

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ НА ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

**А.К. Черных, доктор технических наук, доцент;
Д.С. Буданов;
С.А. Неведьев, доктор военных наук, профессор.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Предложена эффективная методика определения множества оптимальных маршрутов на сети автомобильных дорог между подразделениями пожарной охраны и объектами газотранспортной системы, нуждающимися в ликвидации последствий чрезвычайной ситуации, реализуемая в условиях обеспечения ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на создаваемой газотранспортной системе.

Ключевые слова: оптимальные маршруты, чрезвычайная ситуация, подразделения пожарной охраны, газотранспортная система

THE TECHNIQUE OF DEFINITION THE OPTIMUM ROUTES OF THE TRANSPORTATION NETWORK AT MAINTENANCE OF LIQUIDATION OF CONSEQUENCES OF EMERGENCY SITUATIONS ON THE TRANSMISSION SYSTEM CREATED IN THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT

A.K. Chernykh; D.S. Budanov; S.A. Nefed'ev.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The effective technique of definition of set of optimum routes on a network of highways between divisions of fire protection and objects transmission of system requiring for liquidation of a consequence of an emergency situation, sold in conditions of maintenance of liquidation of consequences of emergency situations on created transmission to system is offered.

Keywords: optimum routes, emergency situation, division of fire protection, transmission to system

Своевременное выполнение задач подразделениями пожарной охраны (в дальнейшем подразделения) на объектах газотранспортной системы (ГТС), нуждающихся в ликвидации последствий чрезвычайной ситуации (ЧС), в решающей мере зависит от устойчивого функционирования автомобильных дорог, по которым осуществляется выдвижение указанных подразделений [1].

При этом в первую очередь для ликвидации последствий ЧС в район её возникновения направляются подразделения, находящиеся на территории, в границах расписания выезда [2].

К факторам, затрудняющим выдвижение указанных подразделений к объектам ГТС, нуждающимся в ликвидации последствий ЧС, относятся разрушение автомобильных мостов и тоннелей, образование завалов и трещин на автомобильных магистралях, в результате чего возникает дефицит пропускных способностей сети автомобильных дорог региона, в условиях которого определение оптимальных маршрутов между подразделениями и объектами ГТС является сложной и трудоёмкой задачей.

Последнее обстоятельство обуславливается тем, что в настоящее время отсутствуют эффективные решения задачи (модели) определения кратчайших расстояний между подмножествами транспортных объектов сети автомобильных дорог, в которой учитывается динамика изменения пропускных способностей составляющих её автомобильных дорог.

Поэтому, предлагаемая методика, реализующая в условиях дефицита пропускных способностей сети автомобильных дорог региона в реальном масштабе времени определение множества оптимальных маршрутов между подразделениями пожарной охраны и объектами ГТС, нуждающимися в ликвидации последствий ЧС, по мнению авторов, актуальна.

Охарактеризуем представленную методику.

Методика, предлагаемая в статье, позволяет в условиях использования системы ГЛОНАСС определять текущее состояние множества оптимальных маршрутов между подразделениями и объектами ГТС, нуждающимися в ликвидации последствий ЧС, на основе учёта текущего состояния транспортных объектов сети автомобильных дорог. Необходимо также отметить, что указанная методика является модификацией модели отыскания кратчайших расстояний между любыми узлами сети автомобильных дорог [3–5].

Определим в качестве узлов рассматриваемой сети автомобильных дорог Сибирского федерального округа, используемые в методике: пункты дислокации подразделений пожарной охраны, объекты ГТС, нуждающиеся в ликвидации последствий ЧС, а также транспортные объекты, в качестве которых выступают автодорожные узлы и автодорожные мосты.

Положим, что в случае если транспортный объект не функционирует, то его пропускная способность равна нулю, в противном случае его пропускная способность не равна нулю.

Математическая постановка модели определения оптимальных маршрутов и их протяженностей от привлекаемых для ликвидации последствий ЧС подразделений пожарной охраны до нуждающихся в ликвидации последствий ЧС объектов ГТС.

Найти для $\forall i \in I$ и $\forall j \in J$:

$$L_{ij}^* = \min_l \{L_{ij}^l\}, \quad (1)$$

при ограничении:

$$PS_{k_1, k_2} > 0 \text{ для } \forall (k_1, k_2) \in M_{ij}^*. \quad (2)$$

Переменными, используемыми в постановке модели, являются:

– $K = \{k : k = \overline{1, N}\}$ – множество узлов сети автомобильных дорог (подразделения пожарной охраны, объекты ГТС и транспортные объекты);

– (k_1, k_2) , где $k_1, k_2 \in K$ – участок автомобильной дороги, ограниченный узлами k_1 и k_2 ;

– PS_{k_1, k_2} – пропускная способность участка (k_1, k_2) , авт./сут.;

– L_{k_1, k_2} – протяженность участка (k_1, k_2) , км. Отметим, что $L_{k_1, k_2} = B$ (км),

где B – достаточно большое число, при: $PS_{k_1, k_2} = 0$; при отсутствии однозвенного пути, соединяющего узел k_1 с узлом k_2 ;

– i – номер узла, соответствующего i подразделению пожарной охраны;

– $I \in K$ – множество узлов, соответствующих подразделениям пожарной охраны;

– j – номер узла, соответствующего j объекту ГТС;

– $J \in K$ – множество узлов, соответствующих объектам ГТС;

– M_{ij}^l ($l=1, 2, \dots$) – множество узлов сети автомобильных дорог, определяющих l маршрут от i -го узла до j -го узла;

– L_{ij}^l – протяженность M_{ij}^l маршрута, км;

- M_{ij}^* – множество узлов сети автомобильных дорог, составляющих маршрут минимальной протяженности от i -го узла до j -го узла;
- L_{ij}^* – протяженность маршрута минимальной протяженности – M_{ij}^* , км.

В основе реализации математической модели (1–2) лежит решение задачи отыскания кратчайших расстояний между двумя любыми узлами сети автомобильных дорог [3–5].

При предположении, что любое подразделение пожарной охраны может реагировать на ЧС на любом из объектов ГТС, поясним существо этой задачи на примере, для чего рассмотрим фрагмент сети автомобильных дорог, приведенный на рисунке. На рисунке объектами, соответствующими подразделениям пожарной охраны, являются объекты с номерами 5, 6, 9, 10, объектами ГТС – объекты с номерами 1, 2, все остальные объекты – транспортные.

На рисунке также цифры в кружочках обозначают номера узлов сети автомобильных дорог, а цифры, стоящие над участками автомобильных дорог, их протяженность.

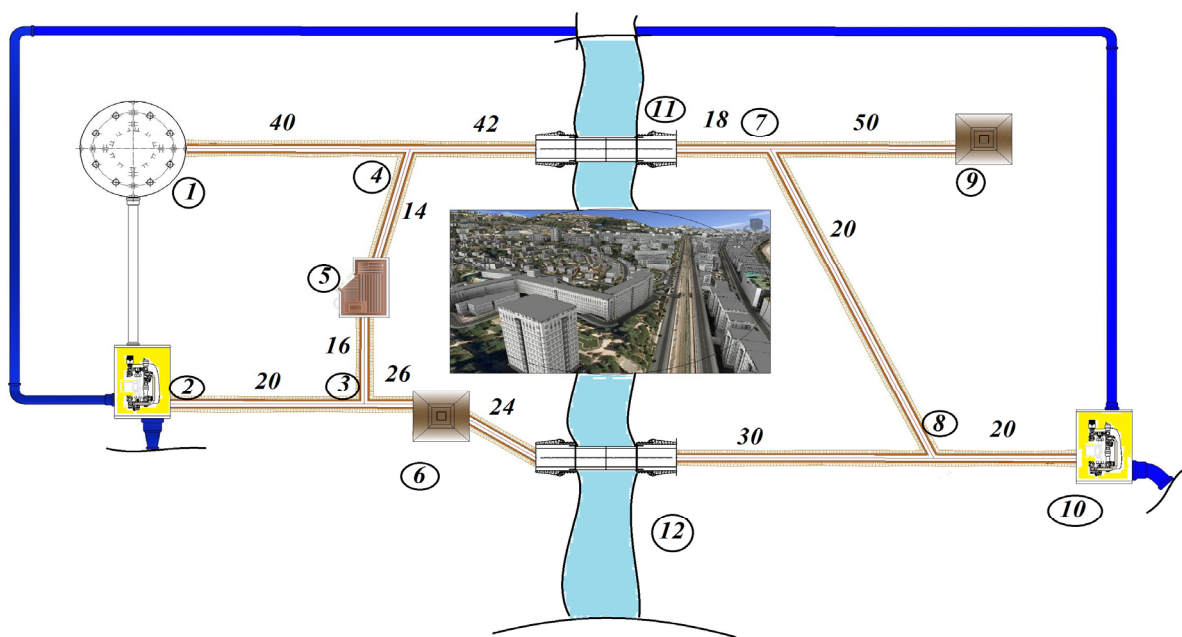


Рис. Фрагмент сети автомобильных дорог

Входная информация для реализации модели представлена в матрице L (табл. 1). В этой матрице элемент L_{pq} – расстояние от p узла до q узла сети автомобильных дорог. Кроме того, в матрицу L временно не включены узлы с номерами 11 и 12.

Таблица 1. Матрица расстояний для фрагмента сети автомобильных дорог ($||L_{pq}||$)

p\q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	В	В	40	В	В	В	В	В	В
2	В	0	20	В	В	В	В	В	В	В
3	В	20	0	В	16	26	В	В	В	В
4	40	В	В	0	14	В	60	В	В	В
5	В	В	16	14	0	В	В	В	В	В
6	В	В	26	В	В	0	В	54	В	В
7	В	В	В	60	В	В	0	20	50	В
8	В	В	В	В	В	54	20	0	В	20
9	В	В	В	В	В	В	50	В	0	В
10	В	В	В	В	В	В	В	20	В	0

Реализуя математическую модель определения кратчайших расстояний между двумя любыми узлами сети автомобильных дорог (первый этап методики), используя один из самых эффективных методов – метод Флойда [5], получим две матрицы: M^* и L^* (табл. 2, 3). При этом: M_{pq}^* – означает оптимальный маршрут в виде последовательности узлов, его составляющих, от p узла до q узла сети автомобильных дорог; L_{pq}^* – минимальное расстояние от p узла до q узла сети автомобильных дорог.

Таблица 2. Матрица минимальных расстояний между узлами сети для фрагмента сети автомобильных дорог ($\|L_{pq}^*\|$)

p\q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	90	70	40	54	96	100	120	150	140
2	90	0	20	50	36	46	110	100	160	120
3	70	20	0	30	16	26	90	80	140	100
4	40	50	30	0	14	56	60	80	110	100
5	54	36	16	14	0	42	74	94	124	114
6	96	46	26	56	42	0	74	54	124	74
7	100	110	90	60	74	74	0	20	50	40
8	120	100	80	80	94	54	20	0	70	20
9	150	160	140	110	124	124	50	70	0	90
10	140	120	100	100	114	74	40	20	90	0

Таблица 3. Матрица оптимальных маршрутов между узлами сети для фрагмента сети автомобильных дорог ($\|M_{pq}^*\|$)

P\q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1,4,5,3,2	1,4,5,3	1,4	1,4,5	1,4,5,3,6	1,4,7	1,4,7,8	1,4,7,9	1,4,7,8,10
2	2,3,5,4,1	0	2,3	2,3,5,4	2,3,5	2,3,6	2,3,5,4,7	2,3,6,8	2,3,4,7,9	2,3,6,8,10
3	3,5,4,1	3,2	0	3,5,4	3,5	3,6	3,5,4,7	3,6,8	3,5,4,7,9	3,6,8,10
4	4,1	4,5,3,2	4,5,3	0	4,5	4,5,3,6	4,7	4,7,8	4,7,9	4,7,8,10
5	5,4,1	5,3,2	5,3	5,4	0	5,3,6	5,4,7	5,4,7,8	5,4,7,9	5,4,7,8,10
6	6,3,5,4,1	6,3,2	6,3	6,3,5,4	6,3,5	0	6,8,7	6,8	6,8,7,9	6,8,10
7	7,4,1	7,4,5,3,2	7,4,5,3	7,4	7,4,5	7,8,6	0	7,8	7,9	7,8,10
8	8,7,4,1	8,6,3,2	8,6,3	8,7,4	8,7,4,5	8,6	8,7	0	8,7,9	8,10
9	9,7,4,1	9,7,4,3,2	9,7,4,5,3	9,7,4	9,7,4,5	9,7,8,6	9,7	9,7,8	0	9,7,8,10
10	10,8,7,4,1	10,8,6,3,2	10,8,6,3	10,8,7,4	10,8,7,4,5	10,8,6	10,8,7	10,8	10,8,7,9	0

Анализируя результаты реализации модели, видим, что подразделению пожарной охраны (узел № 10) выдвижение к объекту ГТС (узел № 1) целесообразно осуществлять сначала по участку (8, 7), а затем в направлении узла № 1, через узлы с номерами 11 и 4 (то есть $M_{1,10}^* = M_{1,10}^1 = \{1, 4, 7, 8, 10\}$), а не по маршруту $M_{1,10}^2 = \{1, 4, 3, 6, 8, 10\}$.

Учтём, например, используя возможности системы ГЛОНАСС, в рамках второго этапа предлагаемой методики, пропускные способности сети автомобильных дорог Сибирского федерального округа, корректируя матрицу L^* на основе «воздействия» внешней среды на объекты указанной сети (порядок и природа этого «воздействия» не оказывают непосредственного влияния на процесс получения решения задачи (1–2) и поэтому они остаются за рамками данной методики).

Предположим, что в результате «воздействия» узел № 11 (мост) разрушен. В этом случае в матрице L (включающей узлы 11 и 12) задается $L_{4,11} = L_{11,4} = L_{7,11} = L_{11,7} = B$. В результате второй реализации математической модели определения кратчайших расстояний между двумя любыми узлами сети автомобильных дорог (2 этап методики) в числе других оптимальных маршрутов получим оптимальный маршрут, который к тому же для заданных исходных данных (рис.) является единственным – $M_{1,10}^* = M_{1,10}^2$. Последнее

иллюстрирует возможность учёта «воздействия» на объекты сети автомобильных дорог в процессе поиска оптимальных маршрутов, связывающих подразделения пожарной охраны с объектами ГТС, нуждающимися в ликвидации последствий ЧС.

Необходимо отметить, что при второй реализации математической модели определения кратчайших расстояний между двумя любыми узлами сети автомобильных дорог матрица L^* – по-прежнему матрица оптимальных маршрутов между всеми узлами сети автомобильных дорог. По условиям задачи нужны только оптимальные маршруты между объектами ГТС, нуждающимися в ликвидации последствий ЧС и подразделениями пожарной охраны.

Реализуя нахождение указанных маршрутов, проведем адаптацию метода Флойда, реализующего модель определения кратчайших расстояний между двумя любыми узлами сети автомобильных дорог, проводя минимизацию продолжительности его выполнения.

В рамках третьего этапа предлагаемой методики приведём алгоритм реализации указанной адаптации.

Шаг № 1. Последовательно проводим просмотр всех элементов матрицы L вида L_{ij} , L_{ik} , L_{kj} в цикле $k = \overline{1, l}$, $i = \overline{1, l}$, $j = \overline{1, l}$, где l – размерность матрицы L . В процессе просмотра при выполнении условия $L_{ij} > L_{ik} + L_{kj}$ полагаем $L_{ij} = L_{ik} + L_{kj}$ и записываем в M_{ij} числа i, k, j ($M_{ij} = \{i, k, j\}$).

В случае $L_{ij} \leq L_{ik} + L_{kj}$ записываем в M_{ij} числа i и j ($M_{ij} = \{i, j\}$).

Шаг № 2. Последовательно выбираем очередной (первый) узел – объект ГТС, нуждающийся в ликвидации последствий ЧС с номером i . Затем последовательно выбираем очередной (первый) узел, соответствующий j подразделению пожарной охраны.

Шаг № 3. В случае если $M_{ij} = \{i, j\}$ осуществляем переход на шаг № 5, иначе – на шаг № 4.

Шаг № 4. В рамках данного шага из совокупности чисел M_{ij} выбираются последовательно, начиная с последней, пары соседних чисел. Если для выбранной пары (допустим, это будут s и t) имеет место $M_{st} = \{s, t\}$, то осуществляем переход к выбору пары, последним числом в которой является s . В случае если $M_{st} = \{s, n, t\}$, то n включается в список чисел M_{ij} . При этом в качестве очередной пары чисел выбирается, в соответствии с алгоритмом, n и t . Выполнение операций в рамках данного шага завершается в случае, когда для любой пары чисел p, q из перечня чисел M_{ij} имеем $M_{pq} = \{p, q\}$.

Шаг № 5. В случае если все узлы, соответствующие объектам ГТС, нуждающимся в ликвидации последствий ЧС, и узлы, соответствующие подразделениям пожарной охраны, просмотрены, то $L_{ij}^* = L_{ij}$, $M_{ij}^* = M_{ij}$ ($i \in I, j \in J$) и необходимо осуществить переход на шаг № 6, в противном случае – на шаг № 2.

Шаг 6. Останов.

В качестве вывода отметим, что реализация предлагаемой методики позволяет получить в условиях дефицита пропускных способностей сети автомобильных дорог Сибирского федерального округа в реальном масштабе времени множество оптимальных маршрутов между всеми заданными узлами, соответствующими подразделениям пожарной охраны, и узлами, соответствующими объектам ГТС, нуждающимся в ликвидации последствий ЧС. Кроме того, программную реализацию предлагаемой методики можно использовать в информационных системах, используемых в целях управления ликвидацией последствий ЧС [6–9] при выработке оперативных и обоснованных решений в Сибирском федеральном округе на ликвидацию последствий ЧС регионального масштаба в части, касающейся постановки задач подразделениям пожарной охраны.

Литература

1. Способы и средства ликвидации чрезвычайных ситуаций / Г.П. Саков [и др.]; под общ. ред. С.К. Шойгу. М.: ЗАО «ПАПИРУС», 1998. 298 с.
2. Об утверждении порядка привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, гарнизонов пожарной охраны для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ: Приказ МЧС России от 5 мая 2008 г. № 240 (в ред. от 29 июля 2014 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. М.: Мир, 1974. 519 с.
4. Черных А.К., Вилков В.Б. Управление безопасностью транспортных перевозок при организации материального обеспечения сил и средств МЧС России в условиях чрезвычайной ситуации // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 9. С. 52–59.
5. Вагнер Г. Основы исследования операций. М.: Мир, 1972. Т. 1. 335 с.
6. Малыгин И.Г., Сильников М.В. Интеллектуальные системы транспортной безопасности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 1 (29). С. 6–13.
7. Васьков В.Т., Малыгин, И.Г., Плотников Ю.А. Автоматизированная геоинформационная система поддержки принятия решений по управлению оперативными подразделениями пожарной охраны // Проблемы управления рисками в техносфере. 2011. № 1 (17). С. 58–67.
8. Черных А.К., Клыков П.Н. Технологии современных геоинформационных систем – средство повышения эффективности автоматизированных систем управления транспортом в условиях чрезвычайных ситуаций // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2014. № 3. С. 20–24.
9. Черных А.К., Подружжина Т.А. Концептуальные вопросы использования информационных систем, реализующих распределенные вычисления // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 3 (31). С. 84–90.

References

1. Sposoby i sredstva likvidacii chrezvychajnyh situacij / G.P. Sakov [i dr.]; pod obshch. red. S.K. SHOjgu. M.: ZAO «PAPIRUS», 1998. 298 s.
2. Ob utverzhdenii poryadka privilecheniya sil i sredstv podrazdelenij pozharnoj ohrany, garnizonov pozharnoj ohrany dlya tusheniya pozharov i provedeniya avarijno-spasatel'nyh rabot: Prikaz MCHS Rossii ot 5 maya 2008 g. № 240 (v red. ot 29 iyulya 2014 g.). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
3. Hu T. Celochislennoe programmirovaniye i potoki v setyah. M.: Mir, 1974. 519 s.
4. Chernyh A.K., Vilkov V.B. Upravleniye bezopasnost'yu transportnyh perevozok pri organizacii material'nogo obespecheniya sil i sredstv MCHS Rossii v usloviyah chrezvychajnoj situacii // Pozharovzryvobezopasnost'. 2016. T. 25. № 9. S. 52–59.
5. Vagner G. Osnovy issledovaniya operacij. M.: Mir, 1972. T. 1. 335 s.
6. Malygin I.G., Sil'nikov M.V. Intellektual'nye sistemy transportnoj bezopasnosti // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2014. № 1 (29). S. 6–13.
7. Vas'kov V.T., Malygin, I.G., Plotnikov Yu.A. Avtomatizirovannaya geoinformacionnaya sistema podderzhki prinyatiya reshenij po upravleniyu operativnymi podrazdeleniyami pozharnoj ohrany // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2011. № 1 (17). S. 58–67.
8. Chernyh A.K., Klykov P.N. Tekhnologii sovremennyh geoinformacionnyh sistem – sredstvo povysheniya ehffektivnosti avtomatizirovannyh sistem upravleniya transportom v usloviyah chrezvychajnyh situacij // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2014. № 3. S. 20–24.
9. Chernyh A.K., Podruzhkina T.A. Konceptual'nye voprosy ispol'zovaniya informacionnyh sistem, realizuyushchih raspredelennye vychisleniya // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2014. № 3 (31). S. 84–90.