

Научная статья

УДК 51.74, 614.0.06, 614.842.6(8); DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140

## **О МОДЕЛИРОВАНИИ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ПОЖАРАХ НА ПОДЗЕМНЫХ АВТОСТОЯНКАХ**

✉Таранцев Александр Алексеевич.

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия.

Матвеев Александр Владимирович;

Поташев Дмитрий Анатольевич;

Шкитронов Михаил Евгеньевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉t\_54@mail.ru

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы, связанные с моделированием каскадного развития чрезвычайных ситуаций, в частности пожаров на автостоянках. Показано, что при возгорании автомобиля может пострадать как он сам, так и соседние автомобили. Показано, что ущерб от пожара может носить каскадный характер и будет обуславливаться тем, как скоро начнется тушение и восстановление нормального функционирования автостоянки, как быстро будут проведены ремонтно-восстановительные работы. Оценка вероятностей состояний автостоянки «нормальное функционирование – пожары – тушение – восстановление» проведена двумя способами – с использованием методов теории марковских процессов (с дискретным временем) и адаптированных систем массового обслуживания (с непрерывным временем). Получены аналитические выражения и приведены примеры, проведено сопоставление результатов оценки вероятностей состояний, полученных двумя способами.

*Ключевые слова:* аварийная ситуация, каскадное развитие, автостоянка, пожар, тушение, восстановление

**Для цитирования:** Таранцев А.А., Матвеев А.В., Поташев Д.А., Шкитронов М.Е. О моделировании каскадного развития чрезвычайных ситуаций при пожарах на подземных автостоянках // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 131–140. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140.

Scientific article

## **ON MODELING THE CASCADE DEVELOPMENT OF EMERGENCY SITUATIONS DURING FIRE IN UNDERGROUND PARKING**

✉Tarantsev Alexander A.

N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian academy of sciences,  
Saint-Petersburg, Russia.

Matveev Aleksandr V.;

Potashev Dmitriy A.;

Shkitronov Mihail E.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉t\_54@mail.ru

*Abstract.* The issues related to modeling the cascade development of emergency situations, in particular, fires in parking lots, are considered. It is shown that when a car catches fire, both it and neighboring cars can suffer. It is shown that the damage from the fire can be of a cascading nature and will be determined by how soon the extinguishing and restoration of the normal functioning of the parking lot will begin – how quickly repair and restoration work will be carried

out. The assessment of the probabilities of the parking lot conditions «normal functioning – fires – extinguishing – restoration» was carried out in two ways – using the methods of the theory of Markov processes (with discrete time) and adapted queuing systems (with continuous time). Analytical expressions are obtained and examples and comparison of the results of estimating the probabilities of states obtained in two ways are given.

*Keywords:* emergency, cascade development, parking, fire, extinguishing, restoration

**For citation:** Tarantsev A.A., Matveev A.V., Potashev D.A., Shkitronov M.E. On modeling the cascade development of emergency situations during fire in underground parking // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 3 (67). P. 131–140. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-131-140.

## Введение

Пожары и чрезвычайные ситуации (ЧС) в случае запаздывания с принятием мер по их локализации и ликвидации могут носить каскадный характер, достигать больших масштабов, представлять угрозу для людей и отрицательно сказываться на функционировании пострадавших объектов.

Это в полной мере относится к автостоянкам [1], в том числе подземным (рис. 1 а). Возгорание автомобиля, если он не будет потушен автоматической установкой пожаротушения (АУП) [2] или прибывшим пожарным караулом [3], может привести к горению соседних автомобилей (рис. 1 б), быстрому росту опасных факторов пожара (ОФП) [4, 5] и угрозе жизни и здоровью водителей, пассажиров и персонала автостоянки [6]. Ремонтно-восстановительные работы после пожара (рис. 1 в) могут оказаться весьма затратными и потребовать значительное время.



Рис. 1. Подземная автостоянка (а), пожар на ней (б) и его последствия (в)

Вопросам моделирования пожаров на автостоянках посвящены труды как отечественных [7, 8], так и зарубежных авторов [9, 10]. Однако существенной сложностью является то, что такого рода пожары могут приводить к каскадному развитию чрезвычайных ситуаций, когда при распространении огня загораются несколько автомобилей [11, 12]. В этой связи представляется целесообразным проводить моделирование опасных процессов, которые могут носить каскадный характер, в частности пожаров автомобилей в подземных автостоянках.

## Математические модели каскадных процессов пожара на автостоянке

Для моделирования каскадного развития пожара на автостоянке может быть применен известный математический аппарат цепей Маркова [13, 14]. Для примера будут рассмотрены три сценария возможных пожаров: когда горит один автомобиль, два автомобиля и три автомобиля, а также происходит их тушение и восстановление автостоянки для последующей эксплуатации. Графы переходов для вышеуказанных сценариев приведены на рис. 2, пояснения состояний – в табл. 1.

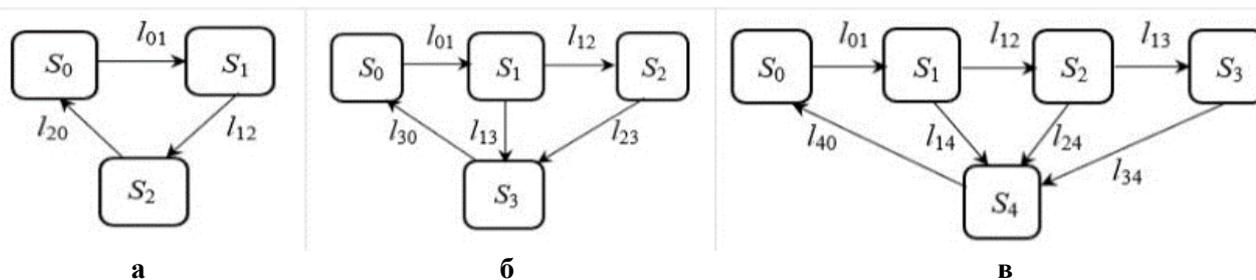


Рис. 2. Графы переходов для сценариев с тремя (а), четырьмя (б) и пятью (в) состояниями при каскадном развитии пожара на автостоянке ( $\{l_{ij}\}$  – «веса» дуг)

Таблица 1

### Состояния процессов при каскадном развитии пожара на автостоянке

Сценарий	Состояния	Граф переходов
1	$S_0$ – нормальное функционирование автостоянки; $S_1$ – горит один автомобиль; $S_2$ – тушение автомобиля и проведение аварийно-восстановительных работ	Рис. 2 а
2	$S_0$ – нормальное функционирование автостоянки; $S_1$ – горит один автомобиль; $S_2$ – загорелся соседний автомобиль; $S_3$ – тушение автомобилей и проведение аварийно-восстановительных работ	Рис. 2 б
3	$S_0$ – нормальное функционирование автостоянки; $S_1$ – горит один автомобиль; $S_2$ – загорелся соседний автомобиль; $S_3$ – загорелся другой соседний автомобиль; $S_4$ – тушение автомобилей и проведение аварийно-восстановительных работ	Рис. 2 в

Следует обратить внимание, что после тушения пожара необходимо проведение аварийно-восстановительных работ (анализ состояния несущих конструкций и кабельного хозяйства, удаление копоти и обломков, косметический ремонт и т.п.), то есть приведение автостоянки из состояния после пожара (рис. 1 в) в состояние нормального функционирования (рис. 1 а).

Задача исследования заключается в том, чтобы по начальным значениям вероятностей  $\{P^0\}$  состояний  $\{S\}$  и «весам» дуг  $\{l_{ij}\}$  оценить динамику вероятностей состояний  $\{P(t)\}$  и конечные состояния  $\{P^k\}$  при установившихся процессах. Это позволит в итоге установить, насколько система противопожарной защиты автостоянки эффективна, и даст возможность ей устойчиво находиться в состоянии  $S_0$  нормального функционирования либо приведет к необходимости принятия мер по повышению вероятности  $P_0$  за счет изменения весов дуг  $\{l_{ij}\}$ .

Такая задача может решаться с использованием цепей Маркова как с дискретным<sup>1</sup>, так и с непрерывным временем.

### Моделирование каскадного развития пожара цепями Маркова с дискретным временем

Применение цепей Маркова с дискретным временем предполагает в качестве «весов» дуг использовать вероятности переходов, то есть  $\{l_{ij}\} \rightarrow \{p_{ij}\}$ , образующие матрицы переходов  $P$ , и пошаговое определение динамики вероятностей каждого  $i$ -го состояния  $P_i^0 \rightarrow P_i^1 \rightarrow P_i^2 \rightarrow \dots \rightarrow P_i^k$ . Данный алгоритм подробно описан в книгах [15, 16], но ввиду значительной трудоемкости реализуется компьютерными методами [17]. Основные требования к матрицам переходов  $P$ : сумма элементов в каждой строке = 1, все элементы неотрицательные.

<sup>1</sup> Термин «цепи с дискретным временем» не вполне корректен, так как время напрямую в них не используется.

Применительно к вышеописанным сценариям (рис. 2, табл. 1) матрицы принимают вид:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1-p_{01} & p_{01} & 0 \\ 0 & 1-p_{12} & p_{12} \\ p_{20} & 0 & 1-p_{20} \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 1-p_{01} & p_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 1-p_{12}-p_{13} & p_{12} & p_{13} \\ 0 & 0 & 1-p_{23} & p_{23} \\ p_{30} & 0 & 0 & 1-p_{30} \end{bmatrix},$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 1-p_{01} & p_{01} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-p_{12}-p_{14} & p_{12} & 0 & p_{14} \\ 0 & 0 & 1-p_{23}-p_{24} & p_{23} & p_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1-p_{34} & p_{34} \\ p_{40} & 0 & 0 & 0 & 1-p_{40} \end{bmatrix}.$$

Определение вероятностей состояний автостоянки рассмотрим на конкретных примерах.

**Пример 1.** Пусть при сценарии № 1 (рис. 2 а) вероятность возгорания автомобиля в подземной автостоянке за анализируемый период  $p_{01}=0,01^2$ , вероятность тушения  $p_{12}=0,1$ , вероятность восстановления автостоянки  $p_{20}=0,2$ , а в начальный момент автостоянка функционирует в нормальном режиме:  $P_0^0=1$  (очевидно:  $P_1^0 = P_2^0 = 0$ ).

Проведенное компьютерное моделирование пошаговым методом показало (ввиду ограниченности объема статьи протокол расчета не приводится, пример такого протокола приведен в статье [18]), что процесс возгорания – тушения – восстановления автостоянки стабилизируется на 71-м шаге, вероятности состояний принимают значения:  $P_0^{71}=0,8696$ ;  $P_1^{71}=0,0870$ ;  $P_2^{71}=0,0434$ . Это можно интерпретировать так: из 100 стоянок подобного типа ~87 будут функционировать в нормальном режиме, на ~9-и возможны пожары, а на ~4-х проводиться ремонтно-восстановительные работы.

**Пример 2.** Пусть при сценарии № 2 (рис. 2 б), как и ранее,  $p_{01}=0,01$ , вероятность тушения автомобиля  $p_{13}=0,1$ , вероятность перехода пожара на соседний автомобиль  $p_{12}=0,2$ , вероятность тушения пожара на автостоянке  $p_{23}=0,05$ , а вероятность восстановления автостоянки  $p_{30}=0,3$ . В начальный момент  $P_0^0=1$ ,  $P_1^0 = P_2^0 = P_3^0 = 0$ .

Процесс возгорания – тушения – восстановления автостоянки стабилизируется позже – на 151-м шаге, вероятности состояний:  $P_0^{151}=0,8333$ ;  $P_1^{151}=0,0287$ ;  $P_2^{151}=0,1111$ ;  $P_3^{151}=0,0278$ .

**Пример 3.** Пусть при сценарии № 3 (рис. 2 в), как и ранее,  $p_{01}=0,01$ , вероятность тушения автомобиля  $p_{14}=0,1$ , вероятность перехода пожара на соседний автомобиль  $p_{13}=0,2$ , вероятность тушения этих двух автомобилей  $p_{24}=0,05$ , вероятность перехода пожара на другой соседний автомобиль  $p_{23}=0,3$ , вероятность тушения всех трех автомобилей  $p_{34}=0,03$ . В начальный момент  $P_0^0=1$ ,  $P_1^0 = P_2^0 = P_3^0 = P_4^0 = 0$ .

Процесс возгорания – тушения – восстановления автостоянки стабилизируется еще позже – на 203-м шаге, вероятности состояний:  $P_0^{203}=0,7888$ ;  $P_1^{203}=0,0263$ ;  $P_2^{203}=0,0150$ ;  $P_3^{203}=0,1502$ ;  $P_4^{203}=0,0197$ .

Тем не менее вышеописанный подход имеет недостатки: сложность определения вероятностей переходов  $\{p_{ij}\}$ , трудоемкость вычислений и невозможность получения результирующих аналитических выражений (хотя в работе [17] такие выражения были получены для частного случая). Это аспекты, безусловно, затрудняют применимость марковских цепей с дискретным временем.

<sup>2</sup> Величины этой и других вероятностей приняты условно.

## Моделирование каскадного развития пожара цепями Маркова с непрерывным временем

В этой связи наш выдающийся математик А.Н. Колмогоров еще в 30-х гг. XX в. показал, что если существует предел:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(t, t+\Delta t)}{\Delta t} = \lambda_{ij},$$

то можно от вероятностей переходов  $\{p_{ij}\}$  перейти к интенсивностям переходов  $\{\lambda_{ij}\}$ , размерность которых обратная единицам времени [15]. На практике это означает переход от марковских цепей с дискретным временем к цепям с непрерывным временем  $t$ , а также, что такие цепи можно описывать системами обыкновенных дифференциальных уравнений, то есть получать в итоге прямые аналитические выражения для оценки вероятностей состояний цепи:  $P_i(t, \lambda_{ij})$ .

Для нашего случая в графах переходов на рис. 2 «веса» дуг  $\{l_{ij}\}$  заменяются на интенсивности переходов  $\{\lambda_{ij}\}$ . Применительно к рассматриваемым сценариям (табл. 1) системы дифференциальных уравнений, соответствующие графам на рис. 2, приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Системы дифференциальных уравнений для сценариев пожара на автостоянке

Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda_{01}P_0 + \lambda_{20}P_2,$ $\frac{dP_1}{dt} = \lambda_{01}P_0 - \lambda_{12}P_1,$ $\frac{dP_2}{dt} = -\lambda_{20}P_2 + \lambda_{12}P_1,$	$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda_{01}P_0 + \lambda_{30}P_3,$ $\frac{dP_1}{dt} = \lambda_{01}P_0 - (\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1,$ $\frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - \lambda_{23}P_2,$ $\frac{dP_3}{dt} = \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2 - \lambda_{30}P_3,$	$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda_{01}P_0 + \lambda_{40}P_4,$ $\frac{dP_1}{dt} = \lambda_{01}P_0 - (\lambda_{12} + \lambda_{14})P_1,$ $\frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2,$ $\frac{dP_3}{dt} = \lambda_{34}P_2 - \lambda_{14}P_3,$ $\frac{dP_4}{dt} = \lambda_{14}P_1 + \lambda_{24}P_2 + \lambda_{34}P_3 - \lambda_{40}P_4,$

Решение дифференциальных уравнений, приведенных в табл. 2, при начальных условиях  $P_0(0)=1, P_{i>0}(0)=0$  было получено в явном виде. В частности, для сценария № 1:

$$\begin{cases} P_0 = \left\{ 1 + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12}} [1 - \exp(-\lambda_{12}t)] + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{20}} [1 - \exp(-\lambda_{12}t)][1 - \exp(-\lambda_{20}t)] \right\}^{-1}, \\ P_1 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12}} [1 - \exp(-\lambda_{12}t)] P_0, \\ P_2 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{20}} [1 - \exp(-\lambda_{12}t)][1 - \exp(-\lambda_{20}t)] P_0. \end{cases}$$

Выражения для вероятностей  $P_i(t), i=0, 1, 2 \dots$  состояний автостоянки при сценариях 2 и 3 также имеют экспоненциальный вид, но ввиду их громоздкости здесь не приводятся.

Однако с практической точки зрения интерес представляют установившиеся режимы в цепях, когда  $dP/dt \rightarrow 0$ , то есть автостоянки длительное время работают в режиме «нормальное функционирование – пожар – тушение – восстановление». При этом системы дифференциальных уравнений (табл. 2) преобразуются в системы линейных алгебраических уравнений. Выражения для вероятностей  $P_i(t \rightarrow \infty), i=0, 1, 2 \dots$  состояний автостоянки имеют вид:

– для сценария № 1:

$$\begin{cases} P_0 = \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{20}}\right)^{-1}, \\ P_1 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12}} P_0, \\ P_2 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{20}} P_0, \end{cases} \quad (1)$$

– для сценария № 2:

$$\begin{cases} P_0 = \left[1 + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} + \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}}{\lambda_{23}(\lambda_{12} + \lambda_{13})} + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{30}}\right]^{-1}, \\ P_1 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} P_0, \\ P_2 = \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}}{\lambda_{23}(\lambda_{12} + \lambda_{13})} P_0, \\ P_3 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{30}} P_0, \end{cases} \quad (2)$$

– для сценария № 3:

$$\begin{cases} P_0 = \left[1 + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12} + \lambda_{14}} + \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}}{(\lambda_{23} + \lambda_{24})(\lambda_{12} + \lambda_{14})} + \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}\lambda_{23}}{\lambda_{34}(\lambda_{23} + \lambda_{24})(\lambda_{12} + \lambda_{14})} + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{40}}\right]^{-1}, \\ P_1 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12} + \lambda_{14}} P_0, \\ P_2 = \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}}{(\lambda_{23} + \lambda_{24})(\lambda_{12} + \lambda_{14})} P_0, \\ P_3 = \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}\lambda_{23}}{\lambda_{34}(\lambda_{23} + \lambda_{24})(\lambda_{12} + \lambda_{14})} P_0, \\ P_4 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{40}} P_0. \end{cases} \quad (3)$$

Нахождение вероятностей состояний автостоянки, полученных с использованием марковских цепей с непрерывным временем, рассмотрим на примерах.

**Пример 4.** Пусть при сценарии № 1 (рис. 2 а) возгорание автомобиля в подземной автостоянке может происходить с интенсивностью<sup>3</sup>  $\lambda_{01}=0,01$ , интенсивность тушения  $\lambda_{12}=0,1$ , интенсивность восстановления автостоянки  $\lambda_{20}=0,2$ . Требуется найти вероятности состояний автостоянки при установившемся режиме работы.

Оценка вероятностей состояний автостоянки, проведенная по выражению (1), позволила получить следующий результат:

$$\begin{cases} P_0 = \left(1 + \frac{0,01}{0,1} + \frac{0,01}{0,2}\right)^{-1} \approx 0,8696, \\ P_1 = \frac{0,01}{0,1} 0,8696 \approx 0,0870, \\ P_2 = \frac{0,01}{0,2} 0,8696 \approx 0,0434. \end{cases}$$

**Пример 5.** Пусть при сценарии № 2 (рис. 2 б), как и ранее,  $\lambda_{01}=0,01$ , интенсивность тушения автомобиля  $\lambda_{13}=0,1$ , интенсивность перехода пожара на соседний автомобиль  $\lambda_{12}=0,2$ , интенсивность тушения пожара на автостоянке  $\lambda_{23}=0,05$ , а интенсивность

<sup>3</sup> Величины интенсивностей приняты условно.

восстановления автостоянки  $\lambda_{30}=0,3$ . Как и ранее, требуется найти вероятности состояний автостоянки при установившемся режиме работы.

Оценка вероятностей состояний автостоянки, проведенная по выражению (2), позволила получить следующий результат:

$$\begin{cases} P_0 = \left[ 1 + \frac{0,01}{0,2 + 0,1} + \frac{0,01 \cdot 0,2}{0,05(0,2 + 0,1)} + \frac{0,01}{0,3} \right]^{-1} \approx 0,8333, \\ P_1 = \frac{0,01}{0,2 + 0,1} 0,8333 \approx 0,0278, \\ P_2 = \frac{0,01 \cdot 0,2}{0,05(0,2 + 0,1)} 0,8333 \approx 0,1111, \\ P_3 = \frac{0,01}{0,3} 0,8333 \approx 0,0278. \end{cases}$$

**Пример 6.** Пусть при сценарии № 3 (рис. 2 в), как и ранее,  $\lambda_{01}=0,01$ , интенсивность тушения автомобиля  $\lambda_{14}=0,1$ , интенсивность перехода пожара на соседний автомобиль  $\lambda_{13}=0,2$ , интенсивность тушения этих двух автомобилей  $\lambda_{24}=0,05$ , интенсивность перехода пожара на другой соседний автомобиль  $\lambda_{23}=0,3$ , интенсивность тушения всех трех автомобилей  $\lambda_{34}=0,03$ . Как и ранее, требуется найти вероятности состояний автостоянки при установившемся режиме работы.

Оценка вероятностей состояний автостоянки, проведенная по выражению (3), позволила получить следующий результат:

$$\begin{cases} P_0 = \left[ 1 + \frac{0,01}{0,2 + 0,1} + \frac{0,01 \cdot 0,2}{(0,3 + 0,05)(0,2 + 0,1)} + \frac{0,01 \cdot 0,2 \cdot 0,3}{0,03(0,3 + 0,05)(0,2 + 0,1)} + \frac{0,01}{0,4} \right]^{-1} \approx 0,7888, \\ P_1 = \frac{0,01}{0,2 + 0,1} 0,7888 \approx 0,0263, \\ P_2 = \frac{0,01 \cdot 0,2}{(0,3 + 0,05)(0,2 + 0,1)} 0,7888 \approx 0,0150, \\ P_3 = \frac{0,01 \cdot 0,2 \cdot 0,3}{0,03(0,3 + 0,05)(0,2 + 0,1)} 0,7888 \approx 0,1502, \\ P_4 = \frac{0,01}{0,4} 0,7888 \approx 0,0197. \end{cases}$$

Как видим, результаты оценок вероятностей состояния автостоянки для сценариев пожара 1–3, найденные в примерах 5–6 с использованием цепей Маркова с непрерывным временем, совпадают с аналогичными результатами, полученными в примерах 1–3, что подтверждает их правильность.

### Выводы

Таким образом, в статье рассмотрены три сценария каскадного развития пожара на подземной автостоянке и получены согласующиеся оценки вероятностей состояний автостоянки двумя способами – с использованием цепей Маркова с дискретным и непрерывным временем.

В дальнейшем представляется целесообразным рассмотреть сценарии каскадного развития ситуации, когда помимо пожара на автостоянке автомобиля на жидком топливе существует риск взрыва газобаллонного автомобиля, а также загорания электромобиля [19].

**Список источников**

1. СП 506.1311500.2021. Стоянки автомобилей. Требования пожарной безопасности. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
2. СП 485.1311500. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: docs.cntd.ru/document/573004280 (дата обращения: 18.05.2023).
3. Боевой устав подразделений пожарной охраны, определяющий порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ (с изм.): приказ МЧС России от 16 окт. 2017 г. № 444 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542610435> (дата обращения: 18.05.2023).
4. Modeling of smoke control in underground parking-garage fires / B. Alianto [et al.] // International journal of technology. 2017. Vol. 8. № 7. P. 1296–1305.
5. Performance-based fire behaviour analysis for underground parking structures / I. Heo [et al.] // International journal of urban sciences. 2016. Vol. 20. № sup1. P. 90–100. DOI: 10.1080/12265934.2016.1178165.
6. The simulation of fires in underground parking floors by fire dynamic simulator / M.W. Hsu [et al.] // Sensors & materials. 2017. Vol. 29. № 4. DOI: 10.18494/SAM.2017.1525.
7. Моделирование распространения опасных факторов пожара в многоуровневой открытой автостоянке при наличии противопожарной стены вблизи одной из сторон / А.В. Карпов [и др.] // Техносферная безопасность. 2021. № 4 (33). С. 89–100. EDN SNVCRZ.
8. Седов Д.В., Шубкин Р.Г., Никулин М.А. Прогнозная оценка последствий пожара в подземной автостоянке для соседних объектов // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2021. № 2 (2). С. 6–13. EDN LSJUTB.
9. Rajora D., Yadav B.P. Review on fire safety in car parking // Proceedings of national conference: advanced structures, materials and methodology in civil engineering (ASMMCE–2018). 2018. P. 595–598.
10. Tohir M. Z. M., Spearpoint M. Development of fire scenarios for car parking buildings using risk analysis // Fire safety science. 2014. Vol. 11. P. 944–957. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.11-944.
11. Márton T., Dederichs A., Giuliani L. Modelling of fire in an open car park // Applications of structural fire engineering. 2015. DOI: 10.14311/asfe.2015.060.
12. Markert F., Giuliani L. Hydrogen-fueled car fire spread to adjacent vehicles in car parks // International conference on hydrogen safety: conference paper. 2019.
13. Кемени Д., Снелл Д. Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970. 271 с.
14. Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. СПб.: Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего», 2022. 733 с. DOI: 10.37468/book\_011222. EDN CCRIRT.
15. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
16. Матвеев А.В. Методы моделирования и прогнозирования. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 230 с. EDN: IMLKWS.
17. Танклевский Л.Т., Зыбина О.А., Таранцев А.А. О применение марковских цепей к задачам поддержания готовности организационных и технических систем // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. 2023. № 2 (62). Т. 12. С. 26–34.
18. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабилов И.А. Метод управления поддержанием готовности средств противопожарной защиты с использованием марковских цепей // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2022. № 4. С. 60–69.
19. Krol M., Krol A. The threats related to parking electric vehicle in underground car parks // Intelligent solutions for cities and mobility of the future 17. 2022. P. 72–81. DOI: 10.1007/978-3-030-91156-0\_6.

## References

1. SP 506.1311500.2021. Stoyanki avtomobilej. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».
2. SP 485.1311500. Sistemy protivopozharnoj zashchity. Ustanovki pozharotusheniya avtomaticheskie. Normy i pravila proektirovaniya // Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. URL: docs.cntd.ru/document/573004280 (data obrashcheniya: 18.05.2023).
3. Boevoj ustav podrazdelenij pozharnoj ohrany, opredelyayushchij poryadok organizacii tusheniya pozharov i provedeniya avarijno-spasatel'nyh rabot (s izm.): prikaz MCHS Rossii ot 16 okt. 2017 g. № 444 // Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542610435> (data obrashcheniya: 18.05.2023).
4. Modeling of smoke control in underground parking-garage fires / B. Alianto [et al.] // International journal of technology. 2017. Vol. 8. № 7. P. 1296–1305.
5. Performance-based fire behaviour analysis for underground parking structures / I. Heo [et al.] // International journal of urban sciences. 2016. Vol. 20. № sup1. P. 90–100. DOI: 10.1080/12265934.2016.1178165.
6. The simulation of fires in underground parking floors by fire dynamic simulator / M.W. Hsu [et al.] // Sensors & materials. 2017. Vol. 29. № 4. DOI: 10.18494/SAM.2017.1525.
7. Modelirovanie rasprostraneniya opasnyh faktorov pozhara v mnogourovnevoj otkrytoj avtostoyanke pri nalichii protivopozharnoj steny vblizi odnoj iz storon / A.V. Karpov [i dr.] // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. № 4 (33). S. 89–100. EDN SNVCRZ.
8. Sedov D.V., Shubkin R.G., Nikulin M.A. Prognoznaya ocenka posledstvij pozhara v podzemnoj avtostoyanke dlya sosednih ob"ektov // Aktual'nye problemy bezopasnosti v tekhnosfere. 2021. № 2 (2). S. 6–13. EDN LSJUTB.
9. Rajora D., Yadav B.P. Review on fire safety in car parking // Proceedings of national conference: advanced structures, materials and methodology in civil engineering (ASMMCE–2018). 2018. P. 595–598.
10. Tohir M. Z. M., Spearpoint M. Development of fire scenarios for car parking buildings using risk analysis // Fire safety science. 2014. Vol. 11. P. 944–957. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.11-944.
11. Márton T., Dederichs A., Giuliani L. Modelling of fire in an open car park // Applications of structural fire engineering. 2015. DOI: 10.14311/asfe.2015.060.
12. Markert F., Giuliani L. Hydrogen-fueled car fire spread to adjacent vehicles in car parks // International conference on hydrogen safety: conference paper. 2019.
13. Kemeni D., Snell D. Konechnye cepi Markova. M.: Nauka, 1970. 271 s.
14. Butyrskij E.Yu., Matveev A.V. Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov. SPb.: Informacionnyj izdatel'skij uchebno-nauchnyj centr «Strategiya budushchego», 2022. 733 s. DOI: 10.37468/book\_011222. EDN CCRIRT.
15. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij. M.: Sovetskoe radio, 1972. 552 s.
16. Matveev A.V. Metody modelirovaniya i prognozirovaniya. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 230 s. EDN: IMLKWS.
17. Tanklevskij L.T., Zybina O.A., Tarancev A.A. O primenenie markovskih cepej k zadacham podderzhaniya gotovnosti organizacionnyh i tekhnicheskikh sistem // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego. 2023. № 2 (62). T. 12. S. 26–34.
18. Tanklevskij L.T., Tarancev A.A., Babikov I.A. Metod upravleniya podderzhanijem gotovnosti sredstv protivopozharnoj zashchity s ispol'zovaniem markovskih cepej // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2022. № 4. S. 60–69.
19. Krol M., Krol A. The threats related to parking electric vehicle in underground car parks // Intelligent solutions for cities and mobility of the future 17. 2022. P. 72–81. DOI: 10.1007/978-3-030-91156-0\_6.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 17.08.2023; одобрена после рецензирования: 23.08.2023;  
принята к публикации: 25.08.2023

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 17.08.2023; approved after review: 23.08.2023;  
accepted for publication: 25.08.2023

*Информация об авторах*

**Таранцев Александр Алексеевич**, заведующий лабораторией проблем безопасности транспортных систем Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (199178, Санкт-Петербург, 12-я Линия ВО, д. 13); профессор кафедры организации и пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр. д.149), e-mail: [t\\_54@mail.ru](mailto:t_54@mail.ru), ResearcherID: K-2087-2018, AuthorID: 57195636448; <https://orcid.org/0000-0003-1561-2483>, SPIN-код: 1076-8133

**Матвеев Александр Владимирович**, заведующий кафедрой прикладной математики и информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: [fcvega\\_10@mail.ru](mailto:fcvega_10@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>, AuthorID: 618571, SPIN-код: 5778-8832

**Поташев Дмитрий Анатольевич**, старший преподаватель-методист Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: [dim-po@igps.ru](mailto:dim-po@igps.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2190-399X>, SPIN-код: 7346-2221

**Шкитронов Михаил Евгеньевич**, доцент кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: [shkitronov@mail.ru](mailto:shkitronov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7887-0530>, AuthorID: 560765, SPIN-код: 8488-9210

*Information about authors*

**Tarantsev Alexander A.**, head of the laboratory of safety problems of transport systems of the N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian academy of sciences (199178, Saint-Petersburg, 12 Line VO, d. 13), professor of the department of fire extinguishing and emergency rescue operations of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149); honored worker of the higher school of the Russian Federation, e-mail: [t\\_54@mail.ru](mailto:t_54@mail.ru), ResearcherID: K-2087-2018, AuthorID: 57195636448, <https://orcid.org/0000-0003-1561-2483>, SPIN: 1076-8133

**Matveev Aleksandr V.**, head of the department of applied mathematics and information technology of Saint-Petersburg university of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: [fcvega\\_10@mail.ru](mailto:fcvega_10@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>, AuthorID: 618571, SPIN: 5778-8832

**Potashev Dmitry A.**, senior lecturer and methodologist of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: [dim-po@igps.ru](mailto:dim-po@igps.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2190-399X>, SPIN: 7346-2221

**Shkitronov Mikhail E.**, associate professor of the department of physical and chemical fundamentals of combustion and extinguishing processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: [shkitronov@mail.ru](mailto:shkitronov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7887-0530>, AuthorID: 560765, SPIN: 8488-9210,