

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 39–51
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):39-51

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 519.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.06.39-51>

Применение машинообучаемых цепей Маркова для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития

**Николай Григорьевич Топольский¹, Валерий Яковлевич Вилисов^{2✉},
Ренат Шамильевич Хабибулин¹, Борис Михайлович Пранов³,
Феликс Владимирович Демехин⁴**

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Московская обл., г. Королев, Россия

³ Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва, Россия

⁴ Региональная общественная организация содействия развитию деятельности в сфере пожарной безопасности «Коллегия пожарных экспертов», г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Моделирование процессов развития и ликвидации пожаров требует учета большого количества случайных факторов о среде пожара и доступных ресурсах для его ликвидации. Важной особенностью развития пожаров является их пошаговый характер, где одна фаза (стадия) закономерно сменяется другой в результате как протекания физических процессов горения, так и решений, принятых в тех или иных состояниях пожара. В практике моделирования многофазных (многостадийных) процессов широко используются такие их модели, как деревья решений, многошаговые позиционные игры, случайные процессы, в числе которых значимое место занимают дискретные цепи Маркова, и др. Все эти модели имеют каждая свою структуру и параметры. Выбор структуры модели для той или иной прикладной задачи является эвристическим шагом. Параметры моделей практически всегда задаются, исходя из логических умозаключений, физики протекающих процессов и имеющихся статистических данных о моделируемом явлении. Такой подход обычно называют нормативным. Его альтернативой является адаптивный подход, при котором параметры моделей оцениваются по ретроспективным данным. Такой подход позволяет построить достаточно адекватные реальным объектам модели, способные адаптироваться к нестационарностям среды и изменчивости предпочтений ЛПР.

Актуальность исследования заключается в разработке технологии машинного обучения марковских моделей процесса развития пожара, позволяющих прогнозировать время завершения как отдельных его фаз, так и пожара в целом. Марковская модель может служить и основой определения оптимального ранга пожара.

Цели и задачи. Целью работы является создание и апробация технологии построения моделей, позволяющих строить оценки времени завершения пожара. В соответствии с этой целью поставлены и задачи машинного обучения модели и ее использования для прогнозирования и определения ранга пожара.

Методы. В исследовании использованы методы теории случайных процессов, математическая статистика, имитационное моделирование, технико-экономическое оценивание. Исследование основано на материалах отечественных и зарубежных публикаций.

Результаты и их обсуждение. Предложенный метод машинного обучения цепей Маркова по статистическим данным о времени реагирования пожарно-спасательных подразделений, а также использование обученных моделей и технико-экономических оценок для назначения оптимального ранга пожара позволяют применять построенные на их основе алгоритмы в составе систем поддержки принятия решений пожарной безопасности.

Выводы. Представленные результаты решения задачи построения адекватных моделей для прогнозирования фаз развития пожара и определения ранга пожара дают основание для построения эффективных систем поддержки принятия решений на оперативном горизонте управления пожарной безопасностью.

Ключевые слова: время реагирования; платежная функция; байесовские оценки; рекуррентная процедура оценивания; имитационное моделирование

Для цитирования: Топольский Н.Г., Вилисов В.Я., Хабибулин Р.Ш., Пранов Б.М., Демехин Ф.В. Применение машинообучаемых цепей Маркова для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 39–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.39-51

✉ Вилисов Валерий Яковлевич, e-mail: vvib@yandex.ru

Application of Markov chains to rank fires and forecast fire development phases

Nikolay G. Topolskiy¹, Valeriy Ya. Vilisov²✉, Renat Sh. Khabibulin¹,
Boris M. Pranov³, Felix V. Demekhin⁴

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, Pilot-Cosmonaut A.A. Leonov, Moscow Region, Korolev, Russian Federation

³ Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

⁴ Panel of Fire Experts Regional Public Organization for Promoting Fire Safety Assurance Activities, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Introduction. The simulation of fire development and suppression processes must take account of a large number of random factors concerning the fire environment and the resources, available for its putting out. An important feature of the fire development is its step-by-step nature, whereby one phase (stage) is naturally replaced by another as a result of physical combustion processes and decisions made amid certain states of fire. In the practice of modeling multiphase (multistage) processes, such models as decision trees, multistep positional games, random processes, including discrete Markov chains, and others are widely used. Each of these models has its own structure and parameters. The choice of the model structure for a particular application represents a heuristic step. In almost every case, parameters of models are set on the basis of logical inferences, physics, ongoing processes and available statistical data about the simulated phenomenon. This approach is usually referred to as normative. Its alternative is an adaptive approach, whereby model parameters are evaluated using historical data. This approach allows to make models that are sufficiently similar to real objects and capable of adapting to the nonstationary features of the environment and the changeability of the decision maker's preferences.

The relevance of the study lies in the development of a machine learning technology for the Markov models of the fire development process, which allow predicting the completion time of individual phases and the whole fire. The Markov model can also serve as the basis for determining the optimal fire rank.

Goals and objectives. The aim of the work is to create and test the technology for designing models that allow to make projections of the fire completion time. The tasks of the model machine learning and its use as a tool for making projections and determining the rank of fire are set in line with this goal.

Methods. The authors used methods of the theory of random processes, mathematical statistics, simulation modeling, technical and economic evaluations. The research is based on materials extracted from domestic and foreign publications.

Results and discussion. The proposed method, designated for the machine learning of the Markov chains using statistical data on the response time of firefighting and rescue units, coupled with the use of trained models, technical and economic evaluations for assigning optimal fire ranks allow to apply algorithms built on their basis as part of fire safety decision support systems.

Conclusions. The presented solutions to the problem of designing adequate models designated for projecting fire development phases and assigning fire ranks serve as the basis for effective decision support systems in terms of the short-term fire safety management.

Keywords: response time; payment function; Bayesian estimates; recurrent evaluation procedure; simulation

For citation: Topolskiy N.G., Vilisov V.Ya., Khabibulin R.Sh., Pranov B.M., Demekhin F.V. Application of Markov chains to rank fires and forecast fire development phases. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):39-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.39-51 (rus).

✉ Valeriy Yakovlevich Vilisov, e-mail: vvib@yandex.ru

Введение

Моделирование процессов развития и ликвидации пожаров требует учета, как правило, большого количества случайных факторов и разнообразных данных о среде пожара и доступных ресурсах для его ликвидации [1–3]. Важной особенностью развития пожаров является их пошаговый характер, где одна фаза (стадия) закономерно сменяется другой в результате как протекания физических процессов горения, так и решений, принятых в тех или иных состояниях пожара.

В практике моделирования многофазных (много-стадийных) процессов широко используются такие их модели, как деревья решений, многошаговые позиционные игры, случайные процессы, в числе которых значимое место занимают дискретные цепи Маркова, и др. [4, 5]. Все эти модели имеют каждая свою структуру (как взаимосвязь основных ее составляющих элементов) и параметры. Выбор структуры модели для той или иной прикладной задачи, как правило, является эвристическим шагом (за исключением применения методов дискриминации моделей по их структуре). Параметры же моделей практически всег-

да задаются, исходя из логических умозаключений, физики протекающих процессов и имеющихся статистических данных о моделируемом явлении, что полностью соответствует исходной (архаичной) методологии исследования операций, сложившейся более 80 лет назад. Такой подход к построению моделей обычно называют нормативным. Его альтернативой (или развитием) является адаптивный подход [5–7], при котором параметры моделей оцениваются по ретроспективным данным о решениях, принятых и реализованных опытными лицами, принимающими решения (ЛПР). Такой подход позволяет построить достаточно адекватные реальным объектам модели, способные адаптироваться (в новых циклах обучения) к нестационарностям среды и изменчивости предпочтений ЛПР.

Методы машинного обучения [5, 8–11] как один из инструментов искусственного интеллекта дают возможность снять априорную и текущую параметрическую и/или структурную неопределенность моделей, тем самым обеспечив необходимую степень их адекватности. Важной особенностью разработанных алгоритмов машинного обучения является то, что обучающая выборка содержит позитивный опыт принятия решений ЛПР в соответствующем секторе предметной области. Обученные модели могут быть использованы в диалоговом режиме в составе систем поддержки принятия решений (СППР, *Decision Support System — DSS*) систем пожарной безопасности [12–18].

В статье проиллюстрирована разработанная авторами [6] технология машинного обучения моделей, в том числе оптимизационных, применительно к цепям Маркова (далее: марковские цепи — МЦ, управляемые МЦ — УМЦ), в контексте стадий (фаз) развития и ликвидации пожара. Обучение МЦ выполняется в соответствии с рекуррентным алгоритмом, обрабатывающим поступающие наборы размеченных данных. Выборка данных включает в себя показатели времени реагирования пожарно-спасательных подразделений (ПСП). Обученная МЦ позволяет строить прогнозы времени завершения той или иной фазы или пожара в целом. Кроме того, обученная МЦ позволяет и делать оценки оптимального ранга пожара на основе учета экономических показателей пожаротушения.

Алгоритм обучения цепи Маркова

Согласно приказу МЧС России № 727 от 26 декабря 2014 г. «О совершенствовании деятельности по формированию электронных баз данных учета пожаров (загораний) и их последствий», при регистрации данных о пожарах регистрируются, в числе других, временные характеристики ключевых событий, отражающих стадии (фазы) развития и тушения

пожаров, из которых шесть исходных и несколько укрупненных. Далее рассматриваются (без потери общности подхода) три укрупненные стадии:

- *свободное горение* продолжительностью $\tau_{св.г}$ — стадия, продолжительность которой равна интервалу времени с момента обнаружения пожара до момента подачи первого ствола;
- *тушение*, продолжительностью $\tau_{туш}$ — стадия, продолжительность которой равна интервалу времени с момента подачи первого ствола до момента ликвидации открытого горения;
- *ликвидация последствий пожара* $\tau_{л.пос}$ — стадия, продолжительность которой равна интервалу времени с момента ликвидации открытого горения до момента ликвидации последствий пожара.

Каждой из этих стадий пожара *поставлено в соответствие одно из состояний марковской цепи*. Кроме того, для учета в модели факта, что пожар ликвидирован, добавлено состояние «Нет пожара». МЦ устроены так, что процесс наблюдается и может переходить из одного состояния в другое в дискретные моменты времени. Затем покажем, как, имея в качестве исходных статистических данных, характеристики времени реагирования ПСП, можно оценить все элементы МЦ, отражающей динамику развития пожара [5]. Далее в качестве статистических данных были использованы сведения о пожарах в городах России [19, 20].

Формализованное представление МЦ заключается в том, что ее состояния ($s_i, i = \overline{1, m}$) изменяются в дискретные моменты времени ($t = 0, 1, 2, \dots, N$) в соответствии с вероятностями перехода ($p_{ij}, i, j = \overline{1, m}$) за один шаг из текущего (i -го) состояния в последующее (j -е). Марковская цепь считается заданной, если известны: матрица вероятностей перехода (переходная матрица) за один шаг ($P = \|p_{ij}\|_{mm}, i$ — строка, j — столбец), а также вектор вероятностей того, что в начальный момент времени процесс пребывает в том или ином состоянии $\bar{p}(0) = \|p_i\|_m$ [4]. МЦ представим [6] и в виде ориентированного взвешенного графа (рис. 1).

Задача вычисления вектора предельных вероятностей $\bar{p}(N)$, при $N \rightarrow \infty$, заданном векторе вероятностей начальных состояний $\bar{p}(0)$ и заданной переходной матрице P , является **прямой задачей анализа МЦ**:

$$\bar{p}(N) = (P^N)^T \bar{p}(0). \quad (1)$$

Для конечного числа шагов N по этой формуле можно с заданной доверительной вероятностью построить прогноз — в каком состоянии будет находиться МЦ на N -м шаге при условии, что в начальный момент времени известны значения вектора начальных вероятностей. Данное прогностическое

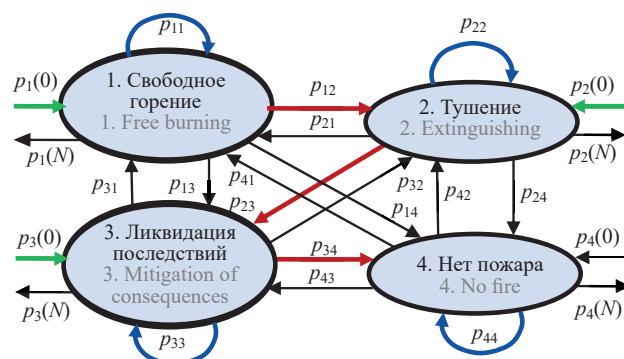


Рис. 1. Графическое представление МЦ, отражающей состояния пожара

Fig. 1. Graphic representation of the Markov chain conveying the state of fire

применение МЦ может быть полезным для обоснования решений, например, принимаемых руководителем тушения пожара (РТП).

Однако для практического применения такой модели развития пожара возникает потребность в адекватных значениях элементов переходной матрицы P , что отражает априорную неопределенность задачи прогнозирования [5]. Знание вектора вероятностей начальных состояний $\bar{p}(0)$ также необходимо, но это обстоятельство не является критическим, так как МЦ обладают свойством слабой зависимости вектора вероятностей предельных состояний $\bar{p}(N)$ от $\bar{p}(0)$ при больших N .

Обратная задача (как обучение МЦ). Воспользоваться технологией рекуррентного оценивания [5, 21] можно, если дополнительно к N наблюдениям (по которым уже имеются оценки $\hat{p}_k$, вектора $\bar{p}$, составленного из столбцов матрицы P , и матрица Q_k — дисперсионная матрица вектора оценок) получено $(N+1)$ -е наблюдение. Следует заметить, что обработка по рекуррентной схеме выполняется не сразу для всех m новых элементов вектора вероятностей состояний, а по каждому $(k$ -му) из них. С учетом этих обстоятельств и, обозначив искомый вектор $\bar{p}$ как вектор оценок $\hat{p}_k$, полученный по последнему элементу N -й выборки, рекуррентные уравнения могут быть представлены в следующем виде [5]:

$$\hat{p}_{k+1} = \hat{p}_k + Q_k \bar{x}_{k+1} (\bar{x}_{k+1}^T Q_k \bar{x}_{k+1} + 1)^{-1} (y_{k+1} - \bar{x}_{k+1}^T \hat{p}_k), \quad (2)$$

$$Q_{k+1} = Q_k - Q_k \bar{x}_{k+1} (\bar{x}_{k+1}^T Q_k \bar{x}_{k+1} + 1)^{-1} \bar{x}_{k+1}^T Q_k, \quad (3)$$

где y_{k+1} — дополнительный $(N+1)$ -й элемент в векторе состояний МЦ $\bar{y}_i(N)$;

$\bar{x}_{k+1} = [x_1(N) \ x_2(N) \ \dots \ x_m(N) \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ — дополнительная N -я строка в векторно-матричном уравнении измерений, количество нулевых элементов в векторе — $(m-1) \times m$;

T — символ транспонирования. На следующей итерации (все той же $(N+1)$ -й выборки наблюдений) необходимо пересчитать оценки

по формулам (2), (3) для очередного состояния аналогично предыдущему, с той разницей, что y_{k+1} — дополнительный $(N+1)$ -й элемент в векторе $\bar{y}_i(N)$ и т.д.

Пример обучения МЦ иллюстрирует разработанную технологию применения марковских цепей для прогнозирования фаз развития и ликвидации пожара. Для этого были использованы официальные статистические данные о временных характеристиках реагирования ПСП в городах субъектов РФ [20]. Соответствующие гистограммы приведены на рис. 2.

Приведенная гистограмма аппроксимирована гамма-распределением. Параметры плотности данного распределения представлены в табл. 1 [6].

На основе приведенной выше аппроксимации функцией плотности гамма-распределения были построены соответствующие интегральные функ-

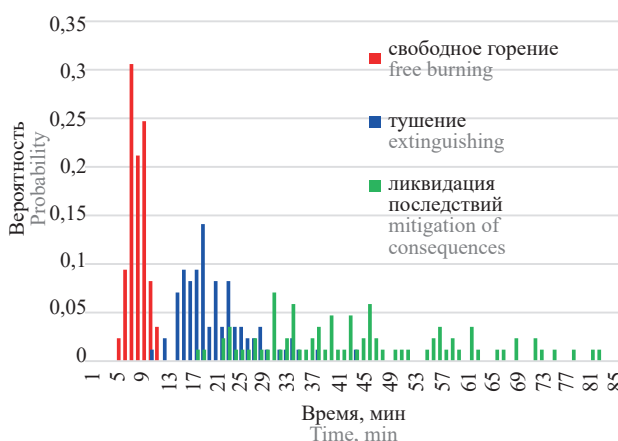


Рис. 2. Гистограммы моментов времени окончания фаз развития пожара

Fig. 2. Histograms demonstrating moments of the fire development phase completion

Таблица 1. Основные параметры плотностей гамма-распределений (пожары в городах РФ в 2016 г.)

Table 1. Principal parameters of gamma distribution densities (fires in the RF cities in 2016)

Выборочные моменты и параметры плотностей гамма-распределения Selective moments and parameters of distribution densities	$t_{св.г}$ $t_{f.b}$	$t_{туш}$ t_{ext}	$t_{л.пос}$ $t_{m.c}$
Выборочное среднее, мин Selective average value, min	8,42	20,51	43,25
Выборочная дисперсия, мин ² Selective dispersion, min ²	1,73	32,86	243,59
Среднеквадратическое отклонение, мин Mean square deviation, min	1,31	5,73	15,61
Параметр формы, α Form parameter, α	41,03	12,80	7,68
Параметр масштаба, β Scale parameter, β	0,21	1,60	5,63

ции распределения $P_{св.г.}(N)$, $P_{туш.}(N)$, $P_{л.пос.}(N)$. Это позволило вычислить вероятности пребывания процесса в каждом из четырех состояний МЦ в некоторый произвольный (текущий) момент времени t (N — его дискретный аналог).

Составляющие вектора состояния $\bar{p}(N)$ МЦ вычисляются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} p_1(N) &= P(t < t_{св.г.}) = 1 - P_{св.г.}(N) \\ p_2(N) &= P(t_{св.г.} < t < t_{туш.}) = P_{св.г.}(N)(1 - P_{туш.}(N)) \\ p_3(N) &= P(t_{туш.} < t < t_{л.пос.}) = P_{туш.}(N)(1 - P_{л.пос.}(N)) \\ p_4(N) &= P(t > t_{л.пос.}) = P_{л.пос.}(N) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Вычисленные таким образом значения вероятностей пребывания МЦ в том или ином из четырех состояний представлены на рис. 3, а. Они и служат исходными статистическими данными для представленной выше рекуррентной процедуры (2), (3) оценивания элементов переходной матрицы P .

Следует отметить, что гамма-распределение — это непрерывная функция, а МЦ — случайный процесс с дискретным временем. Это обстоятельство позволяет использовать исходную информацию в виде гамма-распределения для построения МЦ с любым шагом дискретизации, необходимым для той или иной задачи моделирования, управления или принятия решений при ликвидации пожара. В данной работе вычисления выполнены для МЦ, имеющих шаг переключения состояний продолжительностью 1, 3, 5, 10 мин. Выбор величины шага зависит от того, через какое время важно знать текущее состояние для того, чтобы на основании этого можно было строить прогноз развития пожара и/или принимать управленческие решения. Вообще говоря, шаг процесса может быть и переменным, определяемым текущей необходимостью, но этот вариант алгоритма в данной работе не рассматривается. Соответствующий конкретный вид матриц

вероятностей перехода МЦ за один шаг следующий (индекс отражает продолжительность шага МЦ в минутах):

$$\begin{aligned} P_1 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,921 & 0,079 & 0 \\ 0 & 0 & 0,959 & 0,041 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_3 &= \begin{bmatrix} 0,696 & 0,304 & 0 & 0 \\ 0 & 0,767 & 0,233 & 0 \\ 0 & 0 & 0,875 & 0,125 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_5 &= \begin{bmatrix} 0,539 & 0,461 & 0 & 0 \\ 0 & 0,624 & 0,376 & 0 \\ 0 & 0 & 0,789 & 0,211 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_{10} &= \begin{bmatrix} 0,141 & 0,859 & 0 & 0 \\ 0 & 0,331 & 0,669 & 0 \\ 0 & 0 & 0,576 & 0,424 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Следует отметить, что меньшим значениям шага МЦ соответствует большая инерционность процесса, что проявляется в больших (близких к единице) значениях диагональных элементов матрицы перехода, т.е. для таких процессов велика вероятность, что на следующем шаге он останется в том же состоянии и не перейдет в какое-то другое.

На рис. 3, б показана пошаговая динамика изменения вероятностей пребывания МЦ в том или ином состоянии для продолжительности шага в одну минуту (матрица P_1 в (5)) и для вектора вероятностей начальных состояний $\bar{p}(0) = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$, т.е. имеет место тот случай, когда достоверно (с вероятностью единица) известно, что процесс развития пожара

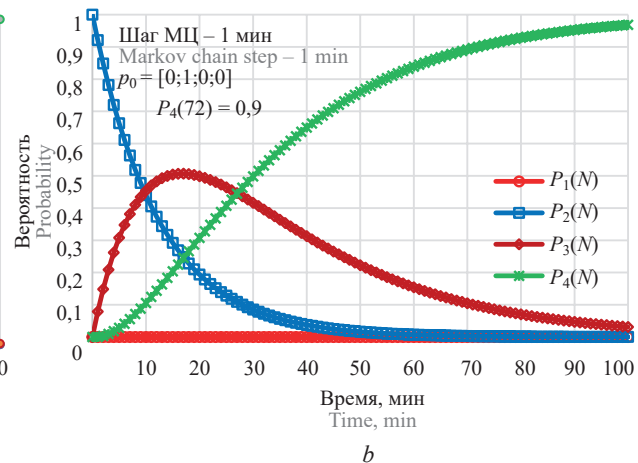
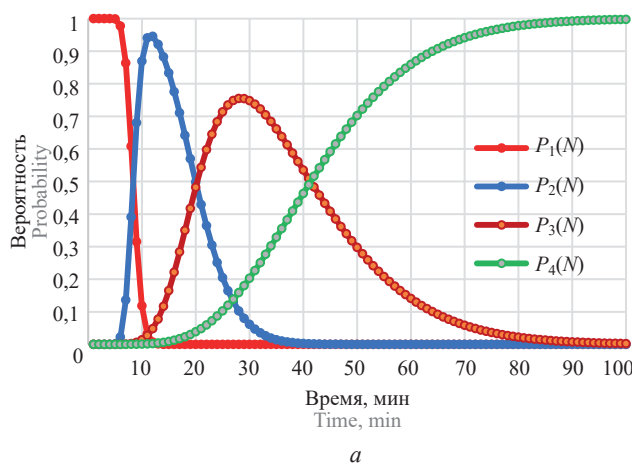


Рис. 3. Вероятности состояний марковской цепи (фаз пожара)

Fig. 3. Probabilities of the Markov chain conditions (fire phases)

находится на фазе тушения, а фаза свободного горения завершена. Тогда по построенным графикам можно заключить, что, например, с доверительной вероятностью 0,9 можно утверждать, что пожар завершится через 72 мин (относительно текущего времени), т.е. перейдет в состояние «Нет пожара» на 72-м шаге.

Построенные на основе статистических данных (см. рис. 2) матрицы переходных вероятностей МЦ могут быть использованы для построения прогноза по формуле (1) для произвольного текущего момента развития процесса пожаротушения. Подобные построения могут быть выполнены как для отдельной ПСП, так и для любой их совокупности (район города, гарнизон, субъект РФ и др.), а также для отдельных групп и типов пожаров, отражая более тонкие различия и особенности тушения пожаров.

Выбор ранга пожара по МЦ и технико-экономическим показателям

Поскольку время продолжительности ликвидации пожара не является конечным и единственным показателем его эффективности, на основе модели МЦ могут быть построены и другие процедуры поддержки выбора решений, в частности, обоснование выбора ранга пожара. Ранг пожара — это один из факторов, влияющих на продолжительность процесса ликвидации пожара, которая, в свою очередь, определяет величину ущерба, нанесенного пожаром.

Рис. 3, б иллюстрирует вероятности состояний МЦ в произвольные дискретные моменты времени для тех или иных значений вектора вероятностей начальных состояний. Поскольку на момент выполнения данных исследований статистические данные о пожарах, дифференцированные по рангам, были недоступны, далее рассмотрены гипотетические данные, близкие к средним данным реагирования по регионам. В частности, синтезированы характеристики матриц вероятностей перехода, моделирующие различные ранги тушения пожаров, которые, по логике применения повышенных рангов, должны улучшать характеристики ликвидации пожара, в том числе сокращая время наступления состояния «Нет пожара», т.е. завершения процесса ликвидации пожара.

В предположении, что по соответствующим статистическим данным и приведенному выше алгоритму машинного обучения МЦ могут быть построены матрицы вероятностей перехода МЦ, были приняты следующие матрицы вероятностей перехода $P_r(N)$, соответствующие рангам $r = 1, 1 \text{ бис}, 2, 3, 4$:

$$\begin{aligned} P_1 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,921 & 0,079 & 0 \\ 0 & 0 & 0,959 & 0,041 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_{1 \text{ бис}} &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,901 & 0,099 & 0 \\ 0 & 0 & 0,949 & 0,051 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_2 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,881 & 0,119 & 0 \\ 0 & 0 & 0,938 & 0,062 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_3 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,862 & 0,138 & 0 \\ 0 & 0 & 0,928 & 0,072 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_4 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,842 & 0,158 & 0 \\ 0 & 0 & 0,917 & 0,083 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

По данным матрицам перехода были построены вероятности состояния «Нет пожара» $p_{4,r}(N)$, аналогичные $p_4(N)$ на рис. 3, б, по которым построены дискретные аналоги плотности вероятностей $f_{4,r}(N)$:

$$f_{4,r}(N) = \frac{p_{4,r}(N) - p_{4,r}(N-1)}{\Delta t}, \quad (7)$$

где Δt — величина шага МЦ (для матриц (6) $\Delta t = 1$ мин); для $f_{4,r}(N)$ должно выполняться условие нормировки:

$$\sum_{N=0}^T f_{4,r}(N) = 1, \quad (8)$$

где здесь T — интервал наблюдения (в модельных расчетах $T = 100$ мин).

Вычисленные значения $f_{4,r}(N)$ представляют собой вероятности того, что МЦ будет в состоянии «Нет пожара» в интервале времени от $(N-1)$ до N . Их графики приведены на рис. 4, где одновременно отображены функции потерь для трех видов ущерба как функции времени. Здесь виды ущерба — количество погибших R_2 и травмированных Q_2 людей в 100 пожарах, а также величина прямого материального ущерба u_d от одного пожара (с учетом дефлятора к 2018 г.).

Для выполнения дальнейшего оценивания необходимо выявить зависимость видов ущерба (u_d, R_2, Q_2) от продолжительности пожара. Приведем результаты такого анализа.

Статистические данные из официальных источников [20] и результаты регрессионного анализа приведены в табл. 2.

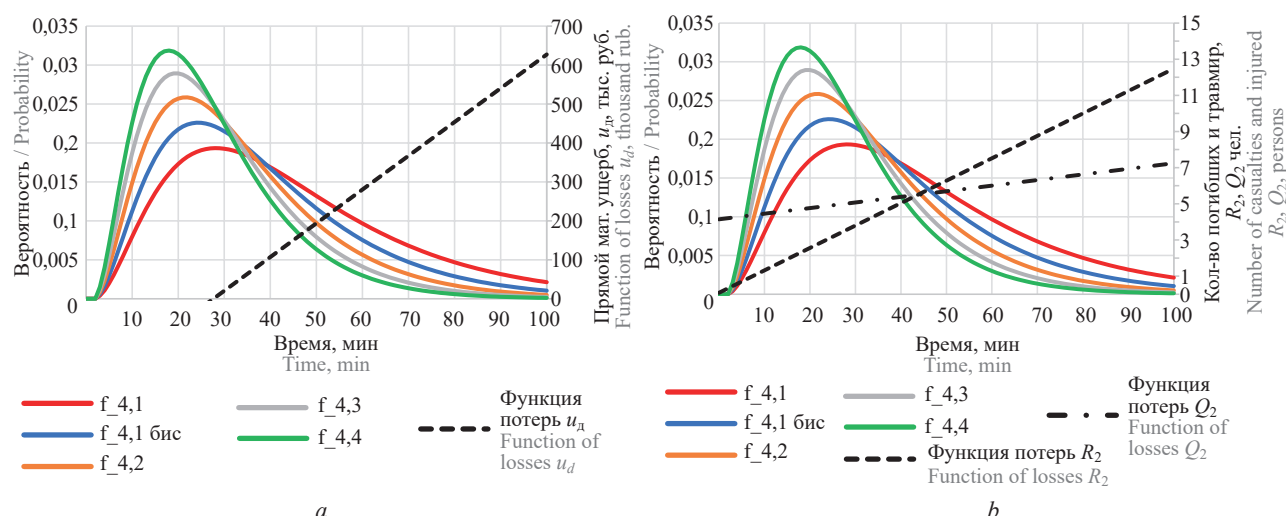


Рис. 4. Плотности вероятностей состояния «нет пожара» и функции потерь для трех видов ущерба (u_d , R_2 , Q_2)

Fig. 4. Densities of probabilities of the “no fire” state and functions of losses for three types of damages (u_d , R_2 , Q_2)

Таблица 2. Статистические данные продолжительности пожаров, видов ущерба в городах РФ и соответствующие параметры уравнений регрессии

Table 2. Statistical data on duration of fires, types of damage to the RF cities and respective parameters of regression equations

Год Year	Продолжительность ликвидации пожара ΔT , мин Fire extinguishing time ΔT , min	Ущерб Damage		
		u_d , тыс. руб. на 1 пожар u_d , thousand rubles per fire	R_2 , чел. на 100 пожаров R_2 , persons per 100 fires	Q_2 , чел. на 100 пожаров Q_2 , persons per 100 fires
2011	50,480	202,066	5,912	8,248
2012	48,350	168,618	5,853	8,423
2013	44,680	141,212	5,597	8,136
2014	46,280	189,002	5,540	8,343
2015	43,630	198,342	5,245	8,196
2016	43,910	91,983	5,232	8,140
2017	44,750	124,281	4,836	8,058
Параметры уравнений парной регрессии Parameters of dual regression equations		c_0	-239,358	0,078
		c_1	8,666	0,117
		R^2	0,281	0,612

Уравнение парной регрессии эффекта (k -го вида ущерба L_k) от времени окончания процесса ликвидации пожара имеет вид:

$$L_k(\Delta T) = c_0 + c_1 \Delta T. \quad (9)$$

Здесь коэффициент детерминации R^2 имеет наибольшее значение для количества погибших, что обусловлено, на наш взгляд, высокой степенью достоверности измерения данного показателя. Данный показатель для других видов ущерба невелик, что, однако, не исключает возможности использования построенных моделей для прогнозирования.

Построенные уравнения регрессии (9) играют роль функции потерь в задачах байесовского оцени-

вания [22]. Эти функции приведены на рис. 4. Байесовские (средние) потери для каждого из рангов r по множеству моментов окончания процесса ликвидации пожара определяются следующим образом:

$$v_{r,k} = \sum_{N=0}^T f_{4,r}(N) L_k(N). \quad (10)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5 и в табл. 3.

Поскольку в соответствии с законодательством РФ все три вида ущерба возмещаются государством, причем, как показал анализ прецедентов, в среднем за одного погибшего выплачивается возмещение w_k в 1 млн руб., а за одного травмированного —

Таблица 3. Величина возмещаемого ущерба и издержки выезда для рангов пожара

Table 3. Amount of reimbursable damage and costs of response to different ranks of fire

Ущерб Damage	Коэффициент возме- щения w_k , тыс. руб./ед. Reimbursement coefficient w_k , thousand rubles/item	Ранг пожара Fire rank				
		1	1 бис 1 bis	2	3	4
u_d , тыс. руб. на 1 пожар u_d , thousand rubles per fire	1	145,893	109,572	82,260	62,446	48,157
R_2 , чел. на 100 пожаров R_2 , persons per 100 fires	1000	4,966	4,372	3,896	3,524	3,232
Q_2 , чел. на 100 пожаров Q_2 , persons per 100 fires	100	5,460	5,301	5,173	5,072	4,994
Возмещение всего v_r , тыс. руб. на 1 пожар Total reimbursement v_r , thousand rubles per fire		201,016	158,594	126,395	102,759	85,467
Издержки s_r , тыс. руб. на 1 пожар Costs s_r , thousand rubles per fire		6,540	19,337	73,283	105,276	127,883
Сумма, тыс. руб. на 1 пожар Total, thousand rubles per fire		207,556	177,931	199,678	208,034	213,350

100 тыс. руб., то общий ущерб v_r в стоимостном выражении для различных рангов (приведенный в строке «Возмещение всего», см. табл. 3) вычисляется следующим образом:

$$v_r = \sum_{k=1}^3 v_{r,k} w_k. \quad (11)$$

Для текущей корректной оценки переменных издержек (зависящих от количества выездов пожарной техники) необходимо вести мониторинг актуальных цен на расходные материалы. На основании реальных статистических данных выездов нарядов одной из пожарных частей [5] выполнены оценки стоимости расходных материалов (горючее, вода, пена) как переменных затрат. По состоянию на момент исследования (2016–2017 гг.) средние значения (из расчета на один пожар) этих величин были

следующими: горючее — 1564,23 руб.; пена — 1591,32 руб.; вода — 70,8 руб. Однако, учитывая инфляцию и неполноту измерений, эти значения следует учитывать с повышающим коэффициентом (его значение принято 2).

Далее следует вычислить издержки, связанные с выездом пожарной техники по тому или иному рангу. Для обеспечения необходимой степени оперативности реагирования в практике организации работ принято формировать расписание выездов, отражающих количество автотехники, выделяемой по тому или иному рангу пожара. Так, в соответствии с приказом «О введении в действие Расписания выездов подразделений гарнизона пожарной охраны города Москвы для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ» от 18 сентября 2017 г. № 559 по Москве, количественное обеспечение рангов пожаров приведено в табл. 4.

По грубым оценкам, принимая во внимание, что каждый автомобиль потребляет равное количество горючего на каждый выезд (в реальной практике, конечно, эти данные могут быть корректно вычислены по текущей учетной документации), и с учетом принятого повышающего коэффициента были вычислены переменные издержки s_r (на горючее, пену и воду) по рангам выезда (строка «Издержки», см. табл. 3).

Издержки, связанные с выездом по тому или иному рангу, и возмещение от ущерба, нанесенного пожаром, выплачиваются «из одного кармана» — государством.

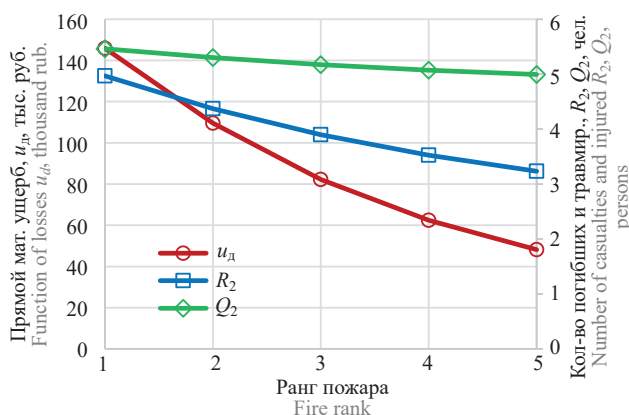


Рис. 5. Зависимости среднего ущерба от ранга пожара

Fig. 5. Dependences between the average damage and the fire

Таблица 4. Количество пожарной техники, участвующей в ликвидации пожаров по Москве, в зависимости от ранга пожара
Table 4. Number of items of fire extinguishing equipment, involved in the fire extinguishing in Moscow depending on the fire rank

Сокращения Abbreviations	Наименование Type of equipment	Ранг пожара Fire rank					
		1	1 бис 1 bis	2	3	4	5
АБГ PGRSV	Автомобиль базы газодымозащитной службы Principal gas rescue service vehicle			1	1	1	1
АЛ FML	Автолестница Fire motor ladder		1	2	3	3	3
АН PE	Автонасос Pumping engine			2	4	6	8
АПМ MFV	Автомобиль пожарный многоцелевой Multipurpose firefighting vehicle			1	1	1	1
АС CLT	Автомобиль связи и освещения Communication and light track			1	1	1	1
АТ RV	Автомобиль тыла Rear vehicle				1	1	1
АЦ TV	Автоцистерна Tank vehicle	2	4	9	14	19	24
ВП FFT	Пожарный автомобиль пенного тушения Foam fire truck			1	1	1	1
ДЗ GRSV	Автомобиль газодымозащитной службы Gas rescue service vehicle		1	2	3	3	3
МС	Автомобиль медицинской службы Medical service vehicle			1	1	1	1
СА	Аварийно-спасательный автомобиль Emergency rescue vehicle			2	2	2	2
Всего Total		2	6	22	32	39	46

С ростом ранга пожара издержки растут, а ущерб снижается. Значит, можно предположить, что существует некоторый компромиссный ранг пожара, при котором сумма издержек и возмещаемого ущерба будет минимальной. Последняя строка в табл. 3 и отражает эту общую сумму. Результаты показывают (рис. 6), что для рассмотренных исходных данных оптимальным является ранг пожара «1 бис» (соответствует цифре «2» на оси «Ранг пожара»).

Графическая иллюстрация отражает полученные результаты выбора оптимального ранга по критерию минимизации суммарных затрат. Хотя, конечно, данное решение является дискуссионным, так как погибших и пострадавших невозможно измерить лишь стоимостью возмещаемого ущерба.

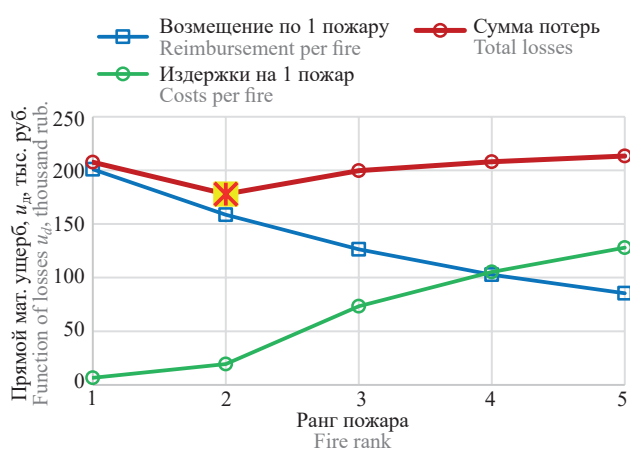


Рис. 6. Зависимости издержек и возмещения ущерба от ранга пожара

Fig. 6. Dependences between costs and damage reimbursement on the fire rank

Выводы

Разработанная машинообучаемая форма марковской цепи, отражающая процесс возникновения и тушения пожара, может использоваться при любом необходимом для целей управления количестве стадий развития пожара. В составе систем поддержки принятия решений подобные модели могут использоваться, в частности, руководителями тушения пожара для оценивания прогнозных значений времени завершения как отдельных стадий, так и пожара в целом. Такая возможность обеспечит более высокую надежность и обоснованность решений, принимаемых при распределении сил и средств на пожаре.

В качестве статистических данных, необходимых для обучения модели, следует использовать те, которые соответствуют управляемому уровню пожарно-спасательного подразделения (отдельная конкретная ПСЧ, локальная группа ПСЧ, гарнизон, субъект

РФ и т.п.). В этих случаях построенная марковская модель будет наиболее адекватно представлять именно данный уровень, для которого построенные по модели прогнозы будут максимально точными. Такая персонализация позволяет еще более детализировать модели, например, для различных типов объектов пожара.

Приведенный алгоритм выбора оптимального ранга пожара на основе использования машинообученной марковской цепи базируется на привлечении дополнительных технико-экономических оценок процесса обеспечения пожарной безопасности, что требует создания дополнительной системы мониторинга таких показателей. Хотя, следует отметить, что данное решение является дискуссионным, так как погибших и пострадавших невозможно измерить лишь стоимостью возмещаемого ущерба, а значит, предложенный алгоритм, по-видимому, следует дополнить и иными критериями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брушлинский Н.Н., Кленко Е.А., Попков С.Ю., Соколов С.В. Управление пожарной безопасностью субъектов Российской Федерации на основе анализа пожарных рисков // Проблемы пожарной безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2010. № 3. С. 104–114.
2. Собянин С.С. Московское правительство о пожарной безопасности в столице в 2018–2019 гг. // Каталог «Пожарная безопасность». 2019. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/moskovskoe-pravitelstvo-o-pozharnoy-bezopasnosti-v-stolitse-v> (дата обращения: 14.12.2021).
3. Пожарные риски: динамика, управление, прогнозирование / под ред. Н.Н. Брушлинского, Ю.Н. Шебеко. М. : ВНИИПО, 2007. 370 с.
4. Taha H.A. Operations research: An introduction. 10th Global ed. Harlow (England): Pearson Education Limited, 2017. 848 p.
5. Топольский Н.Г., Вилисов В.Я. Методы, модели и алгоритмы в системах безопасности: машинное обучение, робототехника, страхование, риски, контроль. М. : РИОР, 2021. 475 с.
6. Вилисов В.Я. Применение марковских цепей для моделирования и прогнозирования развития пожара // Инженерный вестник Дона. 2021. № 3. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6881> (дата обращения 14.12.2021).
7. Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я. Информационно-аналитические модели поддержки управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций. М. : АГПС МЧС России, 2021. 216 с.
8. Lee H.-R., Lee T. Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 291. Issue 1. Pp. 296–308. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.018.
9. Бедило М.В., Бутузов С.Ю., Прус Ю.В., Рыженко А.А., Чурсин Р.Г. Модель адаптивного управления оперативными службами РСЧС в чрезвычайных ситуациях межрегионального и федерального уровня // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 1 (71).
10. Hamke E.E., Jordan R., Ramon-Martinez M. Breath activity detection algorithm. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.07767> (дата обращения: 14.12.2021).
11. Zhang X., Mahadevan S. Bayesian neural networks for flight trajectory prediction and safety assessment // Decision Support Systems. 2020. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113246 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300014> (дата обращения: 14.12.2021).
12. Овсяник А.И., Копнышев С.Л., Бурков В.Н., Щепкин А.В. О методике исследования достаточности мероприятий по обеспечению безопасности функционирования региона страны // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 2 (72). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/39-02-17.ttb.pdf> (дата обращения: 14.12.2021).

13. Ларичев О.И., Мошковиц Е.М. О возможностях получения от человека непротиворечивых оценок многомерных альтернатив // Дескриптивный подход к изучению процессов принятия решений при многих критериях : сб. тр. М. : ВНИИСИ, 1980. Вып. 9. С. 3–26.
14. Петровский А.Б. Теория принятия решений. М. : Академия, 2009. 400 с.
15. Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time // Decision Support Systems. 2020. Vol. 133. P. 113260. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113260
16. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities // Decision Support Systems. 2019. Vol. 127. P. 113145. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113145
17. Trekin A., Novikov G., Potapov G. etc. Satellite imagery analysis for operational damage assessment in Emergency situations // Cornell University Library, NY, USA URL: arxiv.org/pdf/1803.00397.pdf (дата обращения: 14.12.2021).
18. Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time // Decision Support Systems. 2020. Vol. 133. P. 113260. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154) (дата обращения: 14.12.2021).
19. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities // Decision Support Systems. 2019. Vol. 127. P. 113145. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745) (дата обращения: 14.12.2021).
20. Пожары и пожарная безопасность в 2016 г. // Статистический сборник. М. : ФГУ ВНИИПО, 2017. 124 с.
21. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. М. : Мир, 1980. 456 с.
22. Де Гроот М.М. Оптимальные статистические решения. М. : Мир, 1974. 492 с.
23. Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E. Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1605.02561> (дата обращения: 14.12.2021).

REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Klepko Ye.A., Popkov S.Yu., Sokolov S.V. Fire safety management of subjects of the russian federation on the basis of fire hazard analysis. *Problemy pozharnoy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy/Fire safety and emergency problems*. 2010; 3:104-114. (rus).
2. Sobyenin S.S. Moscow government on fire safety in the capital in 2018-2019. *Katalog "Pozharnaya bezopasnost"/Fire safety catalog*. 2019. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/moskovskoe-pravitelstvo-o-pozharnoy-bezopasnosti-v-stolitse-v> (Accessed: December 14, 2021). (rus).
3. *Fire risks: dynamics, management, forecasting*. N.N. Brushlinsky, Yu.N. Shebeko (ed.). Moscow, VNIPO, 2007; 370. (rus).
4. Taha H.A. *Operations research: An introduction*. 10th Global ed. Harlow (England), Pearson Education Limited, 2017; 848.
5. Topol'skij N.G., Vilisov V.Ya. *Methods, models and algorithms in security systems: machine learning, robotics, insurance, risks, control*. Moscow, RIOR Publ., 2021; 475. (rus).
6. Vilisov V.Ya. Application of Markov chains for modeling and forecasting the development of a fire. *Engineering journal of Don*. 2021; 3. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6881> (Accessed: December 14, 2021). (rus).
7. Topol'skij N.G., Butuzov S.Yu., Vilisov V.Ya. *Information and analytical models of management support in the elimination of fires and emergencies*. Moscow, State Fire Service Academy EMERCOM of Russia, 2021; 216. (rus).
8. Lee H.-R., Lee T. Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response. *European Journal of Operational Research*. 2021; 291(1):296-308. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.018
9. Bedilo M.V., Butuzov S.Yu., Prus Yu.V., Ryzhenko A.A., Chursin R.G. Model of adaptive management of emergency services of the RSChS in emergency situations at the interregional and federal levels. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti/Technology of Technosphere Safety*. 2017; 1(71). (rus).
10. Hamke E.E., Jordan R., Ramon-Martinez M. *Breath activity detection algorithm*. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.07767> (Accessed: December 14, 2021).

11. Zhang X., Mahadevan S. Mahadevan Bayesian neural networks for flight trajectory prediction and safety assessment. *Decision Support Systems*. 2020; 131. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113246 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300014> (Accessed: December 14, 2021).
12. Ovsyanik A.I., Kopnyshev S.L., Burkov V.N., Shchepkin A.V. The research methodology of sufficiency measures to ensure the safety functioning of the region. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti/Technology of Technosphere Safety*. 2017; 2(72). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/39-02-17.ttb.pdf> (Accessed: December 14, 2021). (rus).
13. Larichev O.I., Moshkovich Ye.M. On the possibilities of obtaining from a person consistent estimates of multidimensional alternatives. *Deskriptivnyy podkhod k izucheniyu protsessov prinyatiya resheniy pri mnogikh kriteriyakh/Descriptive approach to the study of decision-making processes under many criteria*. Moscow, VNIISI, 1980; 9:3-26. (rus).
14. Petrovskiy A.B. *Decision theory*. Moscow, Akademiya Publ., 2009; 400. (rus).
15. Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time. *Decision Support Systems*. 2020; 133:113260. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113260
16. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities. *Decision Support Systems*. 2019; 127:113145. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113145
17. Trekin A., Novikov G., Potapov G. etc. Satellite imagery analysis for operational damage assessment in Emergency situations. *Cornell University Library*. NY. USA. URL: arxiv.org/pdf/1803.00397.pdf (Accessed: December 14, 2021).
18. Fertier A. Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time. *Decision Support Systems*. 2020; 133:113260. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154) (Accessed: December 14, 2021).
19. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities. *Decision Support Systems*. 2019; 127:113145. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745) (Accessed: December 14, 2021).
20. *Fires and fire safety in 2016. Statistical collection*. Moscow, FGU VNIPO, 2017; 124. (rus).
21. *Linear Regression Analysis*. Moscow, Mir Publ., 1980; 456. (rus).
22. De Groot M. *Optimal statistical solutions*. Moscow, Mir Publ., 1974; 492. (rus).
23. Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E. *Vazquez Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety*. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1605.02561> (Accessed: December 14, 2021).

Поступила 08.11.2021, после доработки 19.11.2021;

принята к публикации 01.12.2021

Received November 8, 2021; Received in revised form November 19, 2021;

Accepted December 1, 2021

Информация об авторах

ТОПОЛЬСКИЙ Николай Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; профессор кафедры информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 114882; ORCID: 0000-0002-0921-4764; e-mail: ntopolskii@mail.ru

ВИЛИСОВ Валерий Яковлевич, д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор кафедры математики и естественнонаучных дисциплин, Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Россия, 141074, Московская обл., г. Королев, ул. Гагарина, 42; РИНЦ ID: 521423; Scopus Author ID: 57205441277; ResearcherID: P-1650-2019; ORCID: 0000-0002-2612-8593; e-mail: vvib@yandex.ru

Information about the authors

Nikolay G. TOPOLSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Information Technology, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 114882; ORCID: 0000-0002-0921-4764, e-mail: ntopolskii@mail.ru

Valeriy Ya. VILISOV, Dr. Sci. (Econom.), Cand. Sci. (Eng.), Professor of Department of Mathematics and Natural Sciences, Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, Pilot-Cosmonaut A.A. Leonov, Gagarina St., 42, Moscow Region, Korolev, 141074, Russian Federation; ID RISC: 521423; Scopus Author ID: 57205441277; ResearcherID: P-1650-2019; ORCID: 0000-0002-2612-8593; e-mail: vvib@yandex.ru

ХАБИБУЛИН Ренат Шамильевич, канд. техн. наук, доцент, начальник Учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ Author ID: 637284; Scopus Author ID: 6506192400; Researcher ID: A-4261-2016; ORCID: 0000-0003-1816-1665; e-mail: kh-r@yandex.ru

ПРАНОВ Борис Михайлович, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры прикладных информационных технологий, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Россия, 119571, г. Москва, проспект Вернадского, 82, стр.1; РИНЦ ID: 786906; ORCID: 0000-0003-2104-3897; e-mail: boris.pranov@gmail.com

ДЕМЕХИН Феликс Владимирович, д-р техн. наук, председатель, Региональная общественная организация содействия развитию деятельности в сфере пожарной безопасности «Коллегия пожарных экспертов», Россия, 196006, г. Санкт-Петербург, Заставская ул., д. 31, корп. 1 литер Р, этаж/комн 2/23; e-mail: demehin@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Renat Sh. KHABIBULIN, Cand. Sci. (Eng.), Docent; Head of the Educational and Scientific Complex of Automated Systems and Information Technologies, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 637284; Scopus Author ID: 6506192400; ResearcherID: A-4261-2016; ORCID: 0000-0003-1816-1665; e-mail: kh-r@yandex.ru

Boris M. PRANOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Applied Information Technologies, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation, Prospekt Vernadskogo, 82, p.1, Moscow, 119571, Russian Federation; ID RISC: 786906; ORCID: 0000-0003-2104-3897; e-mail: boris.pranov@gmail.com

Felix V. DEMEKHIN, Dr. Sci. (Eng.), chairman, Panel of Fire Experts Regional Public Organization for Promoting Fire Safety Assurance Activities, floor/room 2/23, letter P, bldg. 1, 31, Zastavskaya st., St. Petersburg, 196006, Russian Federation; e-mail: demehin@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.