

## Подход к расчету интенсивности транспортных потоков при организации наземных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций по данным дистанционного зондирования Земли

М. А. Сквазников<sup>1\*</sup>, Д. Л. Колыгин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* e-mail: vka@mil.ru

**Аннотация.** При проведении аварийно-восстановительных работ по ликвидации последствий чрезвычайной ситуации необходимо оперативное предоставление информации о состоянии объектов транспортной инфраструктуры, которое возможно только при использовании данных аэрокосмической съемки. Целью исследования является повышение эффективности транспортных перевозок в зоне чрезвычайных ситуаций с использованием разнородного транспорта в условиях синхронизации его движения, на основе использования данных дистанционного зондирования Земли. В ходе исследования проведен анализ источников данных при моделировании транспортных потоков. Представлено описание типового сетевого графа наземных транспортных перевозок. Выявлены зависимости интенсивности транспортных потоков по ребрам сетевого графа от условий движения, характеристик инфраструктуры и погрузочно-разгрузочных операций, параметров колесной, гусеничной техники и железнодорожных вагонов. Предложено использование минимаксного критерия при расчете максимальной интенсивности транспортного потока по пути сетевого графа и пропускной способности всей транспортной сети. На основе анализа задач мониторинга состояния объектов транспортной инфраструктуры проведено оценивание возможности использования данных дистанционного зондирования Земли в целях вскрытия разрушений и затоплений в зоне чрезвычайной ситуации. По результатам имитационного моделирования организации наземных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций подтверждена применимость предлагаемого подхода к расчету интенсивности транспортных потоков по данным дистанционного зондирования Земли.

**Ключевые слова:** транспортный поток, интенсивность транспортного потока, сетевой граф, пропускная способность транспортной сети, транспортные перевозки, данные дистанционного зондирования Земли

### Введение

Транспорт – это одна из важнейших отраслей материального производства, предназначенная для перевозок пассажиров и грузов. Эпоха экстенсивного развития транспортной инфраструктуры сменилась временем рационального транспортного планирования, поиском способов оптимизации маршрутной сети, повышения эффективности ее функционирования, совершенствования организации движения.

Транспортные потоки обладают рядом свойств, требующих применения математических моделей не только в исследовательской, но и в практической деятельности.

Проблемная ситуация заключается в том, что несмотря на обилие математических моделей функционирования объектов транспортной инфраструктуры, в настоящее время

отсутствует общий подход к моделированию синхронизированного потока.

Кроме того, чувствительность транспортной системы к характеристикам элементов инфраструктуры предъявляет повышенные требования к полноте и достоверности входных данных.

Сбор информации о характеристиках мобильных и стационарных объектов транспортной инфраструктуры представляет собой сложный процесс, в котором используются детекторы различного типа (индукционные, радарные, фото- и видеокамеры).

В настоящее время наиболее перспективным способом получения данных о характеристиках транспортной инфраструктуры является авиационная или космическая фотосъемка. Использование геинформационных систем и технологий значительно повышает эффективность решения целого ряда соци-

ально-экономических задач [1, 2]. В научной литературе широко представлены подходы к использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при дешифрировании и анализе объектов трубопроводного [3, 4], железнодорожного транспорта [5, 6], нефтегазового комплекса [7], внешнего [8–10] и внутреннего (городского) автомобильного транспорта [11, 12].

Особенно актуально использование данных аэрокосмической съемки при планировании доставки грузов в район, пострадавший от природной или техногенной катастрофы (наводнения, пожара, землетрясения и пр.). В этом случае при проведении аварийно-восстановительных работ по ликвидации последствий чрезвычайной ситуации необходимо оперативное предоставление информации о состоянии объектов транспортной инфраструктуры (разрушенных мостах, переправах, участках автомобильных и железных дорог и т. д.) в труднодоступных, а иногда и опасных для жизни территориях.

Доставка грузов осуществляется организованными колоннами транспортной техники, движущейся в синхронизированном потоке. Кроме того, используется комбинирование различного вида транспорта (автомобильного, железнодорожного, воздушного и речного), а также возможна перевалка грузов на другой вид транспорта.

Таким образом, целью исследования является повышение эффективности транспортных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций с использованием разнородного транспорта при условиях синхронизации его движения, на основе использования данных ДЗЗ для оценивания состояния объектов транспортной инфраструктуры.

### ***Сетевая модель наземных транспортных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций***

Для моделирования транспортных потоков используется два класса математических моделей. Первый из них – макроскопические модели (Лайтхилла – Уизема – Ричардса (LWR), Пейна, Кернера – Конхаузера, кинетические

модели) – в качестве аналогов используют газо- и гидродинамические процессы и, как правило, применяются при строительстве пространственно-распределенных, сложных транспортных систем.

LWR-модели, названные по начальным буквам фамилий их разработчиков (Лайтхилла – Уизема – Ричардса), используют гидродинамический аналог транспортного потока и выражают его интенсивность как функцию плотности и скорости [13–15].

Пейн в своей работе предложил использование дифференциальных уравнений для моделирования средней скорости при неравновесных ситуациях в транспортных системах [16]. Однако данный подход показал неустойчивость решений при малых возмущениях.

Модели перехода к плотному транспортному потоку, его неустойчивость к малым неоднородным возмущениям описываются с использованием нелинейных пространственно-временных решений большой амплитуды Кернера – Конхаузера (теории трех фаз) [17].

В кинетических моделях для описания транспортного потока используется уравнение Больцмана, в котором частицы газа заменены отдельными автотранспортными средствами [18].

Второй класс – микроскопические модели (модели клеточных автоматов, ДМ-класса, Ньюэлла, Гиппса) применяют для описания локальных ситуаций, отдельных элементов транспортной системы, например, различных режимов функционирования дорожного перекрестка.

При использовании модели стохастического клеточного описания автомата в целях управления транспортными потоками, пространственные и временные характеристики транспортных средств являются дискретными величинами [19].

В основе класса моделей «следования за лидером» лежит подход, основанный на выборе безопасной дистанции до ведущего автомобиля. Так, в моделях оптимальной скорости Ньюэлла основным фактором, определяющим движение в потоке, является зависимость безопасной скорости от расстояния до лидера [20].

В двумерных математических моделях транспортного потока учитывается распределение автомобилей не только вдоль, но поперек дорожного полотна – по полосам движения [21].

Целый класс моделей «смены полосы движения» (Гиппса, Хидаса, Вейа, Даганзо и пр.) имитируют последовательность действий водителя при поперечных маневрах [22].

При обработке космических снимков выделяются аттракторы транспортной системы, такие как торговые и логистические центры, офисы, образовательные учреждения, расположение которых влияет на ее общую пропускную способность [23].

Особенность организации транспортных перевозок в зоне стихийного бедствия заключается в синхронизации потока с нормативными требованиями к дистанции между транспортными средствами и скорости движения.

Кроме того, доставка грузов в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций осуществляется с использованием автомобильного, железнодорожного, воздушного и речного транспорта с возможной перевалкой на другой вид транспорта.

Грузы, подлежащие доставке, классифицируются следующим образом:

1) генеральные грузы – контейнеры, металлоконструкции, а также инженерная, специальная и транспортная техника. К инженерной технике относятся дорожные, землеройные, подъемно-транспортные, трубопроводные машины и машины разборки завалов, к специальной технике – пожарные и аварийно-спасательные автомобили;

2) наливные грузы – горюче-смазочные материалы, вода;

3) навалочные грузы – сыпучие стройматериалы.

Для решения задачи оптимизации перевозки грузов использовалась теория транспортных потоков. Моделирование транспортных перевозок осуществляется с использованием сети, которая в соответствии с теорией графов представляет собой конечный граф без циклов и петель, ориентированный в направлении от истока (входа сети) к стоку (выходу сети) [24, 25].

Транспортную сеть опишем в виде графа  $G(X, U)$  – объекта, представляющего множество вершин  $X$  и множество связей между вершинами  $U$ . Направленную связь назовем дугой, а ненаправленную – ребром. В множестве вершин  $X$  выделим подмножество  $D \subseteq X$ , содержащее пункты, порождающие потоки, и подмножество  $S \subseteq X$  – поглощающее потоки. Элементы множества  $D$  назовем истоками, а множества  $S$  – стоками.

В решаемой задаче истоками являются центральные материальные склады, максимально приближенные к району природной или техногенной катастрофы, а стоками – районы ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

По дугам  $(i, j)$  сети из истока в сток направляется груз. Дуги сети имеют числовые характеристики, описывающие операции, проводимые с грузом.

Наиболее распространенной характеристикой является пропускная способность, т. е. максимальное количество груза  $r(i, j)$ , которое может быть передано по ребру (дуге)  $(i, j)$  за единицу времени.

Грузы, с которыми производятся некоторые операции (разгрузки, загрузки, перевозки, сортировки, хранения), соотношенные с временными интервалами, называются материальным потоком.

Количество груза, проходящего через ребро (дугу)  $(i, j)$  в единицу времени, называется интенсивностью потока по ребру (дуге) –  $R(i, j)$ .

Вне зависимости от вида груза (навалочный, наливной, генеральный) для перевозки всеми видами транспорта (кроме трубопроводного) используются дискретные объекты (автомобили, железнодорожные вагоны, самолеты, суда), которые перемещаются по транспортным сетям с определенными интервалами.

Теория транспортных потоков применима для моделирования движения дискретных объектов по двумерным транспортным сетям. При этом дискретные объекты являются различными транспортными средствами, пред-

назначенными для перемещения грузов: автомобилями, железнодорожными вагонами, речными и морскими судами, самолетами.

Интенсивность потока  $R$  представляет собой количество дискретных объектов, перемещающихся по транспортной сети за единицу времени:

$$R = \lambda v,$$

где  $\lambda$  – плотность потока, 1/км;  $v$  – скорость перемещения дискретных объектов, км/ч.

Плотность потока  $\lambda$  – величина, обратная интервалу между дискретными объектами

$$\lambda = \frac{n}{L} = \frac{1}{l},$$

где  $n$  – количество дискретных объектов;  $L$  – расстояние, на которое перемещается груз, км;  $l$  – интервал между дискретными объектами (рассчитывается с учетом длины самого дискретного объекта), км.

Рассмотрим случай доставки грузов различных категорий наземным железнодорожным и автомобильным транспортом с центральных материальных складов и специализированных автопарков в район ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Колесная транспортная, специальная и инженерная техника прибывает из специализированных автопарков Единой государственной системы предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (РСЧС) своим ходом в организованных транспортных колоннах.

Гусеничная специальная и инженерная техника доставляется на трейлерах или на железнодорожном транспорте.

Навалочные, наливные и генеральные грузы (кроме техники) могут доставляться как автомобильным, так и железнодорожным транспортом.

Сетевой граф, описывающий рассматриваемый вид наземных транспортных перевозок в зону чрезвычайных ситуаций, представлен на рис. 1.

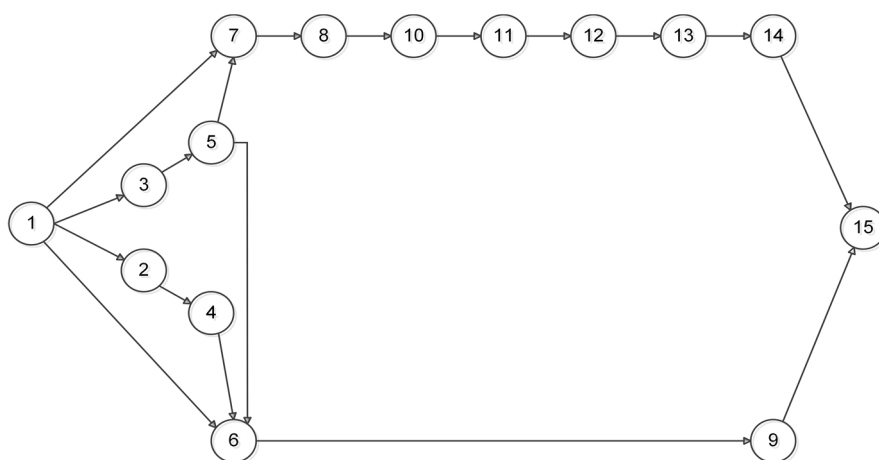


Рис. 1. Сетевой граф наземных транспортных перевозок

Описание событий сетевого графа.

1. Выход инженерной, специальной и транспортной техники из автопарков РСЧС.

2. Прибытие инженерной, специальной и транспортной техники на железнодорожный пункт погрузки (начало погрузки на железнодорожные платформы).

3. Прибытие колесной грузовой транспортной техники на центральные склады ма-

териальных средств (начало погрузки материально-технических средств).

4. Прибытие гусеничной инженерной и специальной техники на пункты погрузки трейлеров в районе формирования организованных транспортных колонн (начало погрузки гусеничной техники на трейлеры).

5. Прибытие колесной техники в район формирования организованных транспорт-

ных колонн (начало формирования колонн техники).

6. Убытие колесной грузовой транспортной техники с центральных складов материальных средств (окончание погрузки материально-технических средств).

7. Убытие трейлеров с гусеничной инженерной и специальной техникой из пунктов погрузки в район формирования организованных транспортных колонн (окончание погрузки гусеничной техники на трейлеры).

8. Убытие сцепок железнодорожных платформ с железнодорожного пункта погрузки (окончание погрузки на железнодорожные платформы).

9. Убытие колесной инженерной и специальной техники из района формирования организованных транспортных колонн (начало марша в район ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций).

10. Прибытие сцепок железнодорожных платформ на сортировочную железнодорожную станцию (начало формирования железнодорожного состава).

11. Убытие железнодорожного состава с сортировочной железнодорожной станции (окончание формирования железнодорожного состава).

12. Прибытие железнодорожного состава на сортировочную железнодорожную станцию в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (начало расформирования железнодорожного состава).

13. Убытие сцепок железнодорожных платформ с сортировочной железнодорожной станции (окончание расформирования железнодорожного состава).

14. Прибытие сцепок железнодорожных платформ в пункт разгрузки (начало разгрузки железнодорожных платформ и формирования колонн техники).

15. Прибытие техники в пункт сбора в зоне чрезвычайных ситуаций.

### **Расчет интенсивности транспортных потоков и пропускной способности транспортной сети**

Расчет интенсивности транспортного потока  $R(i, j)$  по ребрам (дугам)  $(i, j)$ .

1. Интенсивность транспортного потока инженерной, специальной и транспортной техникой из автопарков РСЧС в железнодорожный пункт погрузки:

$$R(1, 7) = N(1, 7) \frac{\min(v_1, v_2 \dots v_{n_1})}{l_a},$$

где  $v_i$  – скорость  $i$ -го типа техники в колонне;  $l_a$  – интервал между инженерной, специальной и транспортной техникой в организованной транспортной колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах [50,100] м);  $N(1, 7)$  – количество маршрутов для движения организованных транспортных колонн из автопарков в железнодорожный пункт погрузки;  $n_1$  – количество типов инженерной, специальной и транспортной техники в организованной транспортной колонне.

2. Интенсивность транспортного потока колесной грузовой транспортной техники на центральные склады материальных средств:

$$R(1, 3) = N(1, 3) \frac{\min(v_1, v_2 \dots v_{n_2})}{l_a},$$

где  $v_i$  – скорость  $i$ -го типа техники в колонне;  $l_a$  – интервал между колесной грузовой транспортной техникой в организованной транспортной колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах [50,100] м);  $N(1, 3)$  – количество маршрутов для движения организованных транспортных колонн из автопарков РСЧС на центральные склады материальных средств;  $n_2$  – количество типов колесной техники в колонне.

3. Интенсивность транспортного потока гусеничной инженерной и специальной техники на пункт погрузки трейлеров в районе формирования организованных транспортных колонн:

$$R(1,2) = N(1,2) \frac{\min(v_1, v_2 \dots v_{n_3})}{l_a},$$

где  $v_i$  – скорость  $i$ -го типа техники в колонне;  $l_a$  – интервал между гусеничной инженерной и специальной техникой в колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах [50,100] м);  $N(1,2)$  – количество маршрутов для движения организованных транспортных колонн из автопарков на пункт погрузки трейлеров;  $n_3$  – количество типов гусеничной техники в колонне.

4. Интенсивность транспортного потока колесной техники из автопарков в район формирования организованных транспортных колонн:

$$R(1,6) = N(1,6) \frac{\min(v_1, v_2 \dots v_{n_2})}{l_a},$$

где  $v_i$  – скорость  $i$ -го типа техники в колонне;  $l_a$  – интервал между колесной техникой в колонне (определяется условиями совершения марша и, как правило, находится в пределах [50,100] м);  $N(1,6)$  – количество маршрутов для движения колесной техники из автопарков в район формирования организованных транспортных колонн;  $n_2$  – количество типов колесной техники в колонне.

5. Интенсивность погрузки грузовой транспортной колесной техники на центральных складах материальных средств:

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

где  $t_g$  – средняя длительность погрузки единицы грузовой транспортной колесной техники;  $N(3,5)$  – количество погрузочных мест для грузовой транспортной колесной техники.

6. Интенсивность погрузки гусеничной инженерной и специальной техники на трейлеры:

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

где  $t_r$  – средняя длительность погрузки единицы гусеничной инженерной и специальной техники на трейлеры;  $N(2,7)$  – количество погрузочных мест для трейлеров.

7. Интенсивность транспортного потока трейлеров с погруженной инженерной и специальной техникой из пункта погрузки в район формирования организованных транспортных колонн:

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

где  $v_{тр}$  – средняя скорость движения трейлеров из пункта погрузки в район формирования организованных транспортных колонн;  $l_{тр}$  – интервал между трейлерами в колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах [50,100] м);  $N(4,6)$  – количество маршрутов для движения трейлеров с погруженной инженерной и специальной техникой из пункта погрузки в район формирования организованных транспортных колонн.

8. Интенсивность транспортного потока колесной грузовой транспортной техники с центральных складов материальных средств в район формирования организованных транспортных колонн:

$$R(5,6) = N(5,6) \frac{\min(v_1, v_2 \dots v_{n_2})}{l_a},$$

где  $v_i$  – скорость  $i$ -го типа техники в колонне;  $l_a$  – интервал между колесной грузовой транспортной техникой в колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах [50,100] м);  $N(5,6)$  – количество маршрутов для движения колонн с центральных складов материальных средств в район формирования организованных транс-

портных колонн;  $n_2$  – количество типов колесной техники в колонне.

9. Интенсивность транспортного потока колесной грузовой транспортной техники с центральных складов материальных средств на железнодорожный пункт погрузки:

$$R(5,7) = N(5,7) \frac{\min(v_1, v_2 \dots v_{n_2})}{l_a},$$

где  $v_i$  – скорость  $i$ -го типа техники в колонне;  $l_a$  – интервал между колесной грузовой транспортной техникой в колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах [50,100] м);  $N(5,7)$  – количество маршрутов для движения колонн с центральных складов материальных средств на железнодорожный пункт погрузки;  $n_2$  – количество типов колесной техники в колонне.

10. Интенсивность погрузки сцепок железнодорожных платформ в пункте погрузки:

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

где  $t_p$  – средняя длительность погрузки единицы инженерной, специальной и транспортной техники на железнодорожные платформы;  $l_t$  – средняя длина инженерной, специальной и транспортной техники;  $l_p$  – длина участка железнодорожных путей в пункте погрузки;  $N(7,8)$  – количество подъездных путей в железнодорожном пункте погрузки, оборудованных торцевыми рампами

$$l_t = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} n_i l_i,$$

где  $n_1$  – количество типов инженерной, специальной и транспортной техники;  $l_i$  – длина инженерной, специальной и транспортной техники  $i$ -го типа;  $n_i$  – количество инженер-

ной, специальной и транспортной техники  $i$ -го типа.

11. Интенсивность формирования организованных транспортных колонн для перехода в район ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций:

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

где  $v_m$  – средняя скорость выдвигания колесной техники из района формирования организованных транспортных колонн в район ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций;  $l_a$  – интервал между колесной техникой в колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах [50, 100] м);  $N(6,9)$  – количество одновременно формируемых организованных транспортных колонн для передвижения в район ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

12. Интенсивность транспортного потока колесной техники и трейлеров с гусеничной техникой в район ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций:

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

где  $v_{mh}$  – средняя скорость движения техники в колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах [30,60] км/ч);  $l_a$  – интервал между техникой в организованный транспортной колонне (определяется условиями движения и, как правило, находится в пределах 50–100 м);  $\alpha_i$  – эмпирический коэффициент, определяемый условиями движения (характеристиками дороги, погодными условиями, особенностями организации перевозок), изменяется в пределах [0,1];  $N(9,15)$  – количество маршрутов для передвижения в район ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

13. Интенсивность транспортного потока сцепок железнодорожных платформ из пункта погрузки на сортировочную станцию:

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

где  $v_{gp}$  – средняя скорость движения сцепок железнодорожных платформ по подъездным путям (определяется условиями железнодорожных перевозок и, как правило, составляет около 40 км/ч);  $l_{g1}$  – интервал между сцепками железнодорожных платформ с учетом их длины (определяется условиями совершения железнодорожных перевозок и, как правило, находится в пределах [5,7] км).

14. Интенсивность формирования железнодорожных составов из железнодорожных сцепок на сортировочной станции:

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

где  $l_{gs}$  – средняя длина железнодорожного состава (составляет 2 км);  $l_t$  – средняя длина инженерной, специальной и транспортной техники;  $t_{gs}$  – среднее время формирования железнодорожного состава (составляет 0,5 ч).

15. Интенсивность транспортного потока железнодорожных составов от сортировочной станции в районе центрального материального склада до сортировочной станции в зоне чрезвычайной ситуации:

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

где  $v_{gm}$  – средняя скорость движения железнодорожного состава по основным путям (определяется условиями железнодорожных перевозок и, как правило, составляет около 60 км/ч);  $l_g$  – интервал между железнодорожными составами с учетом длины железнодорожного состава (определяется условиями совершения железнодорожных перевозок и, как правило, находится в пределах [5, 7] км).

16. Интенсивность расформирования железнодорожного состава на сортировочной

станции в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций:

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

где  $l_{gs}$  – средняя длина железнодорожного состава (составляет 2 км);  $l_t$  – средняя длина инженерной, специальной и транспортной техники;  $t_{rs}$  – среднее время расформирования железнодорожного состава (составляет 0,5 ч).

17. Интенсивность транспортного потока сцепок железнодорожных платформ из сортировочной станции в пункт разгрузки техники:

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

где  $v_{gp}$  – средняя скорость движения сцепок железнодорожных платформ по подъездным путям (определяется условиями железнодорожных перевозок и, как правило, составляет около 40 км/ч);  $l_{g1}$  – интервал между составами (определяется условиями совершения железнодорожных перевозок и, как правило, находится в пределах [5,7] км).

18. Интенсивность разгрузки сцепок железнодорожных платформ в пункте разгрузки:

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

где  $t_{p1}$  – средняя длительность разгрузки единицы техники с железнодорожной платформы платформ;  $l_t$  – средняя длина инженерной, специальной и транспортной техники;  $l_{p1}$  – длина участка железнодорожных путей в пункте разгрузки;  $N(14,15)$  – количество подъездных путей в железнодорожном пункте разгрузки, оборудованных торцевыми рампами.

Формирование альтернативных путей в ориентированном графе, описывающем наземные транспортные перевозки.



Путь – это последовательность дуг  $S(u_1, u_2, \dots, u_k)$ , в которой конец каждой предыдущей дуги совпадает с началом следующей.

В соответствии с графом, представленном на рис. 1, из истока (вершина 1) в сток (вершина 15) можно построить пять альтернативных путей:

$$S_1(u(1,7), u(7,8), u(8,10), u(10,11), u(11,12), u(12,13), u(13,14), u(14,15));$$

$$S_2(u(1,3), u(3,5), u(5,7), u(7,8), u(8,10), u(10,11), u(11,12), u(12,13), u(13,14), u(14,15));$$

$$S_3(u(1,3), u(3,5), u(5,6), u(6,9), u(9,15));$$

$$S_4(u(1,2), u(2,4), u(4,6), u(6,9), u(9,15));$$

$$S_5(u(1,6), u(6,9), u(9,15)).$$

Максимальная интенсивность транспортного потока  $R(S_i)$  по пути  $S_i$  определяется в соответствии с минимаксным критерием как минимальное значение пропускных способностей  $r(i, j)$  (максимальных интенсивностей потока) каждой из дуг  $(i, j)$ , входящих в данный путь.

Далее приведен пример определения максимальных интенсивностей альтернативных транспортных потоков  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ :

$$r(S_1) = \min(r(1,7), r(7,8), r(8,10), r(10,11), r(11,12), r(12,13), r(13,14), r(14,15));$$

$$r(S_2) = \min(r(1,3), r(3,5), r(5,7), r(7,8), r(8,10), r(10,11), r(11,12), r(12,13), r(13,14), r(14,15));$$

$$r(S_3) = \min(r(1,3), r(3,5), r(5,6), r(6,9), r(9,15));$$

$$r(S_4) = \min(r(1,2), r(2,4), r(4,6), r(6,9), r(9,15));$$

$$r(S_5) = \min(r(1,6), r(6,9), r(9,15)).$$

Пропускная способность транспортной сети  $r_s$  определяется как минимальное значение пропускных способностей  $r(S_i)$  (максимальных интенсивностей альтернативных транспортных потоков, входящих в данную транспортную сеть):

$$r_s = \min_i r(S_i), \quad i = \overline{1, k},$$

где  $k$  – количество альтернативных транспортных потоков от истока до стока транспортной сети.

***Использование средств дистанционного зондирования Земли при планировании транспортных перевозок в зоне чрезвычайных ситуаций***

Разработанная модель должна быть уточнена при планировании мероприятий по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций по результатам обработки данных дистанци-

онного зондирования Земли с использованием аэрокосмических средств наблюдения [26].

Мониторинг состояния объектов инфраструктуры автомобильного и железнодорожного транспорта включает задачи, представленные в таблице.

Анализ характеристик объектов транспортной инфраструктуры подтвердил возможность использования КА ДЗЗ «Канопус-В»

и «Ресурс-П» для решения задач мониторинга их состояния. Примеры аэрокосмической съемки зоны чрезвычайных ситуаций представлены на рис. 2.

Задачи мониторинга состояния объектов транспортной инфраструктуры

Задачи мониторинга	Объекты транспортной инфраструктуры
Обнаружение разрушений автомобильных дорог, дорожных инженерных устройств	Автомобильная дорога (дорожная одежда, проезжая часть, обочины, земляное полотно, искусственные и линейные сооружения). Инженерные сооружения (трубы, мосты, путепроводы, эстакады, виадуки, подпорные стены, автобусные павильоны, бензозаправки, отели, станции технического обслуживания)
Обнаружение затоплений автомобильных дорог, дорожных инженерных устройств	
Определение состояния автомобильных дорог, дорожных инженерных устройств (оценивание возможности их использования в системе транспортной инфраструктуры)	
Обнаружение разрушений железнодорожных узлов и станций, железнодорожных путей, систем сигнализации, централизации и блокировки, информационных комплексов и систем управления движением, устройств электропитания, сетей связи	Железнодорожные пути (земляное полотно, рельсы, рельсовые скрепления). Железнодорожный узел (станционные сооружения для пассажиров, технические станции для ремонта и экипировки составов сортировочные, грузовые и пассажирские станции, обходные пути, депо). Железнодорожные станции (путевое хозяйство, грузовое хозяйство, система сигнализации и централизации, станционное здание (вокзал), пассажирские перроны). Устройства электропитания (линии электропередачи, районные трансформаторные подстанции и электростанции, тяговые подстанции и электротяговая сеть). Сети связи, системы сигнализации, централизации и блокировки, информационные комплексы и система управления движением и иные обеспечивающие функционирование этого комплекса здания, строения, сооружения, устройства и оборудование
Обнаружение затоплений железнодорожных узлов и станций, железнодорожных путей, систем сигнализации, централизации и блокировки, информационных комплексов и систем управления движением, устройств электропитания, сетей связи	
Определение состояния железнодорожных узлов и станций, железнодорожных путей, систем сигнализации, централизации и блокировки, информационных комплексов и систем управления движением, устройств электропитания, сетей связи (оценивание возможности их использования в системе транспортной инфраструктуры)	

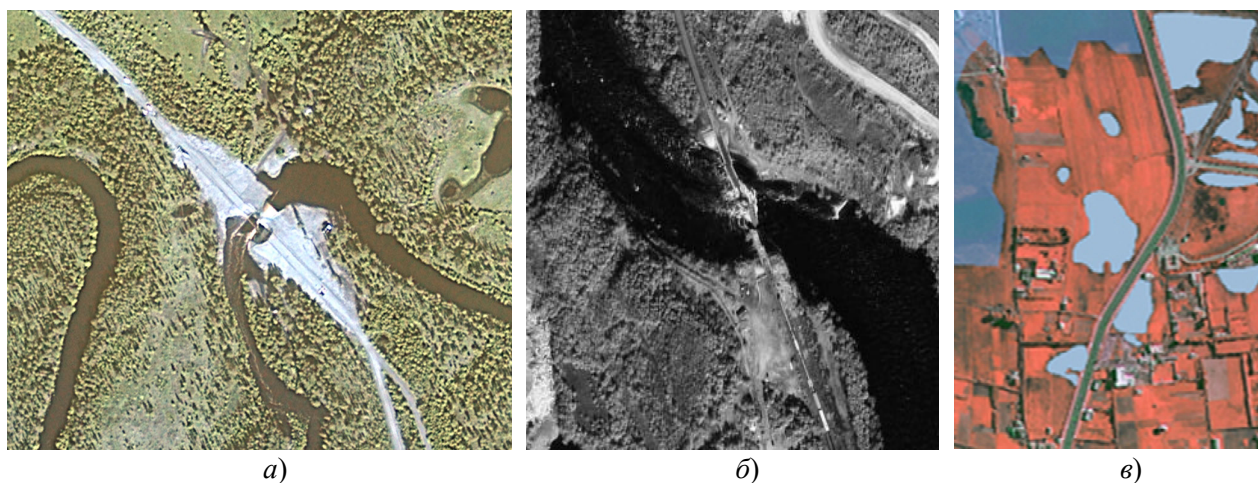


Рис. 2. Космический мониторинг состояния транспортной инфраструктуры: а) разрушение автодорожного моста; б) разрушение железнодорожного моста; в) подтопление автомобильной дороги

Результаты оценивания состояния объектов транспортной инфраструктуры используются для коррекции сетевого графа (исключения из него вершин, связанных с объектами, разрушенными при техногенной или природной катастрофе), а также изменения значения параметров сетевой модели, зависящих от оборудования стационарных объектов.

С использованием разработанного сетевого графа было проведено имитационное моделирование наземных транспортных перевозок с целью определения значимых параметров и оценивания их влияния на интенсивность потока грузоперевозок.

В виде параметров системы транспортных перевозок выступали детерминированные (расстояния и количество маршрутов между объектами топологической структуры наземных транспортных перевозок; типы и характеристики транспортных средств и грузов; класс автомобильной дороги; характеристика погрузочных мест и т. д.) и случайные (скорость и интервал движения различных транспортных средств – колесной, гусеничной техники, трейлеров, а также техники в смешанных колоннах; длительность погрузки (разгрузки) техники на железнодорожные платформы; гусеничной техники на трейлеры;

длительность формирования маршевых колонн и колонн для погрузки; относительная частота использования дорог различных классов, а также транспортных средств и т. д.) величины.

Вследствие случайности многих параметров системы использовалось статистическое моделирование, в основу которого положен метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Генерация случайных величин и событий производилась на основе использования их функций распределения и датчика равномерно распределенных в интервале (0,1) случайных чисел.

Результатами имитационного эксперимента являются значения интенсивности потоков между отдельными пунктами транспортной сети.

Разработанная имитационная модель позволяет выявлять факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на интенсивность транспортных потоков.

На рис. 3 представлена зависимость интенсивности транспортного потока колесной техники и трейлеров с гусеничной техникой в район ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций от количества возможных маршрутов.

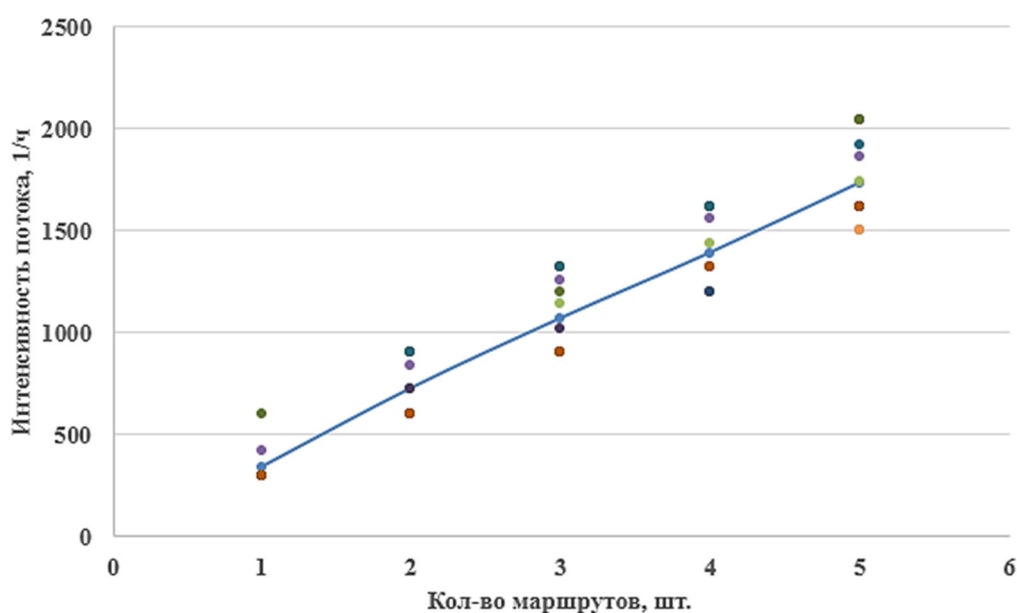


Рис. 3. Зависимость интенсивности транспортного потока от количества маршрутов

Отдельными точками на графике показаны значения интенсивностей потоков, полученные в результате отдельных прогонов имитационной модели. Результирующая линия соединяет точки рассчитанных средних значений моделируемой величины для определенного количества маршрутов.

### Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований на основе использования теории графов разработана сетевая модель транспортных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций с использованием разнородного транспорта при условиях синхронизации его движения.

Разработанный математический аппарат позволяет решать следующие задачи в рамках организации наземных транспортных перевозок:

1) получать численные оценки интенсивности транспортных потоков по отдельным

ребрам сетевого графа и максимальной интенсивности транспортного потока по планируемому пути;

2) проводить анализ влияния различных факторов (типов груза, техники, характеристик транспортной инфраструктуры) на интенсивность транспортных потоков;

3) проводить оптимизацию наземных транспортных перевозок на основе расчетов пропускной способности транспортной сети.

В результате анализа задач мониторинга состояния объектов транспортной инфраструктуры проведено оценивание возможности использования КА ДЗЗ «Канопус-В» и «Ресурс-П» в целях вскрытия разрушений и затоплений в зоне чрезвычайной ситуации.

Результаты проведенного моделирования подтвердили применимость предлагаемого подхода к расчету интенсивности транспортных потоков при организации наземных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций по данным дистанционного зондирования Земли.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпик А. П., Лисицкий Д. В. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 41–44.
2. Карпик А. П. Методологические и технологические основы геонформационного обеспечения территорий : монография. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 260 с.
3. Долгополов Д. В., Никонов Д. В., Полуянова А. В., Мелкий В. А. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65–81.
4. Долгополов Д. В. Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геонформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 151–159.
5. 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.
6. Портнов А. М., Жарников В. Б., Гурьков С. В., Фоминых М. В. Особенности формирования зон с особыми условиями использования территорий инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях информационной неопределенности каталогизации влияния природных факторов // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 122–132.
7. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.
8. 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.
9. Бударова В. А., Мартынова Н. Г., Шереметинский А. В. Содержание и практика формирования цифрового информационного пространства автотранспортной инфраструктуры // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 32–43.
10. Басаргин А. А., Бугаков П. Ю., Бугакова Т. Ю. Расчет и визуализация картографических маршрутов с использованием программного обеспечения QGIS и PGROUTING // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 86–96.

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. – 2000. – № 5. – С. 3–10.
12. Костеша В. А. Разработка системы геоинформационного обеспечения управления недвижимым комплексом автомобильных дорог // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 680–691.
13. Lighthill M., Whitham G. B. On kinematic waves: II. Theory of traffic flow on long crowded roads // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1955. – Vol. 229. – P. 281–345.
14. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. – М. : Мир, 1977. – 622 с.
15. 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.
16. Payne H. J. Models of freeway traffic and control // Simulation Council Proc. 28, Mathematical Models of Public Systems / Edited by G. A. Bekey. – 1971. – Vol. 1. – P. 51–61.
17. Kerner B. S., Konhauser P. Structure and parameters of clusters in traffic flow // Physical Review E. – 1994. – Vol. 50. – P. 54–83.
18. Гасников А. В. и др. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособие / Под ред. А. В. Гасникова. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : МЦНМО, 2013. – 215 с.
19. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic // Journal de Physique I. – 1992. – Vol. 2 (12). – P. 2221–2229. DOI 10.1051/jp1:1992277.
20. Newell G. F. Nonlinear effects in the dynamics of car flowing // Operations Research. – 1961. – Vol. 9. – P. 209–229.
21. Сухинова А. Б., Трапезникова М. А., Четверушкин Б. Н., Чубарова Н. Г. Двумерная макроскопическая модель транспортных потоков // Математическое моделирование. – 2009. – Т. 21, № 2. – С. 118–126.
22. Власов А. А. Теория транспортных потоков : монография. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 124 с.
23. Richards P. I. Shock Waves on the Highway // Operations Research. – 1956. – Vol. 4. – P. 42–51.
24. Попов А. М. и др. Экономико-математические методы и модели : учеб. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во Юрайт, 2019. – 345 с.
25. Гармаш А. Н. и др. Экономико-математические методы и прикладные модели : учеб. – 4-е изд., пер. и доп. – М. : Изд-во Юрайт, 2019. – 328 с.
26. 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.

### Об авторах

*Михаил Алексеевич Сквазников* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оптико-электронных средств.

*Дмитрий Леонидович Колыгин* – преподаватель кафедры оптико-электронных средств.

Получено 03.02.2023

© М. А. Сквазников, Д. Л. Колыгин, 2023

## **An approach to traffic flows intensity calculating in the organization of groundtransportation in the area of emergency response based on the Earth remote sensing data**

*M. A. Skvaznikov<sup>1</sup>\*, D. L. Kolygin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russian Federation

\* e-mail: vka@mil.ru

**Abstract.** When carrying out emergency recovery work to eliminate the consequences of an emergency, it is necessary to promptly provide information on the state of transport infrastructure facilities, which is possible only when using aerospace survey data. The aim of the study is to increase the efficiency of transportation in the emergency zone using heterogeneous vehicles under the conditions of synchronization of its movement, based on the use of Earth remote sensing data. Data source analysis for traffic flow modeling was carried out.

Land transportation typical network graph description is presented. The dependences of the intensity of traffic flows along the edges of the network graph on traffic conditions, infrastructure characteristics and loading and unloading operations, parameters of wheeled, tracked vehicles and railway cars are revealed. It is proposed to use the minimax criterion when calculating the maximum traffic flow intensity along the network graph path and the entire transport network capacity. Based on the analysis of the tasks of monitoring the state of transport infrastructure facilities, the possibility of using Earth remote sensing data to reveal damage and flooding in the emergency zone was assessed. Based on the simulation modeling results of the ground transportation organization in the area of emergency response based on the Earth remote sensing data, the applicability of the proposed approach to the traffic flows intensity calculating based on the Earth remote sensing data was confirmed.

**Keywords:** traffic flow, traffic flow intensity, net graph, transport network capacity, transportation, Earth remote sensing data

## REFERENCE

1. Karpik, A. P., & Lisitskii, D. V. (2009). Electronic geospatial – essence and conceptual foundations. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 41–44 [in Russian].
2. Karpik, A. P. (2004). *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniia territorii [Methodological and technological bases of geoinformation support of territories]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 260 p. [in Russian].
3. Dolgopolov, D. V., Nikonov, D. V., Poluianova, A. V., & Melkii, V. A. (2019). Possibilities of visual interpretation of main pipelines and infrastructure facilities using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(3), 65–81 [in Russian].
4. Dolgopolov, D. V. (2020). The use of earth remote sensing data in the formation of the geoinformation space of pipeline transport. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(3), 151–159 [in Russian].
5. Besimbaeva, O. G., Khmyrova, E. N., Oleinikova, E. A., & Khannanov, R. R. (2018). Technology of computer-aided design of railways using digital and mathematical terrain models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(4), 5–18 [in Russian].
6. Portnov, A. M., Zharnikov, V. B., Gurkov, S. V., & Fominykh, M. V. (2021). Features of the formation of zones with special conditions for the use of railway infrastructure territories in the conditions of information uncertainty cataloging the influence of natural factors. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(1), 122–132 [in Russian].
7. Bondur, V. G. (2010). Aerospace methods and technologies for monitoring oil and gas-bearing territories and objects of the oil and gas complex. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa [Earth Exploration from Space]*, 6, 3–17 [in Russian].
8. Mokhirev, A. P., Gerasimova, M. M., & Medvedev, S. O. (2018). Finding the route of the minimum cost of the transport route when delivering wood from the cutting area. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(4), 249–261 [in Russian].
9. Budarova, V. A., Martynova, N. G., & Sheremetinskii, A. V. (2021). The content and practice of forming a digital information space for road transport infrastructure. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(4), 32–43 [in Russian].
10. Basargin, A. A., Bugakov, P. Ju., & Bugakova, T. Ju. (2021). Calculation and visualization of cartographic routes using QGIS and PGROUTING software. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(5), 86–96 [in Russian].
11. Frolov, K. V., Lebedev, V. V., Vorob`ev, A. Ju., Gavrilov V. I., & Kharitonov V. A. (2000). The system of remote monitoring of traffic flows of the main highways of the center of Moscow. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnomy mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability]*, 5, 3–10 [in Russian].
12. Kostesha, V. A. (2021). Development of a system of geoinformation support for the management of a real estate complex of highways. *Izvestia vuzov. Geodeziya I aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 65(6), 680–691 [in Russian].
13. Lighthill, M., & Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves: II. Theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 229, 281–345.
14. Whitham, G. (1974). *Linear and nonlinear waves*. A Wiley-Interscience publication, 622 p.
15. Gartner, N. H., Messer, C. J., & Rathi, A. K. (Eds.). (2001). *Traffic flow theory: A state-of-the-art report*. Washington DC: Transportation Research Board.

16. Payne, H. J. (1971). Models of freeway traffic and control. *Simulation Council Proc.* 28, *Mathematical Models of Public Systems: Vol. 1.* (pp. 51–61). G. A. Bekey (Ed.).
17. Kerner, B. S., & Konhauser, P. (1994). Structure and parameters of clusters in traffic flow. *Physical Review E*, 50, 54–83.
18. Gasnikov, A. V. (2013). *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov [Introduction to mathematical modeling of traffic flows]* (2nd ed.). Moscow: Moscow Center for Continuous Mathematical Education Publ., 215 p. [in Russian].
19. Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automation model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12), 2221–2229. doi:10.1051/jp1:1992277.
20. Newell, G. F. (1961). Nonlinear effects in the dynamics of car flowing. *Operations Research*, 9, 209–229.
21. Sukhinova, A. B., Trapeznikova, M. A., Chetverushkin, B. N., & Churbanova, N. G. (2009). Two-dimensional macroscopic model of traffic flows. *Matematicheskoye modelirovaniye [Mathematical Models and Computer Simulations]*, 1(21), 669–676. doi: 10.1134/S207-0048-2009-060027 [in Russian].
22. Vlasov, A. A. (2014). *Teoriia transportnykh potokov [Traffic flow theory]*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction publ., 124 p. [in Russian].
23. Richards, P. I. (1956). Shock Waves on the Highway. *Operations Research*, 4, 42–51.
24. Popov, A. M. (2019). *Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli [Economic and mathematical methods and models]* (3rd ed.). Moscow: Iurait Publ., 345 p. [in Russian].
25. Garmash, A. N. (2019). *Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli [Economic and mathematical methods and applied models]* (4th ed.). Moscow: Iurait Publ., 328 p. [in Russian].
26. Skvaznikov, M. A., & Lobovko, V. V. (2016). Model of hierarchical recognition of complex objects based on Earth remote sensing data. *Trudy VKA imeni A. F. Mozhayskogo [Proceedings of the Mozhaysky Military Space Academy]*, 654, 82–88 [in Russian].

#### Author details

Mikhail A. Skvaznikov – Ph. D., Associate Professor, Department of Optoelectronic Devices and Systems.  
Dmitrii L. Kolygin – Lecturer, Department of Optoelectronic Devices and Systems.

Received 03.02.2023

© M. A. Skvaznikov, D. L. Kolygin, 2023