

Об оценивании эффективности применения транспортных моделей для управления ликвидацией пожаров

В.Я. Вилисов

Технологический университет, Королев

Аннотация: Транспортная задача (ТЗ), как одна из форм задачи линейного программирования, позволяет оптимизировать распределение ограниченных ресурсов пожарных подразделений (пожарных автомобилей, оборудования и материалов) по нескольким одновременным вызовам. Применение ТЗ, как альтернативы ныне существующему детерминированному расписанию выездов, для распределения ресурсов должно повысить эффективность реагирования, т.е. снизить ущерб. В статье предлагается алгоритм оценивания этой величины снижения ущерба на основе использования имеющихся официальных статистических данных о пожарах и с учетом структуры ТЗ.

Ключевые слова: обратная задача, задача линейного программирования, спектр задачи, область допустимых решений, гистограмма распределения ущерба.

Введение

Статистический анализ данных за прошлые годы показал, что с ростом количества пожаров растут и все виды ущерба [1]. Наиболее вероятной причиной этого является снижение эффективности реагирования пожарных подразделений при одновременных вызовах в связи с ограниченностью ресурсов (сил и средств - СиС) и принятым в настоящее время детерминированным расписанием выездов.

Применение алгоритмов оптимального распределения СиС позволяет построить гибкий график выездов пожарных подразделений на вызовы [2]. В качестве структурно адекватной модели распределения принята транспортная задача (ТЗ) [3] в ее адаптивной форме [4], учитывающей позитивный прошлый опыт лица, принимающего решения (ЛПР). ТЗ (транспортная модель), используемая в дальнейшем анализе, имеет следующий вид:

$$X_{opt} = \arg \min_X L(X) = \arg \min_X \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, \dots, m; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, \dots, n; \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где L - целевой показатель, отражающий совокупные издержки или эффект;
 m - количество пожарных частей (ПЧ), ресурсы которых распределяются (например, автоцистерны - АЦ); n - количество одновременных пожаров;
 $X = \|x_{ij}\|_{mn}$ - матрица искомым переменных задачи, где x_{ij} - количество единиц ресурса, направляемого из i -ой ПЧ по j -му вызову ; $C = \|c_{ij}\|_{mn}$ - матрица обобщенных издержек или эффектов (обычно называемых транспортными), где c_{ij} - издержки, связанные с передачей x_{ij} единиц ресурса из i -ой ПЧ на j -й вызов/пожар. Матрицу C называют также *платежной матрицей*, а целевую функцию $L(X)$ - *платежной функцией* ТЗ. Эффектом может быть, например, снижение ущерба за счет передачи на пожар соответствующего количества техники. Ситуация, требующая принятия решений (СТПР) определяется значениями *вектора запасов* (имеющихся ресурсов в ПЧ) $\bar{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_m]^T$ и *вектора заказов* (потребностей вызовов в количестве вида ресурса) $\bar{b} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T$, где T - символ транспонирования. Критерий (1) - на минимум (т.е. будем далее предполагать, что минимизируются потери).

При таком представлении ситуации распределения ресурсов с помощью транспортной модели возникает вопрос об ожидаемом эффекте от использования модели на практике - в системах поддержки принятия решений (СППР). Далее покажем, как такие оценки могут быть сделаны.

Постановка задачи

Соотношения (1)-(4) представляют собой постановку *прямой транспортной задачи* (ТЗ), результатом решения которой является оптимальное распределение имеющихся ресурсов \bar{a} (например, АЦ в ПЧ) в необходимых объемах \bar{b} потребителям (пожарам, вызовам). Прямая ТЗ в виде черного ящика приведена на рис. 1, там же и обратная ТЗ.

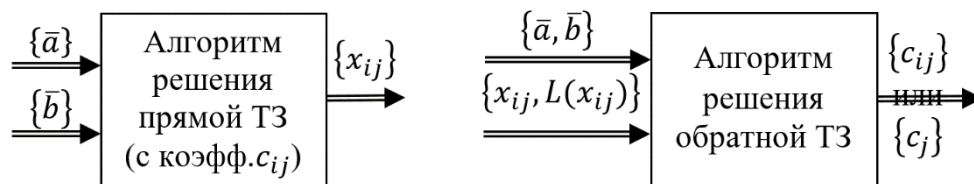


Рис. 1. Входные и выходные параметры прямой и обратной ТЗ

Целью решения обратной ТЗ является определение значений коэффициентов скалярной платежной (целевой) функции c_{ij} или c_j (в одноиндексной форме - при сведении ТЗ к задаче линейного программирования - ЗЛП) по наблюдениям, в состав которых входят векторы СТПР (\bar{a} и \bar{b}) и решения x_{ij} , принятые опытным ЛПР-диспетчером пожарного гарнизона в данной СТПР. Обратная задача (ОТЗ) выполняет роль обратной связи, подстраивающей параметры целевой функции в соответствии с предпочтениями опытного ЛПР, учитывающего при принятии решений все целевые показатели. Таким образом, решение обратной ТЗ позволяет построить скалярный критерий, являющийся сверткой всего набора критериев, которые следует учитывать. Обратная ТЗ может снимать не только априорную неопределённость, но и текущую

неопределенность, вызванную нестационарностью внешней среды и/или предпочтений ЛПР.

Решение обратной ТЗ является процедурой *машинного обучения прямой ТЗ*, которая, после достаточного ее обучения, может быть использована в составе СППР для оптимального распределения СиС. При этом система предпочтений модели (ее целевая функция) будет соответствовать предпочтениям ЛПР-учителя.

Для решения ОТЗ, ТЗ сведена к *ЗЛП на максимум*, в которой все ограничения представлены неравенствами тип (\leq) . Преобразование ТЗ в ЗЛП и обратно позволяет использовать для решения прямой ТЗ (после ее машинного обучения) методы решения ЗЛП.

Таким образом, ТЗ в адаптивной форме позволяет выявить и рассматривать весь набор решений, которые соответствуют области допустимых решений (ОДР), определяемой текущей ситуацией (СТПР). Если ЛПР принимает решения в традиционной схеме - без СППР [5,6], использующей транспортную модель, то его множество возможных решений можно считать распределенным на этом множестве, что дает основание для получения оценок эффективности принятия решений с использованием и без использования модели ТЗ в СППР. А их сравнение позволяет оценить эффективность применения модели ТЗ при распределении ресурсов ПЧ в ситуациях одновременных вызовов.

Решение задачи

Спектры ЗЛП. Для построения алгоритма оценивания эффективности использовано понятие *спектра задачи* [4]. Решение задачи далее проиллюстрировано на примере ТЗ размерности 2×3 (две ПЧ и три вызова). Спектр такой: ТЗ, а также семейство *нормальных* (ортогональных к гиперплоскостям ограничений) *векторов единичной длины* (НВЕД), вместе с

НВЕД целевой функции, и типичная ОДР, возникающая при распределении ресурсов пожарных частей, приведены на рис. 2.

То или иное решение, выбранное ЛПР, является одной из крайних точек ОДР, образованных соответствующими гиперплоскостями ограничений (пронумерованы на рис. 2в). Каждой гиперплоскости ставится в соответствие нормальный (ортогональный ей) вектор единичной длины. Принятому решению ставится в соответствие сумма НВЕД гиперплоскостей, образующих эту крайнюю точку. На рис. 2а приведены все такие суммы НВЕД ТЗ (обозначены в формате $i-j$, т.е. номеров пересекающихся гиперплоскостей). Для ОТЗ длина такого суммарного вектора \bar{e} может служить мерой информативности, принятого ЛПР решения X , в процедуре оценивания его ЦФ путем решения обратной задачи. На рис. 2б приведены нормированные (приведенные к единичной длине) такие суммарные векторы \bar{e} .

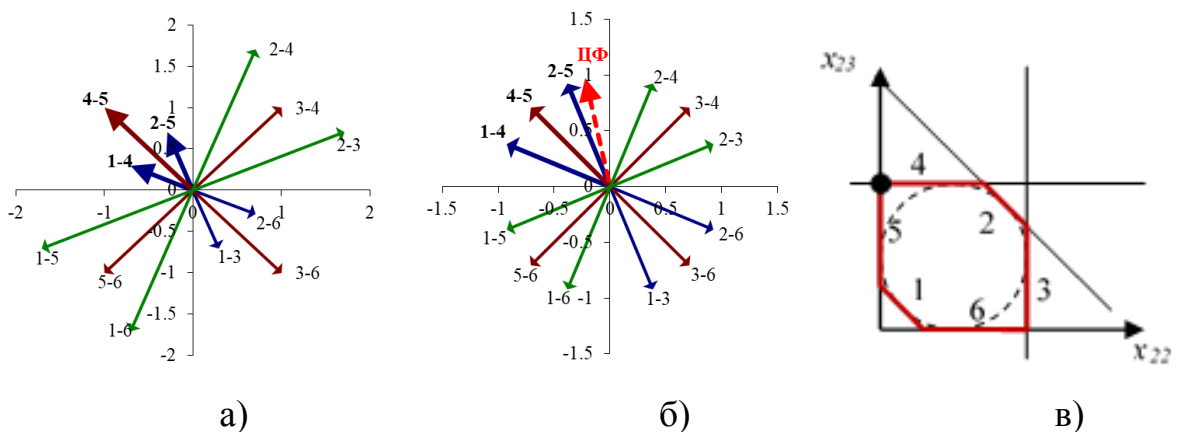


Рис. 2. Варианты векторов наблюдений и принятых решений (а); НВЕД наблюдений и целевой функции (б); типичная ОДР (в)

Искомый в ОТЗ вектор коэффициентов ЦФ ЛПР \bar{c} также может быть представлен в виде НВЕД. Тогда геометрически ОТЗ может быть интерпретирована как задача поиска (по наблюдениям за решениями ЛПР) такого нормированного суммарного НВЕД, который максимально близок к

искомому НВВД вектора коэффициентов ЦФ ЛПР \bar{c} (рис. 2б). Вектор оценки \bar{e} коэффициентов целевой функции \bar{c} может быть использован в качестве коэффициентов ЦФ для решения прямой ТЗ в целях распределения СиС при одновременных вызовах/пожарах.

Таким образом, всем возможным решениям, которые может принимать ЛПР-диспетчер пожарного гарнизона, распределяющий ресурсы между одновременными вызовами, может быть поставлен в соответствие набор НВВД (типа приведенного на рис. 2б). Однако, если разрешающая способность ЛПР очень высокая (способность «чувствовать» тот вектор, который максимально близок к его интуитивной интегральной ЦФ - ЦФ на рис. 2б), то он безошибочно выберет вершину 2-5 ОДР. А если не идеальная, то в разных ситуациях в качестве решения ЛПР будет выбирать вершины из некоторой окрестности вектора ЦФ. В примере рис. 2б — это вершины, векторы которых имеют положительную проекцию на вектор ЦФ (1-4, 4-5, 2-5, 2-4, 3-4, 2-3). Этому разнообразию решений ЛПР и может быть поставлено в соответствие распределение тех эффектов (видов ущербов от пожаров), которые представлены в официальной статистике [7].

Алгоритм оценки эффективности. Структурирование задачи распределения ресурсов пожарных частей по вызовам в виде транспортной модели позволяет оценить значение ущерба (L) для различных планов распределения. Количество вариантов распределения ресурсов, с использованием транспортной модели, определяется количеством крайних точек многогранника ограничений. Однако, ЛПР-диспетчер имеет собственную интуитивную ЦФ и принимает решения в соответствии с ней. Распознавание/оценивание его ЦФ и выполняется в ходе решения обратной транспортной задачи, т.е. в процессе машинного обучения транспортной модели. В силу ограниченной разрешающей способности ЛПР и «ручной»

процедуры выбора варианта распределения SiC , принятой в ныне существующей технологии управления, результаты реализации принятых решений (эффекты) могут быть представлены в виде вероятностного распределения.

Статистические данные о прямом материальном ущербе (u_d) и числе погибших в 100 пожарах (R_2) в городах РФ за период 2012-2016 гг. приведены [1] в виде гистограмм на рис. 3.

Количество карманов гистограмм может быть произвольным, но в рассматриваемом случае все статистические данные [7] распределены по семи карманам. Это необходимо для того, чтобы поставить в соответствие статистическим распределениям ущерба (рис. 3) - спектр ЦФ ЛПР (рис. 2б) в рамках транспортной модели распределения SiC . На рассеяние значений показателей ущерба влияет достаточно много факторов и один из них — это *ограниченная разрешающая способность ЛПР* [4] при распределении им SiC по вызовам.

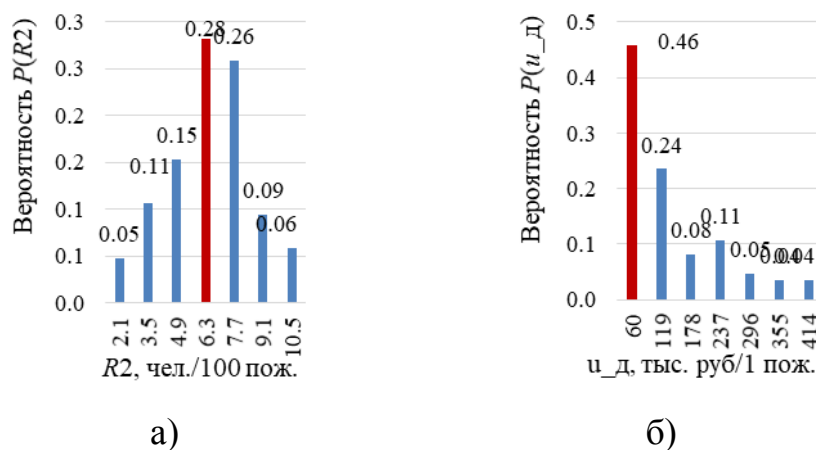


Рис. 3. Гистограммы показателей ущерба от пожаров в городах РФ за период 2012-2016 гг.

Приведем **предпосылки**, положенные в основу расчета эффективности распределения ресурсов:

- СТПР, возникающие в процессе работы ГПС, могут порождать все

возможные типы ОДР. Аппроксимацией ЦФ ЛПР в ТЗ 2×3 может быть любой из векторов дискретного спектра, приведенного на рис. 2б;

- в силу ограниченной разрешающей способности ЛПР и использования в настоящее время неструктурированных процедур выбора решений, его выбор представлен статистическим распределением на множестве векторов *спектра крайних точек ОДР задачи*;

- распределение вариантов решений, для показателей эффективности (ущерба), аналогично эмпирическим распределениям официальной статистики [7]. При этом будем предполагать, что рассеяние показателей ущерба (u_d, R_2) обусловлено множеством аддитивно равнозначных факторов, одним из которых является неопределенность принятия решений. Т.е. эффект от каждого из этих факторов может быть представлен соответствующим распределением вероятностей.

Было выполнено имитационное моделирование [8] для ТЗ 2×3 , где ЦФ ЛПР отображена на рис. 2б. Часть дискретного спектра ТЗ (рис. 2б), отражающего рассеяние интуитивно используемой целевой функции ЛПР (ближайшая половина спектра по разности векторов спектра и ЦФ ЛПР), приведена на рис. 4.

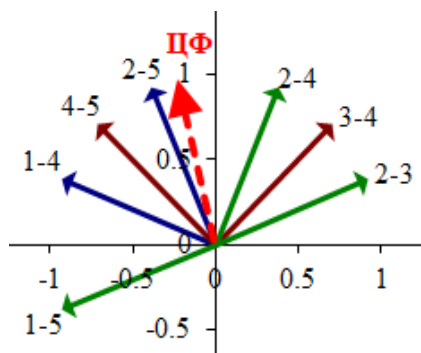


Рис. 4. Векторы рассеяния спектра ЦФ ЛПР

В табл. 1 для модельных значений коэффициентов c_{ij} ТЗ, ОДР которой приведена на рис. 2в, и случайных СТТР (векторов \bar{a}, \bar{b}) приведены

соответствующие им значения независимых переменных x_{22}, x_{23} (используемых в ЗЛП, построенной по ТЗ) плана распределения СиС и модельной ЦФ (L). В табл. 1 наибольшие значения вероятностей (в распределении показателей ущерба, приведенных на рис. 3) поставлены в соответствие наибольшим значениям ЦФ ($-L$), отражающей обобщенный ущерб. Значение ЦФ приведены со знаком (-) т.к. согласно транспортной задаче (в форме ЗЛП, максимизирующей отрицательный ущерб), ущерб должен минимизироваться. Ранжированный ряд значений ЦФЛПР приведен на рис. 5.

Распределение значений ЦФ ЛПР (рис. 5) на множестве векторов спектра (рис. 4) соответствует различным СТПР (их ОДР), а значит и различным планам распределения СиС. Распределению значений ЦФ ЛПР ($-L_k$) поставлены в соответствие значения статистических распределений показателей ущерба ($P_k(u_d)$ и $P_k(R_2)$), ранжированные по убыванию вероятностей, гистограммы которого, построенные по официальным статистическим данным о пожарах [7], приведены на рис. 3.

Таблица №1

Планы распределения, координаты их крайних точек в ОДР и значения ЦФ L в соответствующих им крайних точках ОДР

№ п/п, k	Вариант плана распределения	x_{22}	x_{23}	L_k	$-L_k$	Доля превышения над минимальным	Вероятность R_2	Вероятность u_d
1	(2-5)	0	8	-92	92	0.00	0.28	0.46
2	(4-5)	0	6	-118	118	0.28	0.26	0.24
3	(2-4)	2	6	-124	124	0.35	0.15	0.11
4	(3-4)	5	6	-133	133	0.45	0.11	0.08
5	(1-4)	0	3	-157	157	0.71	0.09	0.05
6	(1-5)	0	3	-157	157	0.71	0.06	0.04
7	(2-3)	5	3	-172	172	0.87	0.05	0.04

Средний ущерб (в абсолютных единицах модельной ЦФ):	121,67	113,06
Средний ущерб, %:	32,25	22,89
Снижение количества погибших в 100 пожарах, чел.:	1,76	-
Снижение прямого материального ущерба в пожаре, тыс. руб.:	-	36,48

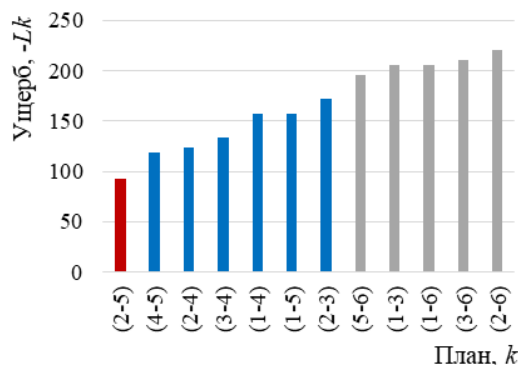


Рис. 5. Значения ЦФ ЛПР (в модельных единицах ущерба) для различных планов распределения СиС

Такое соответствие позволяет вычислить *средние значения видов ущерба* (u_d и R_2) в модельных единицах, т.е. построить байесовские оценки [9] в условиях неполноты информации [10] о ЦФ ЛПР:

$$L_{\text{ср}}(u_d) = \sum_{k=1}^K (-L_k) P_k(u_d); \quad L_{\text{ср}}(R_2) = \sum_{k=1}^K (-L_k) P_k(R_2), \quad (5)$$

где k - номер кармана (соответствует номеру варианта плана распределения СиС), а K - количество карманов в дискретных распределениях $P_k(u_d)$ и $P_k(R_2)$, представленном на рис. 3 и векторов в спектре (рис. 4). Эти значения составили соответственно: $L_{\text{ср}}(u_d) = 113,06$ и $L_{\text{ср}}(R_2) = 121,67$.

Статистическое распределение ЦФ ЛПР (рис. 5) обусловлено неабсолютной разрешающей способностью ЛПР, что и приводит к тому, что вычисленный средний ущерб (5) превышает наименьшее его значение ($-L_k = 92$ - см. табл. 1) соответственно на 22,89% и 32,25%.

Выводы

Машинообучаемая транспортная модель может быть использована в составе СППР при управлении ликвидацией пожаров для оптимизации распределения СиС по одновременным вызовам. *Обладая абсолютной разрешающей способностью, модель может предложить ЛПР, в качестве оптимального, единственное решение, определенное с помощью вектора, ближайшего к фактическому (для ТЗ 2×3 - это вектор (2-5) на рис. 5 и первая строка в табл. 1 ($-L_k = 92$)).* При этом в процедуре выбора оптимального варианта распределения СиС уже не будет участвовать весь спектр векторов, а лишь единственный вектор, являющийся оценкой вектора ЦФ ЛПР. А это значит, что эффект от использования обученной транспортной модели для оптимального распределения СиС составит 32,25%, что в абсолютных значениях *снижения количества людей, погибших* в 100 пожарах в городах составит $\Delta R_2 = 1,76$ чел. на 100 пож. Аналогично для прямого материального ущерба *снижение составит* 22,89% или $\Delta u_d = 36,48$ тыс. руб. на 1 пожар.

Литература

1. Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я. Информационно-аналитические модели поддержки управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций. М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. 201 с.
 2. Терехнев В.В., Терехнев А.В. Управление силами и средствами на пожаре. М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. 261 с.
 3. Нечитайло Н.М., Панасов В.Л., Линденбаум Т.М. Оптимизация назначения средств доставки в транспортных задачах по критерию времени // Инженерный вестник Дона, 2021, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6840.
-

4. Вилисов В.Я. Адаптивный выбор управленческих решений. Модели исследования операций как средство хранения знаний ЛПР. Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 376 с.

5. 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. Volume 133. 2020 URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154).

6. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities // Decision Support Systems. Volume 127. 2019 URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745).

7. Статистика пожаров за 2018 год. Статистический сборник: Пожары и пожарная безопасность в 2018 году. М.: ВНИИПО, 2019. 125 с.

8. Сидоров М.В., Сидоров В.Н. Имитационное моделирование работы трансмиссии трактора МТЗ-82 в среде Simulink // Инженерный вестник Дона, 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6709.

9. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. М.: Мир. 1974. 492 с.

10. Кравченко Е.В. Решение проблемы недостоверности получаемых данных в процессе управления технологическим объектом промышленного предприятия // Инженерный вестник Дона, 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6750.

References

1. Topol'skij N.G., Butuzov S.Yu., Vilisov V.Ya. Informacionno-analiticheskie modeli podderzhki upravleniya pri likvidacii pozharov i chrezvychajnyh situacij [Information and analytical models of management support in the elimination of fires and emergencies]. М.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2021. 201 p.



2. Terebnev V.V., Terebnev A.V. Upravlenie silami i sredstvami na pozhare [Management of forces and means in a fire]. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2003. 261 p.
3. Nechitajlo N.M., Panasov V.L., Lindenbaum T.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2021, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6840.
4. Vilisov V.Ya. Adaptivnyj vybor upravlencheskih reshenij. Modeli issledovaniya operacij kak sredstvo hraneniya znaniy LPR [Adaptive choice of management decisions. Operations research models as a means of storing knowledge of decision makers]. Saarbryuken (Germaniya): LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 376 p.
5. Fertier A. Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. Decision Support Systems. Volume 133. 2020. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154.
6. Cavdur F., Sebatli A. Decision Support Systems. Volume 127. 2019. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745.
7. Statistika pozharov za 2018 god. Statisticheskij sbornik: Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2018 godu [Fire statistics for 2018. Statistical book: Fires and fire safety in 2018]. M.: VNIPO, 2019. 125 p.
8. Sidorov M.V., Sidorov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6709.
9. De Groot M. Optimal'nye statisticheskie resheniya [Optimal statistical solutions]. M.: Mir. 1974. 492 p.
10. Kravchenko E.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №12. URL: vdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6750.