

М. А. Сквазников¹✉, Д. Л. Колыгин¹

Космический мониторинг объектов наземной транспортной инфраструктуры в зоне чрезвычайной ситуации

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: vka@mil.ru

Аннотация. Космический мониторинг предлагается использовать в целях повышения достоверности и оперативности предоставляемой информации о состоянии отдельных элементов транспортной инфраструктуры при планировании доставки грузов в зону чрезвычайной ситуации. Для описания логистики наземных транспортных перевозок разработан сетевой граф. В качестве исходных данных выступают характеристики условий движения, инфраструктуры и погрузочно-разгрузочных операций, параметры колесной, гусеничной техники и железнодорожных вагонов. Полученные значения интенсивностей транспортного потока на отдельных участках сети позволяют оценить пропускную способность всей транспортной сети и сформировать альтернативные пути в ориентированном графе, описывающем наземные транспортные перевозки. Разработанный алгоритм расчета интенсивностей транспортного потока позволяет осуществлять мониторинг состояния объектов транспортной инфраструктуры, выявления разрушений и затоплений в зоне чрезвычайной ситуации в целях оптимизации маршрутов наземных перевозок.

Ключевые слова: наземные транспортные перевозки, сетевой граф, космический мониторинг, оптимизация маршрутов наземных перевозок

М. А. Skvaznikov¹✉, D. L. Kolygin¹

Space monitoring of ground transportation infrastructure objects in emergency zones

¹Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia
e-mail: vka@mil.ru

Abstract. Space monitoring is proposed to enhance the reliability and timeliness of information about the condition of specific elements of transportation infrastructure when planning cargo delivery to emergency zones. A network graph has been developed to describe the logistics of ground transportation. The initial data include characteristics of traffic conditions, infrastructure, loading and unloading operations, as well as parameters of wheeled, tracked vehicles, and railway wagons. The obtained values of traffic flow intensities on specific network segments allow for the assessment of the entire transportation network's capacity and the formation of alternative paths in a directed graph describing ground transportation. The developed algorithm for calculating traffic flow intensities enables monitoring the condition of transportation infrastructure objects, identifying damages and floods in emergency zones, and optimizing ground transportation routes.

Keywords: ground transportation, network graph, space monitoring, optimization of ground transportation routes

Введение

Транспортная инфраструктура – важнейший элемент материального производства и обеспечения жизнедеятельности населения.

Задачи повышения эффективности ее функционирования решаются на современном этапе оптимизацией маршрутной сети, совершенствованием способов организации движения и транспортного планирования.

В целях поиска факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на качество транспортных перевозок, используется большое количество математических моделей.

При строительстве сложных, пространственно-распределенных транспортных систем используются макроскопические модели, представляющих транспортные потоки в виде газо- и гидродинамических процессов. К ним относятся кинетические модели, модели Танака, Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR), Пейна и др. [1-6].

В случае описания локальных участков транспортной сети применяют микроскопические модели, такие как модели Ньюэлла, клеточных автоматов, и проч. [7-9]. Однако общим недостатком упоминаемых выше моделей является отсутствие решений в случае синхронизированного потока, возникающего при организованной целенаправленной перевозке большого количества грузов определенном заданном направлении, например, при строительстве крупного промышленного объекта, ликвидации последствий природной или техногенной катастрофы и т.д. [10].

При этом данные космической съемки используются в целях повышения достоверности и оперативности предоставляемой информации о состоянии отдельных элементов транспортной инфраструктуры (мостов, развязок, пунктов погрузки (разгрузки) и т.д.) при планировании доставки грузов [11-17].

Методы и материалы

Моделирование наземных транспортных перевозок в зоне чрезвычайной ситуации осуществляется на основе использования сетевого графа $G(X, U)$ – объекта, представляющего множество вершин X и множество связей между вершинами U , и ориентированного от истока (подмножество $D \subseteq X$) к стоку (подмножество $S \subseteq X$) [18-21].

В качестве истоков могут выступать центральные материальные склады, обеспечивающие ликвидацию последствий чрезвычайной ситуации, а стоков – объекты, подлежащие восстановлению. По дугам сети из истока в сток направляется груз. Груз перевозится некоторыми дискретными объектами – транспортными средствами (грузовыми автомобилями, железнодорожными составами).

Дуги сети (i, j) характеризуются пропускной способностью – максимальным количеством груза $r(i, j)$, перевозимым по дуге (i, j) за некоторую единицу времени.

Интенсивность потока по дуге $R(i, j)$ рассчитывается следующим образом:

$$R = \lambda v ,$$

где $\lambda = \frac{n}{L} = \frac{1}{l}$ – плотность потока, 1/км; v – скорость перемещения транспортных средств, км/ч; n – количество транспортных средств; L – расстояние между вершинами графа, км; l – интервал между транспортными средствами, км.

Сетевой граф, описывающий наземные (железнодорожные и автомобильные) транспортные перевозки с центральных материальных складов и специализированных автопарков в зону чрезвычайных ситуаций, показан на рис. 1.

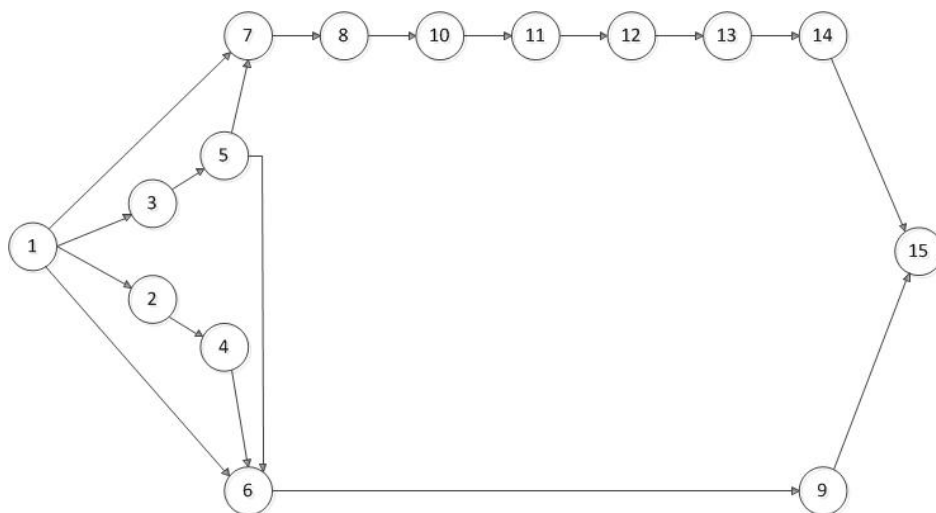


Рис. 1. Сетевой граф наземных транспортных перевозок в зону чрезвычайных ситуаций

На представленном сетевом графе цифрами обозначены следующие события.

1. Отправка грузовой транспортной техники из автопарков.
2. Прибытие грузовой транспортной техники в пункт погрузки на ж/д платформы.
3. Прибытие грузовой транспортной техники на материальные склады.
4. Начало погрузки гусеничной техники на трейлеры.
5. Начало формирования организованных транспортных колонн.
6. Убытие грузовой транспортной техники с материальных складов.
7. Убытие трейлеров с гусеничной техникой.
8. Убытие ж/д платформ с пункта погрузки.
9. Убытие организованных транспортных колонн.
10. Начало формирования состава на сортировочной ж/д станции.
11. Убытие состава с сортировочной ж/д станции.
12. Прибытие состава на сортировочную ж/д станцию в районе чрезвычайной ситуации.
13. Окончание расформирования состава в районе чрезвычайной ситуации.
14. Начало формирования в районе ж/д пункта разгрузки.
15. Прибытие колонн техники на объекты, подлежащие восстановлению в зоне чрезвычайных ситуаций.

Результаты и обсуждение

Разработанный алгоритм представляет собой последовательность операций, выполняемых для расчета интенсивности потоков наземной транспортной инфраструктуры в зависимости от характеристик условий движения, объектов инфраструктуры и погрузочно-разгрузочных операций, параметров колесной, гусеничной техники и железнодорожных вагонов [22].

На первом этапе производится ввод следующих исходных данных, полученных из различных источников (в том числе от средств ДЗЗ) и характеризующих внешние и внутренние условия процесса наземной перевозки грузов.

Первая группа данных характеризует условия движения. К ним относятся: интервал между транспортной техникой в колонне l_a ; интервал между трейлерами в колонне $l_{тр}$; интервал между сцепками платформ l_{g1} ; интервал между железнодорожными составами l_g ; среднее время формирования железнодорожного состава t_{gs} ; среднее время расформирования железнодорожного состава t_{rs} ; эмпирический коэффициент α_i , изменяющийся в зависимости от погодных-климатических условий, характеристик автомагистрали, организации наземных перевозок в пределах $[0,1]$.

Вторая группа данных характеризует объекты инфраструктуры и погрузочно-разгрузочные операции. К ним относятся: количество маршрутов движения из автопарков в железнодорожный пункт погрузки $N(1,7)$; количество маршрутов движения из автопарков на центральные материальные склады $N(1,3)$; количество маршрутов движения из автопарков на пункт погрузки трейлеров $N(1,2)$; количество маршрутов движения колесной техники из автопарков в район формирования колонн $N(1,6)$; количество мест для погрузки колесной техники $N(3,5)$; количество маршрутов движения трейлеров из пункта погрузки в район формирования колонн $N(4,6)$; количество маршрутов движения с центральных материальных складов в район формирования колонн $N(5,6)$; количество маршрутов движения с центральных материальных складов на железнодорожный пункт погрузки $N(5,7)$; количество транспортных колонн для движения в район чрезвычайной ситуации $N(6,9)$; количество маршрутов для передвижения на объекты, подлежащие восстановлению в зоне чрезвычайных ситуаций $N(9,15)$; длительность погрузки единицы грузовой техники t_g ; длительность погрузки трейлера t_r ; длительность погрузки железнодорожной платформы t_p ; длина железнодорожного пункта погрузки l_p ; количество железнодорожных путей в пункте погрузки $N(7,8)$; длительность разгрузки железнодорожной платформы t_{p1} ; количество железнодорожных путей в пункте разгрузки $N(14,15)$.

Третья группа данных описывает параметры колесной, гусеничной техники, трейлеров и железнодорожных вагонов. К ним относятся: количество типов транспортной техники n_1 ; количество типов колесной техники n_2 ; количество типов гусеничной техники n_3 ; скорости различных типов техники в колонне v_i ; средняя скорость движения трейлеров $v_{тр}$; средняя скорость движения техники в колонне при движении в район чрезвычайной ситуации v_m ; средняя длина транспортной техники l_t ; средняя скорость движения колесной техники и трей-

леров в совместной колонне v_{mh} ; средняя скорость движения сцепок платформ по железнодорожным подъездным путям v_{gp} ; средняя длина железнодорожного состава l_{gs} ; средняя скорость движения состава по железнодорожным основным путям v_{gm} .

На следующем этапе осуществляется расчет интенсивности транспортного потока $R(i, j)$ для различных участков транспортной сети:

$$R(1,7) = N(1,7) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n1})}{l_a},$$

$$R(1,3) = N(1,3) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n2})}{l_a},$$

$$R(1,2) = N(1,2) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n3})}{l_a},$$

$$R(1,6) = N(1,6) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n2})}{l_a},$$

$$R(3,5) = \frac{N(3,5)}{t_g},$$

$$R(2,7) = \frac{N(2,7)}{t_r},$$

$$R(4,6) = N(4,6) \frac{v_{tp}}{l_{tp}},$$

$$R(5,6) = N(5,6) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n2})}{l_a},$$

$$R(5,7) = N(5,7) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n2})}{l_a},$$

$$R(7,8) = \frac{N(7,8)l_p}{t_p l_t},$$

$$R(6,9) = N(6,9) \frac{v_m}{l_a},$$

$$R(9,15) = \sum_{i=1}^{N(9,15)} \alpha_i \frac{v_{mh}}{l_a},$$

$$R(8,10) = \frac{v_{gp}}{l_{g1}},$$

$$R(10,11) = \frac{l_{gs}}{t_{gs}l_t},$$

$$R(11,12) = \frac{v_{gm}}{l_g},$$

$$R(12,13) = \frac{l_{gs}}{t_{rs}l_t},$$

$$R(13,14) = \frac{v_{gp}}{l_{g1}},$$

$$R(14,15) = \frac{N(14,15)l_{p1}}{t_{p1}l_t}.$$

Полученные значения интенсивностей транспортного потока на отдельных участках сети (дугах сетевого графа) можно использовать для расчета пропускной способности всей транспортной сети на основе использования минимаксного критерия.

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет получать численные оценки интенсивности транспортных потоков на отдельных участках транспортной сети, анализировать влияние внешних и внутренних условий на пропускную способность транспортной системы и планировать применение наземного транспорта в целях ликвидации последствий природных и техногенных катастроф.

Мониторинг состояния объектов транспортной инфраструктуры с использованием средств дистанционного зондирования Земли позволяет вскрывать разрушения и затопления в зоне чрезвычайной ситуации. Данные космического мониторинга используются для формирования альтернативных путей в ориентированном графе, описывающем наземные транспортные перевозки.

Применение разработанного алгоритма позволяет повысить качество обработки и анализа данных, полученных от средств дистанционного зондирования Земли, в целях оптимизации структуры транспортной сети при организации наземных перевозок в зоне чрезвычайной ситуации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lighthill M., Whitham G. B. On kinematic waves: II. Theory of traffic flow on long crowded roads // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1955. V229. P.281-345.
2. Richards P.I. Shock Waves on the Highway// Oper. Res. 1956. V4. P.42-51.
3. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

4. Traffic flow theory: A state-of-the-art report / Editors N. H. Gartner, C. J. Messer, A. K. Rathi. Washington DC: Transportation Research Board, 2001.
5. Payne H.J. Models of freeway traffic and control // Simulation Council Proc. 28, Mathematical Models of Public Systems / Edited by G. A. Bekey. 1971. V 1. P.51-61.
6. Сухинова А. Б., Трапезникова М.А., Четверушкин Б.Н., Чубарова Н.Г. Двумерная макроскопическая модель транспортных потоков // Матем. мод. 2009. Т.21, №2. С. 118-126.
7. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic // Phys. I France. 1992. V.2. P.2221-2229.
8. Kerner B. S., Konhauser P. Structure and parameters of clusters in traffic flow // Phys. Rev. E. 1994. V 50. P.54-83.
9. Newell G.F. Nonlinear effects in the dynamics of car flowing // Oper. Res. 1961. V. 9. P. 209-229.
10. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Учебное пособие / Издание 2-е, испр. и доп. А. В. Гасников и др. Под ред. А. В. Гасникова. – М.: МЦНМО, 2013. – 215 с.
11. Фролов К.В., Лебедев В.В., Воробьев А.Ю., Гаврилов В.И., Харитонов В.А. Система дистанционного мониторинга транспортных потоков основных магистралей центра Москвы // Проблемы машиностроения и надежности машин. №5. 2000. С. 3-10.
12. Карпик А.П., Лисицкий Д.В. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С.41-44.
13. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3-17.
14. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, А.В. Полуянова, В.А. Мелкий // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65-81.
15. Долгополов Д. В. Использование данных дистанционного зондирования земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 151-159.
16. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Олейникова Е. А., Ханнанов Р.Р. Технология автоматизированного проектирования железных дорог с использованием цифровых и математических моделей местности // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 5-18.
17. Сквазников М.А., Лобовко В.В. Модель иерархического распознавания сложных объектов по данным дистанционного зондирования Земли // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. № 654 – С.82-88.
18. Попов А.М. Экономико-математические методы и модели: Учебник / А. М. Попов и др. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2019. – 345 с.
19. Гармаш А.Н. Экономико-математические методы и прикладные модели: Учебник / А. Н. Гармаш и др. – 4-е изд., пер. и доп. – М: Изд-во Юрайт, 2019. – 328 с.
20. Власов А.А. Теория транспортных потоков: моногр. / А. А. Власов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 124 с.
21. Мохирев А.П., Герасимова М.М., Медведев С.О. Нахождение маршрута минимальной стоимости транспортного пути при доставке древесины с лесосеки // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 249-261.
22. М.А. Сквазников, Д.Л. Колыгин. Подход к расчету интенсивности транспортных потоков при организации наземных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций по данным дистанционного зондирования Земли. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2023. Т.28. №3. С.77-91.

© М. А. Сквазников, Д. Л. Колыгин, 2025