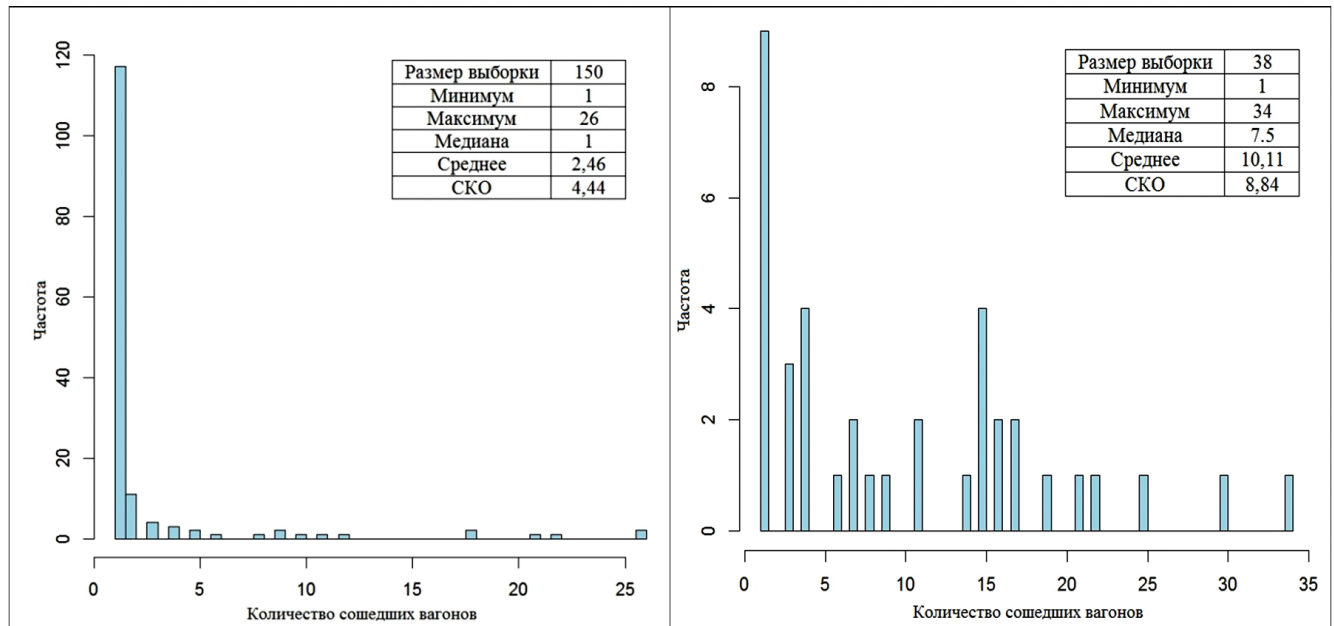


Рисунок 2 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов вне стрелок вследствие неисправности вагонов или секций локомотива (слева) и вследствие неисправности пути (справа)

циональную зависимость между количеством вагонов в сходе и параметрами сопутствующих факторов с целью уменьшения тяжести последствий схода.

При этом в зависимости от того, какая причина повлекла сход с рельсов подвижного состава и имелся ли стрелочный перевод в месте схода, описательные статистики количества вагонов в сходе будут отличаться.

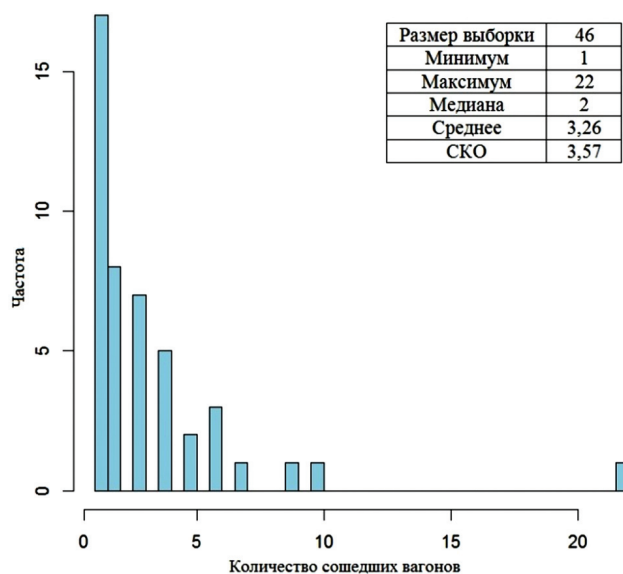


Рисунок 3 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов на стрелках, которые не вызваны ранее сошедшим составом, по причине неисправности пути или вагонов/секций локомотива

В дальнейшем будем проводить анализ отдельно для трех групп происшествий: сход вследствие неисправности вагона или секций локомотива вне стрелки; сход

вследствие неисправности рельсов вне стрелки; сход на стрелке, не вызванный ранее сошедшим составом, по причине неисправности пути или вагонов/секций локомотива. Отметим, что за рассматриваемый промежуток времени произошло 4 схода на стрелках вследствие того, что сошедший вагон, проходя стрелку, повредил ее, чем вызвал дополнительно сход других вагонов. Эти случаи мы классифицируем отдельно, поскольку не всегда сошедшая единица подвижного состава при прохождении стрелки вызывает дополнительно сход других вагонов.

3. Основные обозначения

Рассмотрим в j -й группе происшествий среди n_j протоколов транспортных происшествий, в которых произошел сход грузовых вагонов при поездной работе, некоторый i -й ($i = 1 \dots n_j$) протокол. Пусть для данного протокола

c_{ij} – общее количество сошедших единиц подвижного состава (секций локомотива и вагонов);

k_{ij} – номер (от головы поезда) первой из сошедших единиц подвижного состава;

v_{ij} – скорость поезда в момент схода, км/ч;

l_{ij} – количество вагонов в поезде;

l_{ij}^L – количество секций локомотивов в поезде;

w_{ij} – вес поезда, т;

α_{ij} – кривизна кривой в месте схода (величина, обратно пропорциональная радиусу кривизны кривой; для прямой кривизна полагается равной нулю), m^{-1} ;

γ_{ij} – профиль пути в месте схода, измеряемый в тысячных, имеющий знак минус, если уклон представляет спуск, и знак плюс, если уклон представляет подъем.

Также введем вспомогательную переменную $c_{ij}^{\max} = l_{ij}^L + l_{ij} - k_{ij} + 1$, которая является реализацией некоторой случайной

величины $C^{\max} = l' + l - K + 1$, где K – случайная величина, соответствующая номеру (от головы поезда) первой из сошедших единиц подвижного состава. В дальнейшем будем называть случайную величину $C^{\max}$ остаточной длиной поезда. Отметим, что имеется статистическая связь между количеством вагонов в сходе и остаточной длиной поезда [4, 7-8]. Введем вспомогательную функцию, характеризующую степень загруженности (loading factor в [4]) поезда полезной нагрузкой, которая зависит от веса поезда w и количества l перевозимых им вагонов, и вычисляемую по формуле

$$\tilde{\mu}(w, l) \stackrel{\text{def}}{=} \pi_1 \frac{w}{l} + \pi_2, \quad (1)$$

где π_1 и π_2 – неизвестные параметры. Соответственно, чем ближе функция $\tilde{\mu}(w, l)$ к нулю, тем больше порожних вагонов перевозит поезд. И наоборот, чем ближе к единице функция $\tilde{\mu}(w, l)$, тем меньше порожних и больше груженых вагонов перевозит поезд. Так как тара 4-осных вагонов составляет порядка 23 тонн, а грузоподъемность – порядка 69 тонн, то, приняв данные значения за основу, коэффициенты π_1 и π_2 можно найти, решив систему линейных уравнений

$$\begin{cases} 23\pi_1 + \pi_2 = 0, \\ (23 + 69)\pi_1 + \pi_2 = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Решив систему (2), получаем $\pi_1 = 1/69$, $\pi_2 = -1/3$. Подставив полученные значения π_1 и π_2 в (1), получаем

$$\tilde{\mu}(w, l) = \frac{w}{69l} - \frac{1}{3},$$

Обозначив $\tilde{\mu}_{ij} \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{\mu}(w_{ij}, l_{ij})$, получим степень загруженности поезда полезной нагрузкой при i -м сходе в j -й группе происшествий. Отметим, что в американских протоколах происшествий количество груженых вагонов указано явно, в то время как в российских протоколах такая характеристика отсутствует, поэтому приходится выполнять некоторую оценку отношения количества груженых вагонов к общему количеству вагонов.

Отметим, что в некоторых протоколах могут отсутствовать те или иные характеристики или они могут быть указаны нечетко, поэтому возникает проблема пропущенных данных. Часто пропущенные значения усредняют имеющимися, однако в данной задаче такой подход не представляется возможным, поскольку каждое транспортное происшествие уникально, а их количество не велико. Поэтому в дальнейшем для каждой группы происшествий будем сравнивать выборки с пропущенными значениями и с полным набором требуемых характеристик.

4. Постановка задачи и метод ее решения

Рассмотрим j -ю группу транспортных происшествий, общее количество которых за рассматриваемый проме-

жуток времени равно n_j . Пусть C_j – случайная величина, характеризующая количество вагонов и секций локомотива, которые сойдут при сходе с рельсов для некоторой группы происшествий. Поскольку в сходе обязательно будет не менее одной единицы подвижного состава, то имеет место равенство

$$C_j = 1 + \tilde{C}_j,$$

где $\tilde{C}_j$ – вспомогательная неотрицательная случайная величина, закон распределения которой мы в дальнейшем будем оценивать, имеющая значения во множестве Z_+ . Отметим, что ряды распределения случайных величин C_j и $\tilde{C}_j$ зависят от набора параметров $w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{A}, \gamma$ и от реализации $c^{\max}$ случайной величины $C^{\max}$, а реализации $\tilde{c}_{ij}$ случайной величины $\tilde{C}_j$ можно получить из соотношения $\tilde{c}_{ij} = c_{ij} - 1$.

Так как случайная величина $\tilde{C}_j$ является дискретной, то применять аппарат линейной регрессии для оценки функциональной зависимости между этой случайной величиной и параметрами $c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{A}, \gamma$ некорректно. Частично похожим способом на линейную регрессию для целочисленной зависимой переменной является порядковая регрессия, однако в настоящем случае ее применять также некорректно, так как не для всех чисел из диапазона значений реализации выборки имеются сходы с идентичным количеством сошедших вагонов. Еще один способ отыскания искомой зависимости – квантильная регрессия [9]. Однако в силу небольшого количества наблюдений достоверность результатов квантильной регрессии на уровне надежности, к примеру, $\alpha = 0,999$ и 40 наблюдений, вызывает сомнения. Поэтому будем использовать метод максимального правдоподобия и отрицательную биномиальную регрессию, а именно будем полагать условное распределение $\tilde{C}_j$ обобщенно отрицательно биномиальным распределением с параметрами r_j и p_j .

Соотношения отрицательной биномиальной регрессии для рассматриваемого случая имеют вид [10-11]:

$$\left\{ \begin{aligned} P\{\tilde{C}_j = \tilde{c} \mid C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{A}, \gamma\} &= \\ &= \frac{\Gamma(\tilde{c} + r_j)}{\Gamma(\tilde{c} + 1)\Gamma(r_j)} p_j^{\tilde{c}} (1 - p_j)^{r_j}, \\ \mathbf{M}[\tilde{C}_j \mid C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{A}, \gamma] &= \frac{p_j r_j}{1 - p_j}, \\ \mathbf{D}[\tilde{C}_j \mid C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{A}, \gamma] &= \frac{p_j r_j}{(1 - p_j)^2}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Пусть

$$\begin{aligned} \mathbf{M}[\tilde{C}_j \mid C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{A}, \gamma] &= \\ = f_j(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{A}, \gamma), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D[\tilde{C}_j | C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma] = \\ = f_j(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)(1 + \\ + \theta_j f_j(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)). \end{aligned} \quad (5)$$

где $f_j(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)$ – некоторая функция, как правило, являющаяся экспоненциальным преобразованием от линейной по подлежащим определению параметрам $a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j}$ функции, параметр $\theta_j > 0$ характеризует сверхдисперсию и также подлежит определению.

Подставив (4), (5) в (3) и введя для удобства дополнительное обозначение $a_j^{\text{def}} = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{m_j j})^T$, получаем

$$p_j = \frac{\theta_j f_j(a_j, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)}{1 + \theta_j f_j(a_j, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma)}, r_j = \frac{1}{\theta_j}.$$

Таким образом

$$\begin{aligned} P\{\tilde{C}_j = \tilde{c}_{ij} | C^{\max} = c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma\} = \\ = \frac{\Gamma(\tilde{c}_{ij} + 1/\theta_j)}{\Gamma(\tilde{c}_{ij} + 1)\Gamma(1/\theta_j)} (\theta_j f_j(a_j, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma))^{\tilde{c}_{ij}} \times \\ \times (1 + \theta_j f_j(a_j, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma))^{-(\tilde{c}_{ij} + 1/\theta_j)}. \end{aligned}$$

Построим логарифмическую функцию правдоподобия

$$\begin{aligned} \bar{L}_j(a_j, \theta_j, \tilde{c}_{ij}, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij}, i = \overline{1, n_j}) = \\ = \ln \left(\prod_{i=1}^{n_j} P\{\tilde{C}_j = \tilde{c}_{ij} | c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij}\} \right) = \\ = -n_j \ln(\Gamma(1/\theta_j)) + \sum_{i=1}^{n_j} (\ln(\Gamma(\tilde{c}_{ij} + 1/\theta_j)) + \\ + \tilde{c}_{ij} \ln(\theta_j f_j(a_j, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij})) - \\ - (\tilde{c}_{ij} + 1/\theta_j) \ln(1 + \theta_j f_j(a_j, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij})) - \\ - \ln(\Gamma(\tilde{c}_{ij} + 1))). \end{aligned}$$

Поставим задачу по отысканию неизвестного вектора a_j и параметра θ_j

$$\begin{aligned} (\theta_j^*, a_j^*)^T = \\ = \arg \max_{a_j \in R_j^m, \theta_j > 0} \bar{L}_j(a_j, \theta_j, \tilde{c}_{ij}, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij}, i = \overline{1, n_j}). \end{aligned} \quad (6)$$

Отметим, что качество построенной модели (выбора функции $f_j(\cdot)$) характеризуется не только оптимальным значением логарифмической функции максимального правдоподобия $\bar{L}_j(a_j^*, \theta_j^*, \tilde{c}_{ij}, c_{ij}^{\max}, w_{ij}, l_{ij}, \tilde{\mu}_{ij}, \mathfrak{a}_{ij}, \gamma_{ij}, i = \overline{1, n_j})$, но и значением параметра θ_j^* . Чем ближе параметр θ_j^* к нулю, тем построенная модель лучше, поскольку дисперсия случайной величины $\tilde{C}_j$ линейна по параметру θ .

5. Решение задачи

Вначале опишем общие принципы выбора функций $f_j(\cdot)$. Согласно [9] функции следует выбирать экспонентами от некоторой линейной по оцениваемым параметрам регрессии функции. Согласно [4] в качестве факторов, сопутствующих транспортному происшествию, выбираются логарифмы скорости поезда, логарифмы остаточной длины поезда, степень загруженности поезда полезной нагрузкой, а также их различные комбинации. Теперь рассмотрим отдельно каждую группу транспортных происшествий.

5.1. Сход вследствие неисправности вагона или секций локомотива вне стрелки

Для данной группы транспортных происшествий выберем функцию $f_j(\cdot)$ вида

$$\begin{aligned} f_1(a_1, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = f_1(a_1, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = \\ = \chi_{\mathfrak{a} \neq 0} \exp\{a_{11} + a_{21} \mathfrak{a} \ln(v) + a_{31} (1 - \tilde{\mu}) \ln(c^{\max}) \ln(v) \cdot \\ \cdot \min(0, \gamma) + a_{41} (1 - \tilde{\mu}) \ln(c^{\max}) + a_{51} (1 - \tilde{\mu})^2 \ln(c^{\max}) \ln(v) \cdot \\ \cdot \min(0, \gamma) + a_{61} \tilde{\mu} + a_{71} \chi_{\gamma > 0} \tilde{\mu} \ln(c^{\max}) \ln(v)\} + \\ + \chi_{\mathfrak{a} = 0} \exp\{a_{81} + a_{91} \chi_{\gamma < 0} \ln(c^{\max}) \ln(v) + a_{101} \chi_{\gamma > 0} \tilde{\mu} \ln(v) \ln^2(c^{\max})\}, \end{aligned}$$

где χ_A – характеристическая (индикаторная) функция некоторого события A , т.е.

$$\chi_A = \begin{cases} 0, & x \notin A, \\ 1, & x \in A. \end{cases}$$

Прокомментируем выбор функции $f_j(\cdot)$. Функция распадается на два слагаемых: первое характеризует тяжесть последствий от схода в кривых ($\chi_{\mathfrak{a} \neq 0}$), а второе – тяжесть последствий от схода в прямых участках пути ($\chi_{\mathfrak{a} = 0}$).

В части, связанной со сходами в кривых, можно выделить три группы слагаемых: первая группа содержит слагаемые с параметрами a_{11} и a_{21} , которые инвариантны относительно степени загруженности поезда, вторая группа содержит слагаемые с параметрами a_{31}, a_{41}, a_{51} , влияние которых увеличивается с уменьшением степени загрузки поезда, третья группа содержит слагаемые с параметрами a_{61}, a_{71} , влияние которых увеличивается с увеличением степени загрузки поезда. Тяжесть последствий для загруженных поездов усиливает наличие подъема, а для порожних поездов усиливает не только наличие спуска, но и его величина. Общим для всех групп слагаемых является то, что практически в каждом слагаемом есть либо логарифм скорости движения, либо логарифм максимального количества вагонов в сходе, а порой и их произведение. Это связано с тем, что с увеличением скорости поезда и остаточной длины поезда потенциальное количество сошедших вагонов также увеличивается.

В части, связанной со сходами в прямых, слагаемое с параметром a_{91} отлично от нуля в случае движения на

Таблица 1 – Оценки максимального правдоподобия a_{11}^* , a_{21}^* , ..., a_{101}^* , θ_1^* по выборке со сходами в кривых и прямых участках пути

a_{11}^*	a_{21}^*	a_{31}^*	a_{41}^*	a_{51}^*	a_{61}^*	a_{71}^*	a_{81}^*	a_{91}^*	a_{101}^*	θ_1^*
-7,76	315,69	286,88	0,63	-333,03	4,32	0,17	-1,55	0,2	0,04	3,83

Таблица 2 – Оценки максимального правдоподобия a_{11}^* , a_{21}^* , ..., a_{101}^* , θ_1^* по выборке со сходами только в кривых участках пути (построены по 65 наблюдениям)

a_{11}^*	a_{21}^*	a_{31}^*	a_{41}^*	a_{51}^*	a_{61}^*	a_{71}^*	a_{81}^*	a_{91}^*	a_{101}^*	θ_1^*
-7,25	307,22	284,43	0,54	-329,86	3,85	0,16	—	—	—	1,87

Таблица 3 – Оценки максимального правдоподобия a_{11}^* , a_{21}^* , ..., a_{101}^* , θ_1^* по выборке со сходами только в прямых участках пути (построены по 35 наблюдениям)

a_{11}^*	a_{21}^*	a_{31}^*	a_{41}^*	a_{51}^*	a_{61}^*	a_{71}^*	a_{81}^*	a_{91}^*	a_{101}^*	θ_1^*
—	—	—	—	—	—	—	-1,52	0,2	0,04	6,05

спусках, слагаемое с параметром a_{101} отлично от нуля в случае движения на подъемах. При этом сходы с серьезными последствиями (более 15 вагонов в сходе) происходили не на крутых спусках или подъемах, поэтому используются лишь наличие спуска или подъема, а не сама величина подъема или спуска.

В результате решения задачи (6) получаем следующие оценки максимального правдоподобия a_{11}^* , a_{21}^* , ..., a_{101}^* , θ_1^* (таблица 1).

Отметим, что в случае подъема в кривых участках пути все слагаемые помимо константы в функции $f_j(\cdot)$ оказываются неотрицательными при полученных значениях параметров a_{21}^* , ..., a_{101}^* . Таким образом, любое увеличение параметров $c^{\max}$, v , $\tilde{\mu}(w, l)$, α приводит к большему среднему количеству вагонов в сходе, что соответствует физике схода. В случае спуска в кривых участках пути имеется неположительное слагаемое с параметром a_{61}^* . Это связано, в частности, с тем, что при небольшой загрузке поездов $\tilde{\mu} < 0,13587$ выборочное среднее количества вагонов в сходе составило 4,54 вагона при выборочном среднем в 1,38 вагона в случае $\tilde{\mu} \geq 0,13587$. Данный факт подтверждается предложенной моделью в силу того, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1(a_1^*, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma)}{\partial \gamma} &= \\ &= f_1(a_1^*, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \alpha, \gamma)(a_{31}^*(1 - \tilde{\mu}) \ln(v) \ln(c^{\max}) + \\ &+ a_{51}^*(1 - \tilde{\mu})^2 \ln(v) \ln(c^{\max})) < 0 \Leftrightarrow a_{31}^* + a_{51}^*(1 - \tilde{\mu}) < 0 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow 1 - \tilde{\mu} < -\frac{a_{31}^*}{a_{51}^*} \Leftrightarrow \tilde{\mu} > 1 + \frac{a_{31}^*}{a_{51}^*} = 0,13587. \end{aligned}$$

Отметим, что протоколов по сходу в прямых недостаточно, поскольку, если рассмотреть отдельно выборки по сходам в прямых и в кривых участках пути, получаются следующие результаты (таблица 2).

Сравнивая результаты в таблицах 1, 2, 3, заключаем, что совместное рассмотрение сходов в кривых и прямых участках пути несколько видоизменяет прогнозируемое

среднее количество вагонов в сходе в кривых участках пути, оставляя практически неизменным среднее количество вагонов в сходе в прямых участках пути. При этом дисперсия, характеризуемая параметром θ_1^* , изменяется существенно. Поэтому следует разделять сходы в кривых участках пути и сходы в прямых участках пути.

Более того, при обработке данных оказалось, что выборочное среднее количества сошедших вагонов в прямых больше выборочного среднего количества сошедших вагонов в кривых участках пути (3,74 вагона против 2,23 вагона). Поэтому желательно дополнительное исследование как с точки зрения глубины исследования (увеличения количества рассматриваемых протоколов), так и с точки зрения качества рассматриваемых протоколов, а именно уточнения сведений о причинах происшествий и характеристик пути в месте схода, особенно для сходов с рельсов в прямых участках пути.

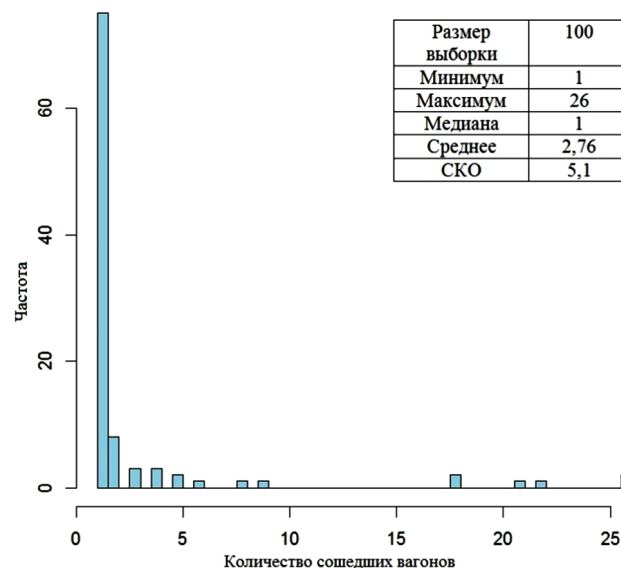


Рисунок 4 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов вне стрелок вследствие неисправности вагонов или секций локомотива по выборке без пропущенных данных

Подробный пример использования полученных соотношений приведен в [12].

Анализ в данном разделе проводился по выборке со следующими характеристиками (рисунок 4).

5.2. Сход вследствие неисправности пути вне стрелки

Для данной группы транспортных происшествий выберем функцию $f_2(\cdot)$ вида

$$f_2(a_2, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = f_2(a_2, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = \exp\{a_{12} + a_{22}\tilde{\mu} + a_{32} \ln(v) + a_{42} \ln(c^{\max})\}.$$

Принцип построения функции $f_2(\cdot)$ схож с принципом построения функции $f_1(\cdot)$ и одновременно данная функция похожа на функцию, предлагаемую для оценки среднего количества вагонов в сходе по причине неисправности пути [4]. Кроме того, в функции $f_2(\cdot)$, в отличие от функции $f_1(\cdot)$, отсутствует параметр γ . Это связано с тем, что из 38 происшествий, произошедших по причине неисправности пути, в 11 случаях не удастся определить величину спуска или уклона. Также отсутствует параметр $\mathfrak{a}$, поскольку с учетом данного параметра не найдена модель с наилучшим значением логарифмической функции правдоподобия.

В результате решения задачи (6) получаем следующие оценки максимального правдоподобия $a_{12}, a_{22}, a_{32}, a_{42}, \theta_2^*$ (таблица 4).

Таблица 4 – Оценки максимального правдоподобия $a_{12}^*, a_{22}^*, a_{32}^*, a_{42}^*, \theta_2^*$

a_{12}^*	a_{22}^*	a_{32}^*	a_{42}^*	θ_2^*
-6,4	1,01	0,68	1,48	0,3

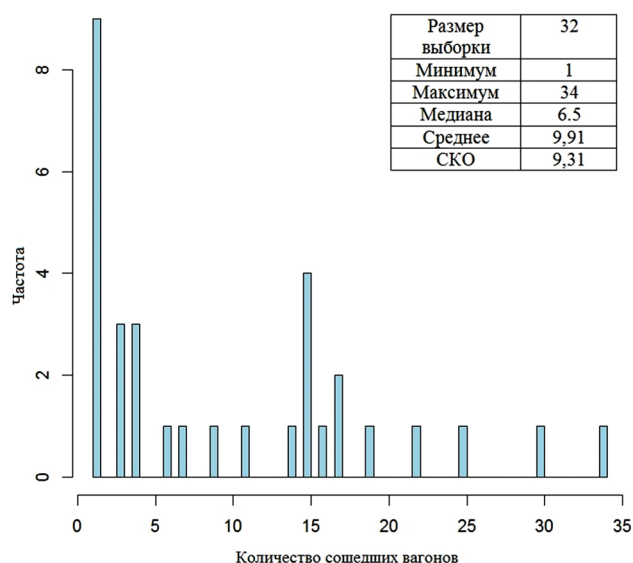


Рисунок 5 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов вне стрелок вследствие неисправности пути по выборке без пропущенных данных

Все слагаемые функции $f_2(\cdot)$ оказываются положительными, а значит, любое увеличение параметров движения приведет к большему среднему количеству вагонов в сходе, что является логичным.

Анализ в данном разделе проводился по выборке со следующими характеристиками (рисунок 5).

5.3. Сход на стрелке, не вызванный ранее сошедшим составом

Для данной группы транспортных происшествий выберем функцию $f_3(\cdot)$ вида

$$f_3(a_3, c^{\max}, w, l, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = f_3(a_3, c^{\max}, \tilde{\mu}(w, l), \mathfrak{a}, \gamma) = \exp\{a_{13} + a_{23}\tilde{\mu} \ln(v) + a_{33}\tilde{\mu} \ln^2(c^{\max}) + a_{43} \ln(v) + a_{53} \ln(v) \ln(c^{\max})\}.$$

Отметим, что в данном случае функция $f_3(\cdot)$ не содержит переменных γ и $\mathfrak{a}$, поскольку их определение для происшествий на стрелках только исходя из протоколов крайне затруднительно, а порой и вовсе невозможно.

В результате решения задачи (6) получаем следующие оценки максимального правдоподобия $a_{13}, a_{23}, \dots, a_{53}, \theta_3^*$ (таблица 5).

Таблица 5 – Оценки максимального правдоподобия $a_{13}^*, a_{23}^*, \dots, a_{53}^*, \theta_3^*$

a_{13}^*	a_{23}^*	a_{33}^*	a_{43}^*	a_{53}^*	θ_3^*
-1,49	0,99	-0,16	-0,91	0,43	0,41

Анализ в данном разделе проводился по выборке со следующими характеристиками (рисунок 6).

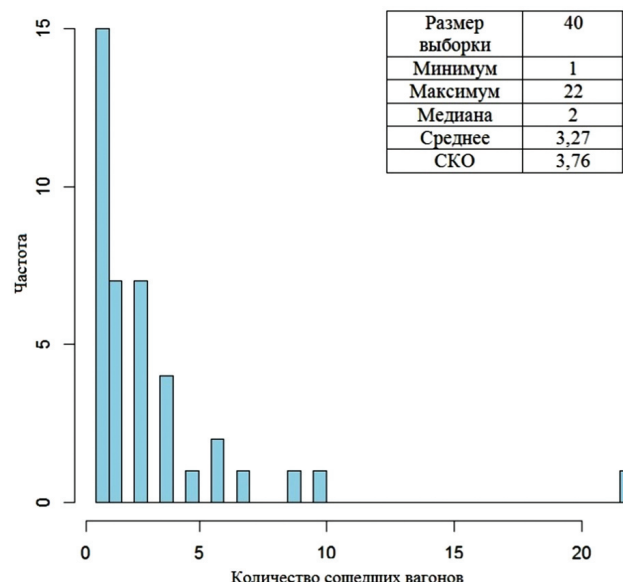


Рисунок 6 – Диаграмма частот и описательные статистики количества вагонов в сходе при сходе с рельсов грузовых поездов на стрелках, которые не вызваны ранее сошедшим составом

6. Заключение

В настоящей статье построена функциональная зависимость между средним количеством грузовых вагонов в сходе с рельсов и различными факторами движения: скоростью поезда, планом и профилем пути, длиной и массой поезда. Определены различные группы транспортных происшествий: сход вследствие неисправности вагона или секций локомотива вне стрелки; сход вследствие неисправности рельсов вне стрелки; сход на стрелке, не вызванный ранее сошедшим составом. Для каждой группы транспортных происшествий при помощи метода максимального правдоподобия и отрицательной биномиальной регрессии получены функции среднего количества вагонов в сходе. Получена формула, которая позволяет при заданном наборе различных факторов движения: скорости поезда, плана и профиля пути, длины и веса поезда – определить ряд распределения количества вагонов в сходе. Результаты данного исследования в дальнейшем могут быть использованы при оценке рисков схода с рельсов подвижного состава в грузовых поездах на сети железных дорог Российской Федерации.

Библиографический список

1. <http://safetydata.fra.dot.gov/>
2. <http://www.indianrailways.gov.in/>
3. Горяинов А.В., Замышляев А.М., Платонов Е.Н. Анализ влияния факторов на ущерб от происшествий с помощью регрессионных моделей // Надежность. 2013. Т. 2. С. 126-144.
4. Liu X., Saat M. R., Qin X., Barkan C. P. L. Analysis of U.S. freight-train derailment severity using zero-truncated negative binomial regression and quantile regression // Accident Analysis and Prevention. 2013. V. 59. P. 87-93.
5. Liu X., Rapik Saat M., Barkan C. P. L. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis // Accident Analysis and Prevention. 2017. V. 98. P. 1-9.
6. Anderson R.T., Barkan C.P.L. Derailment probability analysis and modeling of mainline freight trains // Proceedings of the 8th International Heavy Haul Conference, International Heavy Haul Association, Rio de Janeiro. 2005. P. 491-497.

7. Bagheri M., Saccomanno F., Chenouri S., Fu L.P. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist // Accident Analysis and Prevention. 2011. V. 43. P. 613-620.

8. Saccomanno F.F., El-Hage S. Minimizing derailments of railcars carrying dangerous commodities through effective marshaling strategies // Transportation Research Record. 1989. V. 1245. P. 34-51.

9. Koenker R., Hallock K. F.. Quantile Regression // Journal of Economic Perspectives. 2001. V. 15. No. 4. P. 143-156.

10. DeGroot M. H., Schervish M. J. Probability and Statistics (Fourth ed.). Addison-Wesley, 2012.

11. Cameron A. C. and Trivedi P. K. Essentials of Count Data Regression in A Companion to Theoretical Econometrics (ed B. H. Baltagi). Blackwell Publishing Ltd, 2003.

12. Замышляев А.М., Игнатов А.Н. и др. Об оценке количества вагонов в сходе при поездной работе на основе факторных моделей // Труды шестой научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование. ИСУЖТ-2017». 2017. С. 132-135.

Сведения об авторах

Алексей М. Замышляев – доктор технических наук, заместитель Генерального директора АО «НИИ-АС», Москва, Россия, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: a.zamyshlyayev@vniias.ru

Алексей Н. Игнатов – Московский Авиационный институт, аспирант, Москва, Россия, тел. +7 (906) 059 50 00, alexei.ignatov1@gmail.com

Андрей И. Кибзун – доктор физико-математических наук, профессор, Московский Авиационный институт, заведующий кафедрой, Москва, Россия, тел. +7 (499) 158-45-60, e-mail: kibzun@mail.ru

Евгений О. Новожилов – кандидат технических наук, начальник отдела АО «НИИАС», Москва, Россия, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: eo.novozhilov@vniias.ru

Поступила 16.10.2017