УДК: 681.5.015

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫДВИЖЕНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ СИЛОВЫХ СТРУКТУР В РАЙОН ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ

ALGORITHM FOR FORECASTING THE MOVEMENT OF MILITARY AND SECURITY SERVICES INTO THE AREA OF PERFORMANCE OF THE TASKS

Канд. физ.-мат. наук В.Б. Вилков[1], А.В. Курилов[2], д-р техн. наук А.К. Черных[2], Р.Ф. Усиков[3]

Ph.D. V.B. Vilkov, A.V. Kurilov, D.Sc. A.K. Chernykh, R.F. Usikov

[1]ВА МТО им. А.В. Хрулева, [2]СПб ВИ ВНГ РФ, [3]МВАА

В статье рассматривается задача прогнозирования выдвижения подразделений силовых структур в район выполнения задач. Процедура определения схем движения автомобильных колонн подразделений силовых структур представлена в виде дискретной задачи математического программирования. Для решения задачи предложен алгоритм, который позволяет с заданной точностью определять оптимальную совокупность непересекающихся маршрутов, удовлетворяющих заданным условиям, с учетом факторов неопределенности, которые влияют на прогнозирование выдвижения подразделений силовых структур в район выполнения задач. Применение предложенного алгоритма рассмотрено на практическом примере, который позволил установить целесообразность его использования при решении указанного типа задач. В заключении выделены некоторые перспективные области применения предложенного подхода.
Ключевые слова: силовые структуры, выдвижение подразделений, прогнозирование, алгоритм, оптимизация, теория графов, нечёткие множества, максимальный поток.

The article deals with the problem of forecasting the movement of military and security services into the area of performance of the tasks. The procedure for determining the movement patterns of automobile columns of military and security services is presented in the form of a discrete mathematical programming problem. To solve the problem, we propose an algorithm that allows us to determine with a given accuracy the optimal set of disjoint routes that meet the specified conditions, taking into account the uncertainty factors that affect the prediction of forecasting the movement of military and security services into the area of performance of the tasks. The application of the proposed algorithm is considered on a practical example, which allowed us to establish the feasibility of its use in solving this type of problems. In conclusion, some promising areas of application of the proposed approach are highlighted.
Keywords: military and security services, movement units, forecasting, algorithm, optimization, graph theory, fuzzy set, maximum flow.

Введение

В районе выполнения задач, характеризующемся разрушением транспортных объектов (мостов, тоннелей, дефиле и т.д.) сети автомобильных дорог (коммуникаций), соединяющей некоторые пункты, требуется организовать выдвижение подразделений силовых структур в район выполнения задач в составе нескольких l подразделений (автомобильных колонн) из пунктов их постоянной дислокации (формирования) в пункты выполнения задач [1–3]. Выдвижение подразделений силовых структур, в силу сложной транспортной обстановки на сети коммуникаций региона, следует организовать по непересекающимся маршрутам. Под маршрутом будем понимать совокупность коммуникаций (участков коммуникаций) от пункта постоянной дислокации подразделения (автомобильной колонны) до его (её) пункта выполнения поставленной задачи [4–6].

Предполагается, что направление движения по коммуникациям задано. Так как общее направление движения определено, то это предположение, за исключением рокад, не искажает общей картины. При наличии же k рокад можно рассмотреть 2^k задач, задавая все возможные сочетания направлений движения по рокадам. Так как в реальных условиях число рокад не велико, то и число таких задач не будет слишком большим. При большом числе участков коммуникаций, направление движения по которым не определено, трудоемкость решения задачи может оказаться неприемлемо большой.

Предполагается, что качество каждой коммуникации характеризуется её надёжностью (степенью нашей уверенности в том, что требуемое время она будет функционировать в соответствии с предписанными для неё требованиями по пропускной способности).

Заданы пункты постоянной дислокации подразделений (автомобильных колонн), в дальнейшем для краткости автомобильных колонн (АК), и пункты выполнения ими задач.

Требуется определить схему движения АК, т.е. найти l непересекающихся маршрутов от пунктов постоянной дислокации АК до пунктов выполнения ими задач, имеющих в целом наиболее высокую оценку качества. Под оценкой качества схемы предлагается понимать минимальное значение надёжности коммуникации из числа коммуникаций, по которым предусмотрено движение в соответствии с рассматриваемой схемой.

Определение оптимальной совокупности непересекающихся маршрутов, удовлетворяющих заданным условиям, является одной из основных задач, решаемых при выдвижении подразделений силовых структур в район выполнения задач.

Основная часть

Указанную задачу можно сформулировать в форме следующей задачи математического программирования:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{k}\mu_{ij}\cdot x_{ij}\to\max, \\ \sum_{i=1}^{l}x_{ij}=1, \quad j=1,2,...,l, \\ \sum_{j=1}^{l}x_{ij}=1, \quad i=1,2,...,l, \\ x_{ij}\in\{0,1\}, \end{cases}$$

где μ_{ij} — минимальная из надёжностей коммуникаций, составляющих j-ый маршрут для выдвижения i-ой колонны; $x_{ij}=1$, если i-ая колонна выдвигается по j-му маршруту; $x_{ij}=0$, если i-ая колонна не выдвигается по j-му маршруту.

Для решения рассматриваемой задачи предлагается алгоритм, являющийся обобщением алгоритма, предложенного в [7] и использующий методы решения задачи о максимальном потоке. При этом каждый промежуточный пункт будем рассматривать как пару пунктов. На первый из них поток поступает, а со второго, поток покидает указанный промежуточный пункт. Эти пункты соединены единственной коммуникацией. Предполагается, что пропускная способность каждой коммуникации на рассматриваемой сети автомобильных дорог равна единице. На получившейся сети ищется максимальный поток.

Пусть, например, схема рассматриваемой сети автомобильных дорог представлена на рис. 1. Преобразованная в соответствии с указанной модификацией, эта сеть представлена на рис. 2.

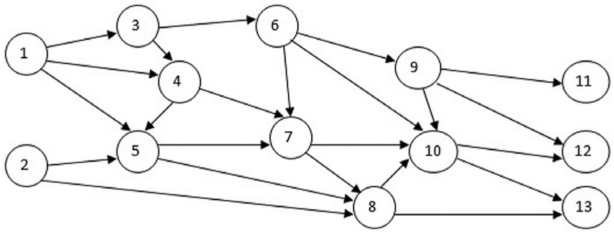

Рис. 1. Исходная сеть, граф G

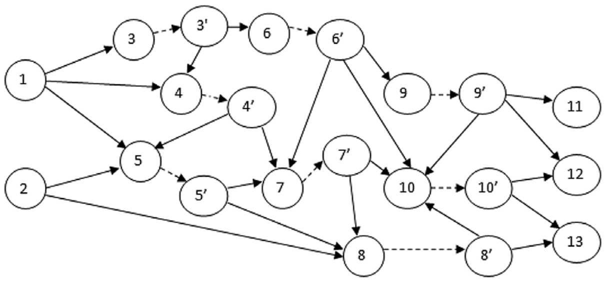

Рис. 2. Преобразованная сеть

Решение сформулированной задачи будем проводить с использованием теории графов и теории нечётких множеств.

Приведем необходимые для дальнейшего сведения из теории графов [8, 9].

Графом $G = (V, E)$ называется пара множеств, множество вершин *V* и множество ребер *E*.

Примерами графов являются: всевозможные сети коммуникаций (дорог, трубопроводов, линий связи и электропередач и т.п., иерархическая, в том числе силовая структура, система взаимоотношений между военнослужащими и органами управлениями силовых структур и т.д.).

В качестве *u* и *v* будем рассматривать вершины графа *G*, в качестве (*u*, *v*) — дугу, соединяющую эти вершины.

Приведем некоторые понятия теории нечётких множеств и нечёткой логики [10, 11].

Нечёткие множества задаются на универсальных множествах, которые являются обычными множествами. Скажем, если речь идет о надёжности коммуникаций, то в качестве универсального можно взять множество всех возможных значений надёжности (возможности выдвижения по ним) автомобильных дорог, по которым осуществляется выдвижение подразделений силовых структур в район выполнения задач [12].

Заметим, что факторами нарушения возможности и безопасности выдвижения подразделений силовых структур могут быть действия противника или незаконных вооруженных формирований (в мирное время).

Нечётким множеством $\widetilde{A}$ на универсальном множестве *U* называется совокупность пар $\left(\mu_{\tilde{A}}(u), u\right)$, где $\mu_{\tilde{A}}(u)$ — функция принадлежности (степень принадлежности, надёжность), т.е. степень принадлежности элемента $u \in U$ к нечёткому множеству $\widetilde{A}$.

Нечёткой величиной называется нечёткое множество, заданное на множестве действительных чисел. Мы для простоты ограничимся трапецеидальными нечёткими числами, которые можно рассматривать как приближения более сложных представлений нечётких чисел.

Будем рассматривать трапецеидальные числа $\langle a, b\rangle$ специального вида с функцией принадлежности $\mu(\nu)$ (рис. 3), где

$$\mu(\nu) = \begin{cases} 1, \text{ если } \nu \in [0, a]; \\ \dfrac{b-\nu}{b-a}, \text{ если } \nu \in [a, b]; \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases} \qquad (1)$$

Пересечением нечётких множеств $\widetilde{A}$ и $\widetilde{B}$ заданных на универсальном множестве *U*, называется нечёткое множество $\tilde{C}$ с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{C}}(u)$, где

$$\mu_{\tilde{C}}(u) = \min\left\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{B}}(u)\right\} \qquad (2)$$

для всех $u \in U$.

Степень истинности нечёткого высказывания $\widetilde{A}$ будем обозначать $\mu_{\tilde{A}}$.

Пусть даны нечёткие высказывания $\widetilde{A}$ и $\widetilde{B}$. Нечёткая логическая операция И (конъюнкция) по аналогии с теоретико-множественной операцией пересечения (2) выполняется по правилу:

$$\mu_{\tilde{A}u\tilde{B}} = \min\left\{\mu_{\tilde{A}}, \mu_{\tilde{B}}\right\}.$$

Дадим постановку задачи, упомянутой в начале статьи, в терминах теории графов. Под путём в рамках постановки будем понимать маршрут. Под дугами — участки маршрутов.

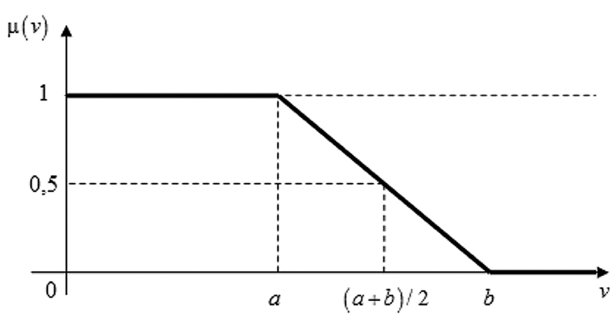

Рис. 3. Примерный график функции принадлежности нечёткого трапецеидального числа рассматриваемого вида

Итак, рассмотрим ориентированный связный взвешенный граф без контуров $G=(V,E)$, на котором выделены две вершины — источник *s* и сток *t*.

Под весом дуги будем понимать надёжность выполнения требования «коммуникация будет функционировать требуемое время в соответствии с предписанными для неё требованиями по пропускной способности».

Скажем, если мы уверены в том, что коммуникация будет уверенно функционировать не менее *a* часов, и через *b* часов она полностью прекратит функционировать, то предполагается, что график функции принадлежности нечёткого числа — время уверенного функционирования коммуникации имеет вид, представленный на рис. 3. Если $(a+b)/2=5$ часов, то из графика видно, что наша уверенность в том, что коммуникация будет уверенно функционировать 5 часов равна 0,5.

Требуется найти заданное число непересекающихся путей (путей, два из которых не имеют общих вершин, кроме источника и стока) от источника до стока, общий вес которых максимален. Под весом совокупности путей, в силу формулы (1), понимается минимальный вес дуги из числа дуг, образующих пути этой совокупности.

Для решения поставленной задачи для заданного графа *G* строится граф *G**. Если граф *G* изображен на рис. 1, то граф *G** представлен на рис. 4. Этот граф отличается от графа, изображенного на рис. 2, тем, что здесь имеются источник и сток.

Опишем алгоритм построения графа *G**.

Каждую вершину *u* графа *G* (кроме вершин *s* и *t*) заменим на дугу (*u*, *u*’). Если на графе *G* есть дуга (*u*, *v*), то на графе *G** есть дуга (*u*, *u*’) и дуга (*u*’, *v*). Кроме этого, на графе *G** имеется вершина *s* — источник, соединённая дугами со всеми вершинами, соответствующими пунктам постоянной дислокации подразделений силовых структур, и вершина *t* — сток, соединённая со всеми вершинами, соответствующими пунктам выполнения ими задач.

Рассматривая граф *G** как сеть с пропускными способностями дуг, равными единице и найдем максимальный поток на этой сети из источника в сток.

Дугу, поток по которой больше нуля (а значит равен единице), назовем загруженной дугой, путь от источника до стока, все дуги которого являются загруженными дугами, назовем загруженным путем.

Замечание 1. Рассмотрим на графе *G* путь от пункта постоянной дислокации (формирования) подразделения (автомобильной колонны) до пункта выполнения им задачи. Пусть это путь, проходящий через вершины $v_1,\ldots,v_2,\ldots,v_r$. На графе *G** имеется единственный путь от источника до стока, содержащий все вершины рассматриваемого пути и не содержащий никаких других его вершин – это путь, проходящий через вершины $s,v_1,v_1',\ldots,v_k,v_k',v_r,\ldots,v_r',t$. В дальнейшем будем считать, что этот путь на графе *G** соответствует рассматриваемому на графе *G* пути и наоборот. Каждому пути от пункта постоянной дислокации (формирования) подразделения (автомобильной колонны) до пункта выполнения им задачи на графе *G* соответствует определенный путь от источника до стока на графе *G** и наоборот.

Замечание 2. Загруженные пути на графе *G** не пересекаются. Действительно, в силу условий, налагаемых на поток, поток в каждую вершину должен равняться потоку из неё. На графе *G** в каждую вершину, не считая источника

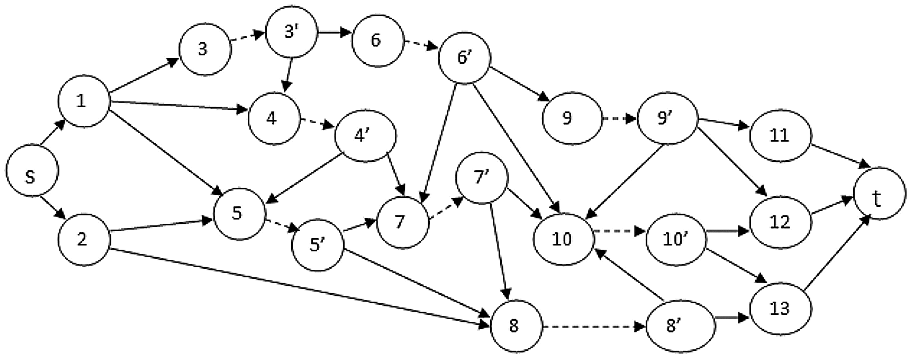

*Рис. 4. Граф G**

и стока, входит или выходит точно одна дуга. Следовательно, ни одна из указанных вершин не может лежать на двух загруженных путях.

Замечание 3. Число загруженных путей равно величине максимального потока.

Для решения задачи по отысканию на графе *G l* непересекающихся путей, общий вес которых максимален, предлагается вербальное описание алгоритма, состоящего из последовательности этапов.

На начальном (нулевом) этапе по условиям задачи строится граф *G**.

На этапе с номером τ (τ = 1, 2, 3, …) для графа G^*_τ находится максимальный поток, используя, например, метод Форда-Фалкерсона. Пусть число загруженных путей от источника до стока равно M_τ. Если $M_\tau < l$, то задача не имеет решения. Пусть $M_\tau \geq l$. Рассматриваем соответствующую совокупность путей на графе *G* и определяем её вес, пусть он равен g_τ. Убираем с графа G^*_τ дуги, вес которых не превосходит g_τ. Если при этом появляется изолированная вершина, то убираем и её. Получаем граф $G^*_{\tau+1}$. Переходим к следующему этапу.

Вычисления ведем до тех пор, пока не получим максимальный поток, величина которого меньше *l*.

Рассматриваем загруженные пути, полученные на предпоследнем этапе. Соответствующие им на графе *G* пути и являются ответом для рассматриваемой задачи.

Пример

Требуется организовать выдвижение трёх автомобильных колонн силовой структуры в район выполнения ими задач, используя имеющуюся сеть автомобильных дорог (рис. 1), на ней стрелками изображены коммуникации, по которым движение возможно в направлении стрелки. В пункте 1 находятся две автомобильные колонны, в пункте 2 — одна. В пункты выполнения ими задач — 11, 12, 13 должны прибыть по одной автомобильной колонне. Чтобы учесть тот факт, что в пункте 1 находятся две автомобильные колонны, проведем на графе (рис. 4) дополнительные построения (рис. 5). Введем пункт 1а с теми же связями, что и пункт 1. Надёжности коммуникаций (*u*, *u*’), *u* = 3, 4, …, 10 и коммуникаций, идущих от источника и в сток, равны единице, значения остальных указаны в таблице.

Этап 0. Строим граф G_1^* (рис. 5).

Этап 1. Находим максимальный поток на G_1^*. Его величина $M_1 = 3 = l$, загруженными путями, например, могут быть пути *s*-1-3-3′-6-6′-9-9′-11-*t*, *s*-1а-4-4′-7-7′-10-10′-12-*t*, *s*-2-5-5′-8-8′-13-*t*. Надёжность этого набора путей равна $g_1 = 0{,}5$ (надёжность коммуникации 1а-4). Убираем с графа G_1^* коммуникации с надёжностью не большей 0,5, это коммуникации 1а-3, 1а-4, 1а-5, 2-8, 6-10, и получаем граф G_2^* (рис. 6).

Этап 2. Находим максимальный поток на графе G_2^*. Его величина равна $M_2 = 2 < l = 3$.

На этом работа алгоритма заканчивается.

Возвращаемся к этапу 1. Загруженным на графе G_1^* путям на графе *G* соответствуют пути *s*-1-3-6-9-11-*t*, *s*-1а-4-7-10-12-*t*, *s*-2-5-8-13-*t*.

В результате принятого решения, на выдвижение колонн силовой структуры в пункты выполнения задач, получим: первая колонна следует из пункта 1 в пункт 11 через пункты 3, 6, 9; вторая — из пункта 1 в пункт 12 через пункты 4, 7, 10; третья — из пункта 2 в пункт 13 через пункты 5 и 8. Надёжность этого варианта выбора маршрутов максимальна и равна 0,5.

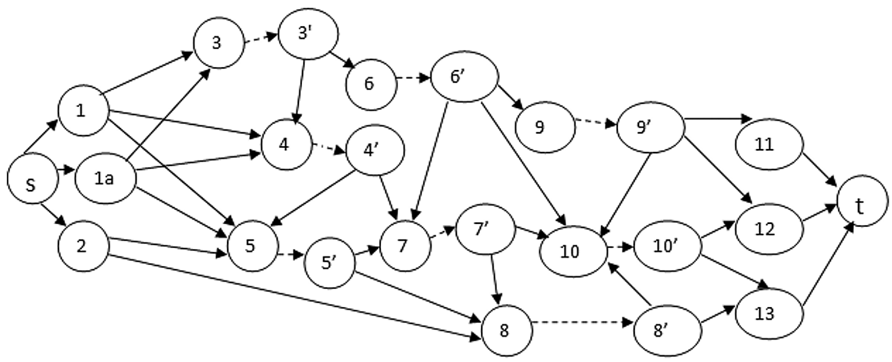

Рис. 5. Граф G с дополнительными построениями (граф G_1^*)*

Таблица

Значения надёжностей коммуникаций

№ начальной вершины	1	1	1	1a	1a	1a	2	2	3	3
№ конечной вершины	3	4	5	3	4	5	5	8	4	6
Надёжность дуги	0,9	0,7	0,9	0,4	0,5	0,5	0,7	0,5	0,8	0,8
№ начальной вершины	4	4	5	5	6	6	6	7	7	8
№ конечной вершины	5	7	7	8	7	9	10	8	10	10
Надёжность дуги	0,9	0,6	0,6	0,8	0,9	0,9	0,4	0,9	0,9	0,7
№ начальной вершины	8	9	9	9	10	10				
№ конечной вершины	13	10	11	12	12	13				
Надёжность дуги	0,8	0,6	0,8	0,7	0,9	0,8				

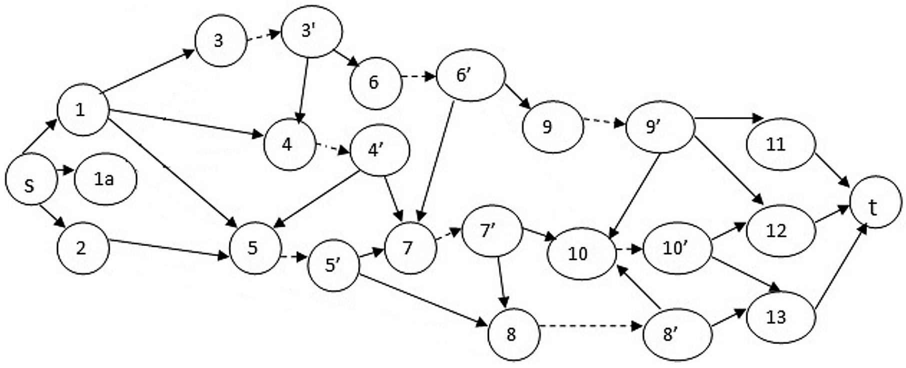

Рис. 6. Граф G_2^*

Заключение

Таким образом:

– найдена оптимальная совокупность непересекающихся маршрутов для выдвижения подразделений силовых структур в район выполнения ими задач;

– предлагаемый подход может использоваться для прогнозирования выдвижения подразделений Вооруженных сил Российской Федерации и войск национальной гвардии, в целях выполнения поставленных им задач (в мирное и военное время), а также для прогнозирования выдвижения подразделений Министерства чрезвычайных ситуаций Российской Федерации для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций регионального масштаба;

– новым в предлагаемом подходе является то, что «задача о назначении» рассматривается на произвольном ориентированном графе без циклов.

Кроме того, несомненный практический интерес представляет построение эффективных алгоритмов для решения аналогичных задач, но с другими критериями эффективности, например, суммарные затраты в финансовом выражении или суммарная протяжённость непересекающихся маршрутов, интересным является показатель — время, затрачиваемое на выдвижение к пунктам назначения.

Литература

1. Синькевич Ю.О., Дышлюк А.А., Коритчук В.В. Применение войск национальной гвардии Российской Федерации при выполнении задач по охране общественного порядка и обеспечении общественной безопасности // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева. 2016. № 3 (7). С. 52–55.

2. Алексеев О.Г. и др. Марковские модели боя. — М.: Министерство обороны СССР. 1985. 86 с.

3. Примакин А.И., Черных А.К., Яковлева Н.А. Применение методов математического моделирования для оптимизации распределения сил и средств полиции при осложнении оперативной обстановки // Вестник Санкт-Петербург-

ского университета МВД России. 2015. № 2 (66). С. 148–152.

4. Анисимов Е.Г., Губенко А.В., Сазыкин А.М. и др. Теоретические основы создания систем поддержки принятия решений в интересах комплексной транспортной безопасности // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 3 (88). С. 10–15.

5. Anisimov V.G., Zegzhda P.D., Suprun A.F., Anisimov E.G. The problem of innovative development of information security systems in the transport sector // Automatic Control and Computer Sciences. 2018. Т. 52. № 8. С. 1105–1110.

6. Черных А.К., Копкин Е.В., Скопцов А.А. Прогнозирование управления перевозками в условиях чрезвычайной ситуации регионального масштаба на транспорте // Проблемы управления рисками в техносфере. 2015. № 2 (34). С. 56–65.

7. Вилков В.Б., Черных А.К. О подходе к решению задачи комплектования подразделений личным составом на основе потокового алгоритма // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 1–2 (127–128). С. 29–37.

8. Оре О. Графы и их применение. — М.: Ленанд. 2015. 208 с.

9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Алгоритм ветвей и границ для одного класса задач теории расписаний // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1992. Т. 32. № 12. С. 2000–2005.

10. Zadeh L. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8. № 3. P. 338–353.

11. Вилков В.Б., Черных А.К., Флегонтов А.В. Теория и практика оптимизации решений на основе нечетких множеств и нечёткой логики: монография. — СПб: РГПУ им. А.И. Герцена. 2017. 160 с.

12. Анисимов Е.Г., и др. Сущность и проблемы управления обеспечением безопасности и обороной государства // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 3 (93). С. 3–10.

References

1. Sinkevich Yu.O., Dyshlyuk A.A., Koritchuk V.V. Application of the troops of the National Guard of the Russian Federation in the performance of tasks for the protection of public order and ensuring public safety // Bulletin of the Military Academy of Material and Technical Support named after A.V. Khrulev. 2016. № 3 (7). P. 52–55.

2. Alekseev O.G., et al. Markov Models of combat. — Moscow: Ministry of Defense of the USSR. 1985. 86 p.

3. Primakin A.I., Chernykh A.K., Yakovleva N.A. Application of mathematical modeling methods for optimizing the distribution of police forces and means in the complication of the operational situation // Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2015. № 2 (66). P. 148–152.

4. Anisimov E.G., Gubenko A.V., Sazykin A.M., et al. Theoretical foundations for creating decision support systems in the interests of integrated transport security // Izvestia RARAN. 2015. № 3 (88). P. 10–15.

5. Anisimov V.G., Zegzhda P.D., Suprun A.F., Anisimov E.G. The problem of innovative development of information security systems in the transport sector // Automatic Control and Computer Sciences. 2018. Vol. 52. № 8. P. 1105–1110.

6. Chernykh A.K., Kopkin E.V., Skoptsov A.A. Forecasting of transportation management in the conditions of an emergency situation of regional scale on transport // Problems of risk management in the technosphere. 2015. № 2 (34). P. 56–65.

7. Vilkov V.B., Chernykh A.K. On the approach to solving the problem of staffing units with personnel based on the streaming algorithm // Military Enginery. Issue 16. Counter-terrorism technical devices. 2019. № 1–2 (127–128). P. 29–37.

8. Ore O. Graphs and their application. — Moscow: Lenand. 2015. 208 p.

9. Anisimov V.G., Anisimov E.G. Algorithm of branches and boundaries for one class of problems in the theory of schedules // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1992. Vol. 32. № 12. P. 2000–2005.

10. Zadeh L. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8. № 3. P. 338–353.

11. Vilkov V.B., Chernykh A.K., Flegontov A.V. Theory and practice of optimization of solutions based on fuzzy sets and fuzzy logic: monograph. — St. Petersburg: Herzen State Pedagogical University. 2017. 160 p.

12. Anisimov E.G., et al. The essence and problems of managing the security and defense of the state // Izvestia RARAN. 2016. № 3 (93). P. 3–10.