



## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 338.47:656.078

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-2>

## О подходах к методологическому обоснованию формирования Единой опорной транспортной сети и приоритизации проектов развития транспортной инфраструктуры



Артур КАРЛОВ



Олег ЕВСЕЕВ

Артур Владимирович Карлов <sup>1</sup>,  
Олег Владимирович Евсеев <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия.

<sup>2</sup> Научный центр по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации (ФГБУ «НЦКТП Минтранса России»), Москва, Россия.

<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-7147-8501; РИНЦ SPIN-код: 1409-3481; РИНЦ Author ID: 1080516.

<sup>2</sup> ORCID 0000-0002-2437-6497; Scopus Author ID 57215525670; РИНЦ SPIN-код: 9447-9075; РИНЦ Author ID: 187.

✉ <sup>1</sup> karlov@edu.rut-miit.ru.

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены подходы к обоснованию формирования Единой опорной транспортной сети (ЕОТС) – определены политические, научные и математические предпосылки для выделения ключевой инфраструктуры. В Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года приведены базовые критерии для каждой из опорных сетей по видам транспорта, при этом отдельно обозначено, что развитие ЕОТС осуществляется с использованием инструментов транспортно-экономического баланса. В статье исследованы возможности для прикладного применения научных методов при реализации государственной транспортной политики на базе существующей нормативной базы.

В качестве механизма отбора ключевой (опорной) транспортной инфраструктуры предложено использовать алгоритм Краскала, а также соответствующие методы оптимизации с использованием принципов связанности, безальтернативности и интенсивности. Описаны подходы

к формированию связанного графа сети, а также его рёбер и вершин. В результате применения описанных алгоритмов строятся сегменты ЕОТС, образующие связанную транспортную сеть, включающую базовый транспортный каркас Единой сети, а также дополнительные участки сети, обеспечивающие пропуск транспортных потоков с наибольшим грузо- и пассажирооборотом, удовлетворяющие в совокупности ограничению на финансирование их содержания и ремонта.

Предложенная методология может использоваться в том числе при формировании инструментов транспортно-экономического баланса, а также при разработке специализированного программного обеспечения для моделирования транспортных потоков.

Таким образом, в статье представлено обоснование для научного сопровождения реализации государственной транспортной политики с целью повышения ее качества за счёт продвижения доказательного подхода.

Ключевые слова: транспортная политика, транспортная инфраструктура, анализ государственного управления, методы принятия решений.

Для цитирования: Карлов А. В., Евсеев О. В. О подходах к методологическому обоснованию формирования Единой опорной транспортной сети и приоритизации проектов развития транспортной инфраструктуры // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-2>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

## ВВЕДЕНИЕ

В 2021 году Правительство Российской Федерации утвердило новую редакцию Транспортной стратегии страны (далее – Стратегия) – на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года. Впервые в ключевом документе транспортной отрасли были заложены основы для системного подхода к управлению развитием отрасли – развитие транспортной системы страны должно осуществляться на базе определённых Стратегией приоритетов, правил и установок. Положения Стратегии являются обязательными при принятии решений как для федерального Правительства, так и региональных властей, а также для руководителей предприятий транспортной отрасли.

Стратегия является инструментом реализации транспортной политики, которая, в свою очередь, при её реализации на качественном уровне опирается на так называемый «доказательный подход». В научных исследованиях в области методологии государственного управления данный вопрос изучен достаточно подробно [1], рассматривают его в отношении отдельных отраслей экономики и российские учёные [2]. Следует отметить, что в Стратегии заложены предпосылки для использования именно такого подхода, а также научных методов при формировании государственной транспортной политики. Так, важнейшей новацией Стратегии стало введение, определение и детализация Единой опорной транспортной сети (далее – ЕОТС) – согласно Стратегии это «сбалансированная и связанная транспортная сеть, объединяющая в себе важнейшие объекты транспортной инфраструктуры для всех видов транспорта и обеспечивающая функциональное единство транспортной системы, устойчивую взаимосвязь и пространственное развитие крупнейших населённых пунктов, экономических центров, основных минерально-сырьевых и производственных зон, геостратегических территорий, объектов культурного наследия Российской Федерации, наиболее востребованных объектов туризма и рекреационных районов».

В Стратегии приведены базовые критерии для каждой из опорных сетей по видам транспорта, при этом отдельно обозначено, что развитие ЕОТС осуществляется с использованием инструментов транспортно-экономического баланса: «Актуализация и корректировка генеральной схемы развития Единой опорной сети осуществляются на основе

транспортно-экономического баланса – комплекса экономико-математических и транспортных моделей, характеризующих зависимость спроса на перевозки и его распределение по видам транспорта от экономических факторов и параметров развития инфраструктуры».

Таким образом, в Стратегии заложены основы для применения «доказательного подхода» в государственной политике. Аналогичные подходы внедряются и в других отраслях экономики, что также отмечают и российские учёные. Кроме того, в Стратегии сформированы базовые параметры транспортной политики в области приоритизации расходования средств бюджетов всех уровней на модернизацию, содержание и развитие определённой транспортной инфраструктуры. Такого рода приоритизация является основой для дальнейшей проработки экономического обоснования механизмов принятия решений в транспортной отрасли и повышения эффективности экономики страны, в том числе с учётом необходимости повышения качества инвестиционных решений [3].

Текущая геополитическая обстановка и экономическая конъюнктура требуют трансформации условий работы транспортной отрасли, повышения эффективности и системности государственной транспортной политики.

Уровень развития транспортной системы напрямую связан с потенциалом развития экономики, что не раз отмечалось в научных исследованиях, проведённых с применением различных эмпирических подходов и иных методов оценки [4–6].

Существующая система управления развитием транспортной отрасли не в полной мере обеспечивает достаточную взаимосвязь задач развития различных видов транспорта и преимущественное достижение сквозной цели по обеспечению связанности и оптимизации всех видов транспортной инфраструктуры, что необходимо для оптимального распределения грузо- и пассажиропотоков с учётом текущих вызовов и задач развития Российской Федерации.

Представляется, что востребована разработка обоснования развития ЕОТС, объединяющей в себе важнейшие объекты транспортной инфраструктуры для всех видов транспорта и обеспечивающей функциональное единство транспортной системы за счёт инструмента транспортно-экономического





Рис. 1. Система приоритизации проектов развития в транспортной отрасли на базе концепции Единой опорной транспортной сети [схема авторов].

баланса, предусматривающего оптимальное планирование соответствующих инфраструктурных проектов.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Несмотря на то, что Стратегия достаточно подробно описывает критерии отбора объектов и участков инфраструктуры в составы опорных сетей по видам транспорта, отбор потребует дальнейшей детализации, уточнения критериев и формализации самой процедуры отбора для построения связного графа ЕОТС.

Одновременно необходимо установить процедуры принятия решения – какие именно проекты следует отбирать для целей развития ЕОТС. Процедуры отбора могут базироваться на инструментах поддержки принятия решений – системах ранжирования и отбора проектов на базе методов «затраты-выгоды» и мультикритериального отбора [7].

Таким образом, в рамках данного исследования и для целей настоящей статьи предлагается рассматривать двухступенчатую систему принятия решений о параметрах развития транспортной инфраструктуры в долгосрочных программах развития отрасли:

1. Сужение альтернатив в процедуре отбора: приоритизация и отбор критически важной и перспективной инфраструктуры – её формализация в реестр (перечни) инфраструктуры ЕОТС.

2. Отбор мероприятий по развитию инфраструктуры ЕОТС по их значимости в условиях ограниченного финансирования на базе процедур мультикритериального анализа и методов «затраты-выгоды».

Схематически процедура отбора изображена на рис. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### 1. Методологический подход к формированию графа ЕОТС

Для целей отбора объектов ЕОТС предложим следующий методологический подход, уточняющий механизмы Стратегии.

ЕОТС разделяется на сегменты с учётом максимизации обслуживаемых транспортных потоков в пределах ограничений на содержание и ремонт объектов транспортной инфраструктуры.

Сегменты формируются в порядке увеличения объёма транспортных потоков, проходящих через сеть, в пределах лимита финансирования ее содержания и ремонта.

Для определения границ ЕОТС предлагается алгоритм сегментации сети.

1) Сегмент 1 – базовый транспортный каркас ЕОТС – минимальное связанное дерево транспортной сети, покрывающее все ключевые транспортные зоны и обеспечивающее их связанность друг с другом. Объекты базового транспортного каркаса должны обеспечи-

ваться содержанием и ремонтом в обязательном порядке.

2) Сегмент 2 и последующие сегменты образованы объектами транспортной инфраструктуры, присоединяемыми к транспортному каркасу и обеспечивающими сокращение расстояний и времени перевозок (повышение связности сети).

Присоединение осуществляется последовательно по уровням, исходя из максимизации транспортных потоков, обслуживаемых добавляемыми объектами, и удовлетворения заданного ограничения на ресурсы содержания и ремонта этих объектов. Транспортный каркас ЕОТС с добавленными к нему объектами образует сеть общего вида, называемую сегментом следующего уровня. Границы сегмента определяются заданным бюджетным ограничением ресурсов на содержание и ремонт объектов, включённых в сегмент.

3) Увеличение бюджетного ограничения на содержание объектов ЕОТС даёт возможность построить сегменты последующих уровней, каждый из которых будет включать предыдущий сегмент и новые добавляемые к нему объекты транспортной инфраструктуры. Таким образом сегменты разных уровней вложены друг в друга. С переходом от уровня к уровню сегменты постепенно захватывают все новые и новые объекты транспортной инфраструктуры ЕОТС.

Сегментом ЕОТС будем называть связный подграф графа ЕОТС, покрывающий все ключевые транспортные зоны рассматриваемой территории. Цель разбиения графа ЕОТС на сегменты состоит в том, чтобы определить, какое подмножество объектов ЕОТС следует в первую очередь обеспечить финансированием на создание, содержание и эксплуатацию на протяжении жизненного цикла, какое подмножество объектов – во вторую очередь и так далее по приоритетам. При этом каждое подмножество должно определять подграф ЕОТС, обладающий свойством связности. Иначе не будет выполняться основная функция Единой опорной сети, то есть обеспечение перевозок между всеми транспортными зонами, определёнными для заданного исследования.

Исходный перечень транспортных зон:

- столицы субъектов Российской Федерации;
- города с численностью населения от 100 тыс. чел;

- аэропорты и запасные аэродромы, необходимые для безопасной работы аэропортов;
- железнодорожные станции;
- морские и речные порты;
- пункты пропуска через государственную границу;
- столицы соседних государств, имеющие транспортные связи с Российской Федерацией;
- зоны освоения природных ресурсов;
- производственные кластеры, центры экономического роста;
- крупные объекты туристической привлекательности;
- населённые пункты, не имеющие круглогодичного сухопутного сообщения, кроме внутренних водных путей;
- эксклавные территории и отдельные территории геостратегического значения;
- мультимодальные транспортно-логистические центры, обладающие достаточной целевой перерабатывающей способностью (например, не менее 200 тыс. контейнеров в 20-футовом эквиваленте в год), интегрированные в сеть линейной инфраструктуры ЕОТС, транспортно-логистические центры, создаваемые в формате «грузовых деревень».

В множестве данных транспортных зон выделяются *ключевые транспортные зоны*, для которых будет найдена покрывающая их связная единая транспортная сеть.

Таким образом, сегменты – это связные подграфы графа ЕОТС, покрывающие все ключевые транспортные зоны. Связность графа определяется наличием пути по данному графу между любыми парами его вершин. Поэтому для решения задачи необходимо определить ключевые транспортные зоны (узлы графа ЕОТС), на которые будет опираться ЕОТС и обеспечивать их связность, а затем найти ребра графа ЕОТС, по которым можно «проехать» из любой вершины в любую другую, то есть рёбра, обеспечивающие связность графа. Подходы к такой задаче рассматривались рядом авторов [8], однако преимущественно касались сетей, состоящих из инфраструктуры одного вида транспорта.

В первую очередь целесообразно определить исходное подмножество объектов ЕОТС – первый базовый сегмент, обеспечиваемый финансированием на содержание и ремонт, образующий связный подграф ЕОТС и позволяющий пропустить наибольший объем транспортных потоков. Алгоритм построения первого сегмента ЕОТС может работать следую-





шим образом. В сегмент последовательно включаются объекты ЕОТС, обеспечивающие пропуск максимального потока, до тех пор, пока получаемая сеть не станет связной, то есть не покроет все ключевые транспортные зоны, и между любыми зонами будет существовать путь по объектам данного сегмента ЕОТС. Для решения данной задачи можно использовать алгоритм Краскала (алгоритм поиска минимального покрывающего дерева в графе), известный из теории графов. Данный подход в отечественной литературе в отношении транспортной отрасли практически не используется, за исключением отдельных работ в отношении агломераций [9].

Полученный граф будет иметь вид дерева (в терминологии теории графов) – графа без циклов, покрывающего все вершины графа. Этот граф содержит минимальное количество рёбер, позволяющих «проехать» из любой вершины в любую другую. Таким образом, первый базовый сегмент ЕОТС – это минимальный подграф ЕОТС, который обеспечивает связность всех транспортных зон рассматриваемой территории, и при этом пропуск наибольшего транспортного потока. Граф первого базового сегмента ЕОТС можно назвать остовом ЕОТС или транспортным каркасом ЕОТС. Пути по покрывающему дереву (транспортному каркасу ЕОТС) могут быть слишком длинными между некоторыми транспортными зонами. Поэтому, если имеются дополнительные резервы ресурсов на содержание и ремонт, целесообразно дополнить транспортный каркас ЕОТС объектами ЕОТС, обеспечив их финансированием, чтобы сократить пути по транспортному каркасу ЕОТС и обеспечить возможность прокладывать маршруты между различными ветвями покрывающего дерева.

За счёт добавления рёбер (объектов) к транспортному каркасу ЕОТС покрывающее дерево превращается в сеть общего вида с возможностью использования более коротких путей между транспортными зонами. Такая сеть представляет собой второй сегмент ЕОТС.

Задача построения второго сегмента может быть сформулирована следующим образом. В сегмент 2 включаются все вершины и рёбра первого сегмента, а также объекты ЕОТС, не вошедшие в сегмент 1, обеспечивающие пропуск максимального суммарного потока так, чтобы их суммарное финансирование не превышало заданного бюджетного ограничения. (Необходимое примечание: поскольку покрывающее дерево

содержит все узлы графа, можно добавлять к нему любые ребра (объекты ЕОТС) и граф останется связным). При условии увеличения лимита финансирования можно построить следующий сегмент ЕОТС, который будет включать предыдущий сегмент и будет содержать больше рёбер (объектов) ЕОТС, что сделает граф транспортной сети ещё более связным, то есть содержащим большее количество допустимых маршрутов между вершинами (транспортными зонами). Так можно построить несколько сегментов, каждый из которых будет соответствовать выделению определённого дополнительного лимита финансирования мероприятий по содержанию и ремонту объектов транспортной инфраструктуры.

## 2. Предлагаемые алгоритмы

Объекты ЕОТС включаются в приоритетное подмножество объектов (сегмент ЕОТС) по принципу выполнения максимального объёма перевозок в год.

Алгоритм Краскала (модифицированный) для построения первого сегмента ЕОТС – минимального покрывающего дерева или транспортного каркаса ЕОТС – работает следующим образом.

Пусть в графе ЕОТС имеется  $N$  узлов (вершин). Алгоритм начинает работу с  $N$  деревьями, каждое из которых первоначально состоит из одной единственной вершины – определённого узла графа ЕОТС. Далее к деревьям последовательно присоединяются рёбра графа ЕОТС, соединяющие разные деревья. Рёбра, соединяющие вершины одного дерева, не рассматриваются, чтобы дерево не превратилось в сеть, поскольку соединение двух вершин одного дерева приводит к образованию цикла в полученном графе, который перестает быть деревом и превращается в сеть общего вида. При присоединении ребра, соединяющего два разных дерева, эти деревья сливаются и из них образуется одно новое дерево. При этом дерево с меньшим номером поглощает дерево с большим номером. На каждом шаге между деревьями отыскивается ребро с максимальным объёмом перевозок. Процесс продолжается, пока все деревья не сольются в одно единственное дерево, имеющее номер 1. Это дерево будет минимальным покрывающим деревом, обеспечивающим пропуск потоков с максимальным суммарным объёмом. В классическом алгоритме Краскала объём перевозок не учитывается.

## Модифицированный алгоритм

### Краскала построения базового сегмента $S_i$ (транспортного каркаса) ЕОТС

Данные:  $T_1, \dots, T_N$  – покрывающие деревья ЕОТС, первоначально состоящие каждое из одной вершины (узла) графа ЕОТС.

Начало:  $W = 0$  – начальное значение суммарного объёма перевозок формируемого сегмента  $S_i$ .

Цикл 1 построения сегмента  $S_i$  (бесконечный цикл с выходом по условию).

Найти ребро  $e_{ij}$  графа сети, соединяющее два дерева  $T_i, T_j$ , где  $i < j$ , имеющее максимальную оценку  $W(e_{ij})$  объёма перевозок.

Присоединить дерево  $T_j$  и ребро  $e_{ij}$  к дереву  $T_i$ , то есть положить  $T_i = T_i \cup e_{ij} \cup T_j$ . Положить  $W = W + W(e_{ij})$ .

Если дерево  $T_i$  поглотило все остальные деревья, т. е. осталось только одно дерево  $T_i$ , то выход из цикла 1.

Конец цикла 1.

Полученное покрывающее дерево  $T_i$  образует первый базовый сегмент (транспортный каркас) ЕОТС, т. е.  $S_i = T_i$ .

Конец алгоритма построения сегмента  $S_i$  ЕОТС.

В результате применения модифицированного алгоритма Краскала будет найден подграф ЕОТС в виде покрывающего дерева для всех ключевых транспортных зон. Построенный подграф является связным и обеспечивает пропуск потоков, имеющих в совокупности максимальный объём. Этот подграф является транспортным каркасом ЕОТС. Построение транспортного каркаса ЕОТС отвечает критерию связности сети и критерию безальтернативности, поскольку безальтернативные пути (рёбра) графа транспортной сети, не имеющие альтернатив, автоматически будут включены алгоритмом Краскала в минимальное покрывающее дерево.

Следующие сегменты  $S_t$ , где  $t = \overline{2, q}$ , то есть сегменты следующих уровней, начиная со второго, строятся при наличии дополнительных лимитов финансирования  $C_t$  содержания и ремонта объектов ЕОТС.

### Алгоритм построения сегментов уровня 2 и последующих уровней

Цикл построения сегментов  $t = \overline{2, q}$  (начина со второго).

Построение сегмента с номером  $t$ :

Определить заданный лимит финансирования  $C_t$  для данного сегмента  $t$ .

Если лимита нет, то выход из цикла построения сегментов.

Если есть хотя бы один объект  $o$ , не включённый в построенные сегменты ЕОТС, имеющий стоимость содержания и ремонта меньше заданного лимита финансирования  $C_t$ , то выполнить построение сегмента  $t$  ЕОТС при помощи решения оптимизационной задачи максимизации суммарного объёма перевозок объектов  $o_j$  транспортной сети, включаемых в рассматриваемый сегмент, при заданном ограничении на лимит финансирования  $C_t$  содержания и ремонта его объектов.

Конец Цикла 1.

Конец построения сегментов.

Построение сегмента  $t$  ЕОТС осуществляется при помощи решения оптимизационной задачи, в которой критерий оптимизации выражает максимизацию суммарного объёма перевозок объектов  $o_j$  транспортной сети, включаемых в рассматриваемый сегмент ЕОТС:

$$\sum_j x_j \times W(o_j) \rightarrow \max,$$

$$\text{где } x_j = \begin{cases} 1, & \text{если объект } o_j \text{ включается} \\ & \text{в формируемый сегмент сети;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

$W(o_j)$  – объём перевозок для объекта  $o_j$ .

Ограничения задачи выражают отсутствие превышения заданного лимита финансирования содержания и ремонта объектов формируемого сегмента ЕОТС:

$$\sum_j x_j \times C(o_j) \leq C_t,$$

где  $C(o_j)$  – объём финансирования  $C_t$  содержания и ремонта объекта  $o_j$ ;

$C_t$  – лимит финансирования содержания и ремонта объектов, включаемых в сегмент  $t$  ЕОТС.

Данная оптимизационная задача имеет вид задачи линейного программирования «о рюкзаке», точнее «0–1 задачи о рюкзаке» и решается стандартным методом (динамическое программирование). В случае большой размерности для решения может использоваться приближённый (так называемый «жадный») алгоритм или иные схожие алгоритмы (в зависимости от решаемых задач) [10].

### Приближённый алгоритм построения сегмента $t$ ЕОТС

Положить  $OC_t = C_t$ , то есть остаток лимита финансирования  $OC_t$  вначале равен заданному лимиту  $C_t$ .



Цикл построения сегмента (бесконечный цикл с выходом по условию).

Среди объектов ЕОТС всех видов транспорта найти объект  $o$  с максимальным объемом перевозок  $W(o)$ , укладываемый в заданный лимит финансирования, то есть такой, что  $OC_i - C(o) \geq 0$ .

Найденный объект включить в формируемый сегмент  $S_i = S_i \cup o$ . Положить  $W = W + W(o)$ .  $OC_i = OC_i - C(o)$ .

Если объект с указанными выше свойствами не найден или все рёбра графа ЕОТС включены в сегмент, то закончить построение сегмента ЕОТС, то есть выполнить выход из цикла построения сегмента.

#### Конец цикла построения сегмента.

В результате применения описанных алгоритмов будут построены сегменты ЕОТС, образующие связную транспортную сеть, включающую базовый транспортный каркас ЕОТС, а также дополнительные участки сети, обеспечивающие пропуск транспортных потоков с наибольшим объемом перевозок, удовлетворяющие в совокупности заданному ограничению на финансирование их содержания и ремонта.

Отметим, что в описанных выше алгоритмах формирования сегментов ЕОТС можно учитывать объем приведенной транспортной работы, выполняемой объектами транспортной сети. В этом случае для объектов транспортной сети рассматривается так называемая общая интенсивность грузовых и пассажирских перевозок или приведенная грузонапряженность, рассчитываемая как приведенный грузо- и пассажирооборот (транспортная работа) на километр пути. Здесь приведенный грузооборот рассчитывается по формуле  $P = P_{гр} + k \cdot P_{пасс}$ , где  $P_{гр}$  – грузооборот;  $P_{пасс}$  – пассажирооборот;  $k$  – коэффициент приведения пассажирооборота к грузообороту (например, для железных дорог принимается равным 1). Данный вариант расчетов позволяет детально учесть объёмы перевозок, включая перевозки, которые используют ресурсы рассматриваемых участков транспортной сети не полностью, а только частично на определённой их протяженности. Однако это требует использования дополнительных исходных данных и усложняет расчёты.

При формировании второго и последующих сегментов ЕОТС можно в качестве дополнительной опции использовать критерий связности сети, учитывающий требования

о наличии прямых транспортных связей по инфраструктуре ЕОТС между определёнными приоритетными транспортными зонами или узлами сети, например, связей города Москвы со столицами соседних государств, столиц субъектов Российской Федерации с городами с численностью населения более 100 тыс. человек и пр. При этом необходимо отметить, что подобные транспортные связи с высокой вероятностью будут включены в ЕОТС описанными выше алгоритмами. Это связано с тем, что особенностью транспортной сети Российской Федерации является отсутствие большого количества альтернативных маршрутов сопоставимого качества между её основными узлами, и наиболее эффективные маршруты между ними являются наиболее востребованными при перевозках грузов и пассажиров, то есть будут отобраны в сегменты ЕОТС описанными выше алгоритмами. Тем не менее при формировании ЕОТС, если дополнительные требования о наличии прямых транспортных связей по ЕОТС между ключевыми узлами сети имеются, то выполнение этих требований целесообразно проверить при помощи алгоритма, приведённого ниже.

Алгоритм включения прямых транспортных связей в ЕОТС или проверки их наличия аналогичен вышеописанному. Для каждой пары заданных узлов  $A, B$  находится кратчайший путь между ними. В качестве длины пути целесообразно использовать оценку стоимости осуществления перевозки между узлами  $A$  и  $B$ , то есть рассматривать наиболее экономичный путь между узлами. Для найденного пути подсчитывается суммарная оценка стоимости  $C(A, B)$  содержания и ремонта его участков, не вошедших в ранее сформированные сегменты ЕОТС. Если все участки найденного пути уже имеются в ЕОТС, то наличие прямой транспортной связи между узлами  $A$  и  $B$  считается подтверждённым. Среди рассмотренных узлов, прямые связи между которыми по ЕОТС не подтверждены, находится пара  $A_i, B_j$  с минимальной оценкой  $C(A_i, B_j)$ , и если суммарная стоимость содержания и ремонта объектов сформированного текущего сегмента ЕОТС в сумме с величиной  $C(A_i, B_j)$  не превосходит лимита финансирования объектов данного сегмента, то рёбра рассматриваемого пути, не вошедшие в уже построенные сегменты ЕОТС, включаются в формируемый сегмент. Эти действия повторяются для оставшихся

пар узлов, пока не будет достигнут лимит суммарного финансирования содержания и ремонта объектов, отбираемых в формируемый сегмент. Для визуализации сети могут применяться различные подходы, данный вопрос рассматривался и в трудах российских учёных [11].

В результате в ЕОТС будут дополнительно включены объекты, через которые проходят наиболее дешёвые прямые транспортные связи между заданными узлами сети, либо будет подтверждено, что такие транспортные связи уже имеются в ЕОТС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате применения описанных алгоритмов будет сформирована совокупность объектов (узлов и рёбер) ЕОТС, удовлетворяющая заданным критериям.

- Критерии связности графа сети удовлетворяются за счет применения разработанного модифицированного алгоритма Краскала, обеспечивающего нахождение графа ЕОТС, связывающего все транспортные зоны.

- Критерий количественного отбора учитывается в модифицированном алгоритме Краскала посредством нахождения рёбер базового покрывающего графа (каркаса) ЕОТС с максимальным объёмом перевозок, а затем посредством присоединения к базовому каркасу дополнительных рёбер следующего сегмента сети, также с максимальным объёмом перевозок.

Формирование ЕОТС при помощи разработанных алгоритмов удовлетворяет ограничению на финансирование мероприятий содержания и ремонта объектов инфраструктуры, включаемых в ЕОТС.

В дальнейшем разработка связанного графа сети ЕОТС может использоваться при формировании транспортно-экономического баланса на базе методов, разработанных российскими исследователями [12; 13].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Newman, J. Increasing the ability of government agencies to undertake evidence-informed policymaking.

Evidence Base, 2020, Iss. 2, pp. 1–9. DOI: 10.21307/eb-2020-005.

2. Капогузов Е. А., Чупин Р. И. Возможности использования доказательного подхода для анализа промышленной политики // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. – 2022. – Т. 7. – № 3 (25). – С. 323–330. EDN: UCIUOA.

3. Бычкова А. А. Инвестиции в транспортную инфраструктуру России // Вестник университета. – 2022. – № 2. – С. 151–159. EDN: AUTTNE.

4. Melo, P. C. Transport Infrastructure Effects on Economic Output: The Microeconomic Approach. In: International Encyclopedia of Transportation, Elsevier, 2021, Vol. 1, pp. 347–354. Ed.-in-chief Roger Vickerman. ISBN 978-0-08102-672-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10065-X>.

5. Popova, Y. Relations between Wellbeing and Transport Infrastructure of the Country. Procedia Engineering, 2017, Iss. 178, pp. 579–588. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.112.

6. Бердников С. В., Патракеева О. Ю. Транспортная инфраструктура и экономический рост: проблема оценки эффектов // Системное моделирование социально-экономических процессов: труды 42-й Международной научной школы-семинара, Ростов-на-Дону, 01–06 октября 2019 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. – С. 46–51. EDN: BGRKMO.

7. Rosik, P., Wójcik, J. Transport Infrastructure and Regional Development: A Survey of Literature on Wider Economic and Spatial Impacts. Sustainability, 2023, Vol. 15, Iss. 1, 548. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010548>.

8. Крыгин А. А., Куприянов Б. В. Определение критических узлов транспортной сети // Управление большими системами. – 2022. – № 100. – С. 194–215. [Электронный ресурс]: <http://www.ubs.mtas.ru/upload/library/UBS10009.pdf>. Доступ 26.12.2023.

9. Макаров И. Н. Эффективность функционирования и развития транспортной системы крупного города и городской агломерации: критерии оптимизации, необходимость мультимодального взаимодействия // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 1. – С. 209–217. EDN: YMMWJK.

10. Козлова М. Г., Лукьяненко В. А., Макаров О. О., Руденко Л. И. Специфика построения многоагентных маршрутов в иерархических сетях // Таврический вестник информатики и математики. – 2022. – № 2 (55). – С. 7–29. EDN: PICXDW.

11. Гюллинг А. О., Воронцова Н. В. Визуализация на графах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 128–137. EDN: MLCYDT.

12. Евсеев О. В., Мурашов В. В., Забоев А. И. [и др.]. Транспортно-экономический баланс и его роль в координации транспортного планирования в условиях цифровой трансформации // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14. – № 3. – С. 717–726. EDN: YYNQUN.

13. Ефимова О. В., Бабошин Е. Б. Трансформация методологии формирования транспортно-экономического баланса // Экономика железных дорог. – 2022. – № 6. – С. 29–38. [Платный доступ]. EDN: NEOWRB. ●

### Информация об авторах:

**Карлов Артур Владимирович** – младший научный сотрудник Центра стратегических программ Российского университета транспорта, Москва, Россия, [karlov@edu.rut-miit.ru](mailto:karlov@edu.rut-miit.ru).

**Евсеев Олег Владимирович** – доктор технических наук, доцент, научный руководитель Научного центра по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации (ФГБУ «НЦКТП Минтранса России»), Москва, Россия, [evseev@mintrans.org](mailto:evseev@mintrans.org).

Статья поступила в редакцию 30.11.2023, одобрена после рецензирования 26.12.2023, принята к публикации 29.12.2023.

