

УДК 656.07+06

## Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков

О. Н. Числов<sup>1,2</sup>, В. А. Богачев<sup>1</sup>, В. В. Трапенов<sup>1</sup>, Т. В. Богачев<sup>3</sup>, В. М. Задорожний<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

<sup>2</sup>Университет «Сириус», пгт «Сириус», Российская Федерация, 354340, Сочи, Олимпийский пр., 1

<sup>3</sup>Ростовский государственный экономический университет, Российская Федерация, 344002, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 69

**Для цитирования:** Числов О. Н., Богачев В. А., Трапенов В. В., Богачев Т. В., Задорожний В. М. Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 800–811. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811

### Аннотация

**Цель:** Сформулировать предложения по конфигурированию терминально-складской инфраструктуре по размещению складских мощностей в транспортном узле. **Методы:** На основе анализа публикаций в направлении данных исследований применена оптимизационная геометрическая евклидова модель процесса грузоперевозок, осуществляемых на территории транспортного узла, для нахождения оптимального распределения грузопотоков путем разбиения его на части, представляющие собой «области влияния».

**Результаты:** В статье разработан на методах классического интегрального исчисления алгоритм оптимизации процесса грузоперевозок, который позволяет находить среди множества возможных местоположений распределительного центра те, которые с учетом комплекса ограничений позволят определить «область влияния» распределительного центра с наибольшей площадью, в отличие от первоначальной.

**Практическая значимость:** Получен экономический эффект от снижения базовой ставки за арендную плату из-за возможного изменения местоположения логистического грузового распределительного центра за пределы территории уплотненной городской застройки, где базовая ставка арендной платы больше.

**Ключевые слова:** Складская логистика, транспортный узел, логистический грузовой распределительный центр, экономико-географический метод, грузопотоки, торговая сеть, олигополистический рынок, дуополия, алгебраические кривые высшего порядка.

### Введение

По итогам 2021 г. на российском логистическом складском рынке значимый рост показали услуги, непосредственно связанные с автомо-

бильными грузоперевозками. По данным электронной биржи автомобильных перевозок АТІ. SU, общее число заявок на перевозки в России в 2021 г. выросло на 46 % по сравнению с 2020 г.

и на 59 % по сравнению с 2019 г. Также следует отметить, что 2021 г. подстегнул спрос на грузовые складские емкости. В настоящее время уровень вакантных складских площадей в крупных регионах находится на рекордно низком за многие годы уровне — менее 3 %. Рост сегмента складской логистики, по мнению экспертов и игроков рынка, может продолжиться до 2025 г. Традиционный ритейл, логисты, дистрибьюторы, операторы нуждаются в современных складах, грузовых хабах и распределительных центрах.

В России на сегодняшний день не существует формальных критериев для классификации складских сооружений. Ключевыми факторами для классификации складской недвижимости были и остаются оснащение помещений и месторасположение зданий (рис. 1).

Международная компания Kight Frank, проводя анализ обеспеченности качественными складскими площадями (объекты класса *A* и *B*) в регионах России, пришли к выводу, что, как говорилось выше, объемы спроса ежегодно увеличиваются, но рынок качественной складской недвижимости по-прежнему находится на стадии развития. Если же говорить о цифрах, то важным показателем насыщенности складской сети можно отметить, сколько приходится кв. м складских площадей класса *A* и *B* на одного жителя. Сравнивая этот показатель с другими лидирующими странами в данном сегменте (рис. 2), можно сказать, что российский рынок еще далек от своего насыщения.

Показатель  $0,2 \text{ м}^2/\text{чел.}$  не относится ко всем регионам России одинаково. Основная концентрация складских площадей класса *A* и *B* приходится на Московскую и Ленинградскую области, порядка 67 %, здесь уже этот показатель составляет  $0,9 \text{ м}^2/\text{чел.}$  и  $0,6 \text{ м}^2/\text{чел.}$  В остальных регионах ситуация также неоднозначная, так как зависит от регионов. В этих регионах складская недвижимость обеспечивает не только крупные

городские агломерации, в которых они располагаются, но и соседние регионы, выступая в роли логистического грузового распределительного центра (ЛГРЦ).

Размещение на территории транспортного узла ЛГРЦ представляет собой многоцелевую и комплексную задачу, постановка и решение которой подразумевают обработку и анализ значительных массивов различной информации, а также проведение соответствующих расчетов. Исследованию указанных вопросов посвящен ряд работ [1–5].

Например, в [3] показано успешное применение многокритериального интеграла Шоке к реальной задаче выбора местоположения склада крупной турецкой логистической фирмы.

Размещение распределительного грузового центра для предприятия предложено решать эвристическим методом определения «центра тяжести» [4].

Учитывая качественные критерии при выборе местоположения склада, в [5] применяется метод анализа иерархий. Сущность метода состоит в разбиении проблемы на простые составные части и последующей обработке попарными сравнениями.

Стремление к сокращению расходов во всех звеньях транспортно-логистических цепей ставит задачу поиска таких местоположений ЛГРЦ, которые оказываются оптимальными в данных условиях и с учетом предъявляемых требований. Отметим, что к понятию оптимальности можно подходить с разных точек зрения. Однако подразумевается получение ответов, по крайней мере, на два взаимосвязанных вопроса:

1. Какое количество ЛГРЦ является целесообразным и где при этом они должны располагаться?
2. Какую потребительскую территорию (с организационной и экономической точек зрения) целесообразнее обслуживать каждому из рассматриваемых ЛГРЦ?

|   | Склады класса "А"   | Склады класса "В"   | Склады класса "С"  | Склады класса "D"   |
|---|---|---|--|---|
| <b>Основные характеристики</b><br>Характеристика здания | новые одностоящие складские здания прямоугольной формы из легких металлоконструкций без колонн, или с колоннами с шагом 6-10 м.   | одно или двухэтажные складские здания, новое строительство или реконструированные   | ангары, производственные помещения, новые или реконструированные                   | неотапливаемые производственные помещения и ангары, подвальные помещения                  |
| <b>Характеристика помещений</b>                         | ровный бетонный пол с антипылевым покрытием, с нагрузкой - 5 тн на кв.м. Высота потолков не менее 12 метров   | Высота потолков от 6 метров, пол - асфальт или бетон без покрытия   | высота потолков от 4 метров, пол - асфальт или бетонная плитка, бетон без покрытия | высота потолков - не регламентируется, пол - ограниченно пригоден для движения транспорта |
| <b>Расположение объекта</b>                             | расположены вблизи центральных магистралей, желательно наличие железнодорожной ветки  | удобные подъездные пути, близость магистралей, желательно ж/д ветка   | транспортная доступность для большегрузных автомобилей                             | наличие дороги для автотранспорта   |
| <b>Техническое оснащение</b>                            | система вентиляции, регулируемый температурный режим, система пожарной сигнализации и автоматическая система пожаротушения, система охранной сигнализации и видеонаблюдения, опτικο-волоконные телекоммуникации, система доступа. | не менее одного грузового лифта на каждые 2000 кв.м., система отопления, пожаротушения, охранной сигнализации и система видеонаблюдения, телекоммуникации | наличие грузовых лифтов, системы отопления, телекоммуникации                       | необязательное наличие механизмов для погрузки-разгрузки и транспортировки грузов         |
| <b>Транспортная инфраструктура</b>                      | площадки для большегрузных автомобилей, площадки для маневрирования большегрузных автомобилей   | площадки для отстоя и маневрирования большегрузных автомобилей, пандус для разгрузки автотранспорта   | место для маневрирования и загрузки-выгрузки автотранспорта                        | нет   |
| <b>Дополнительные условия</b>                           | офисные и вспомогательные помещения, туалеты, душевые, подсобные помещения, раздевалки  | вспомогательные помещения для персонала   | вспомогательные помещения для персонала  | наличие вспомогательных помещений на территории   |

Рис. 1. Классификация складов по классам

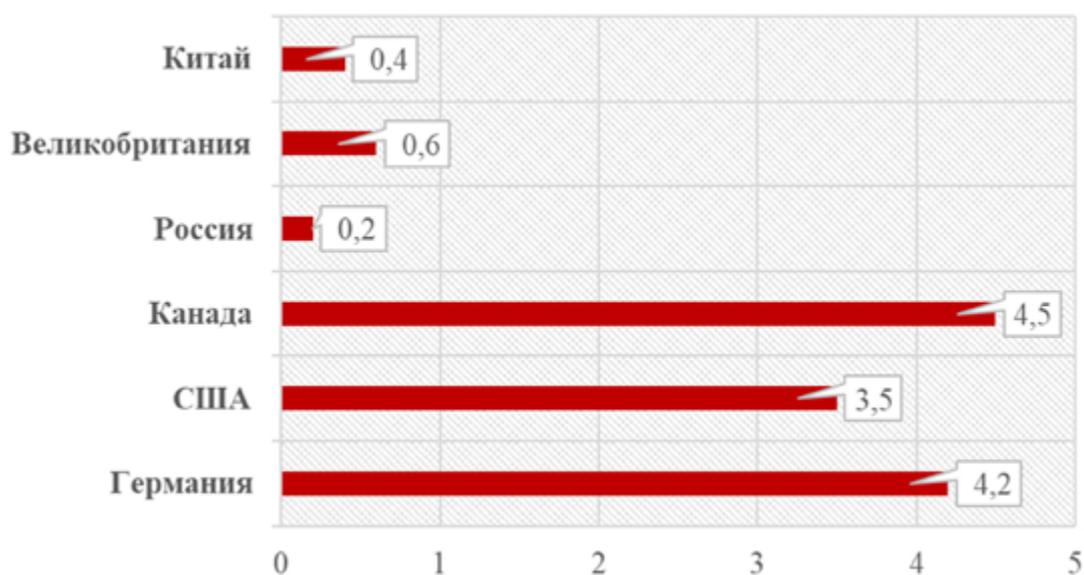


Рис. 2. Мировая обеспеченность складской недвижимостью, м<sup>2</sup>/чел.

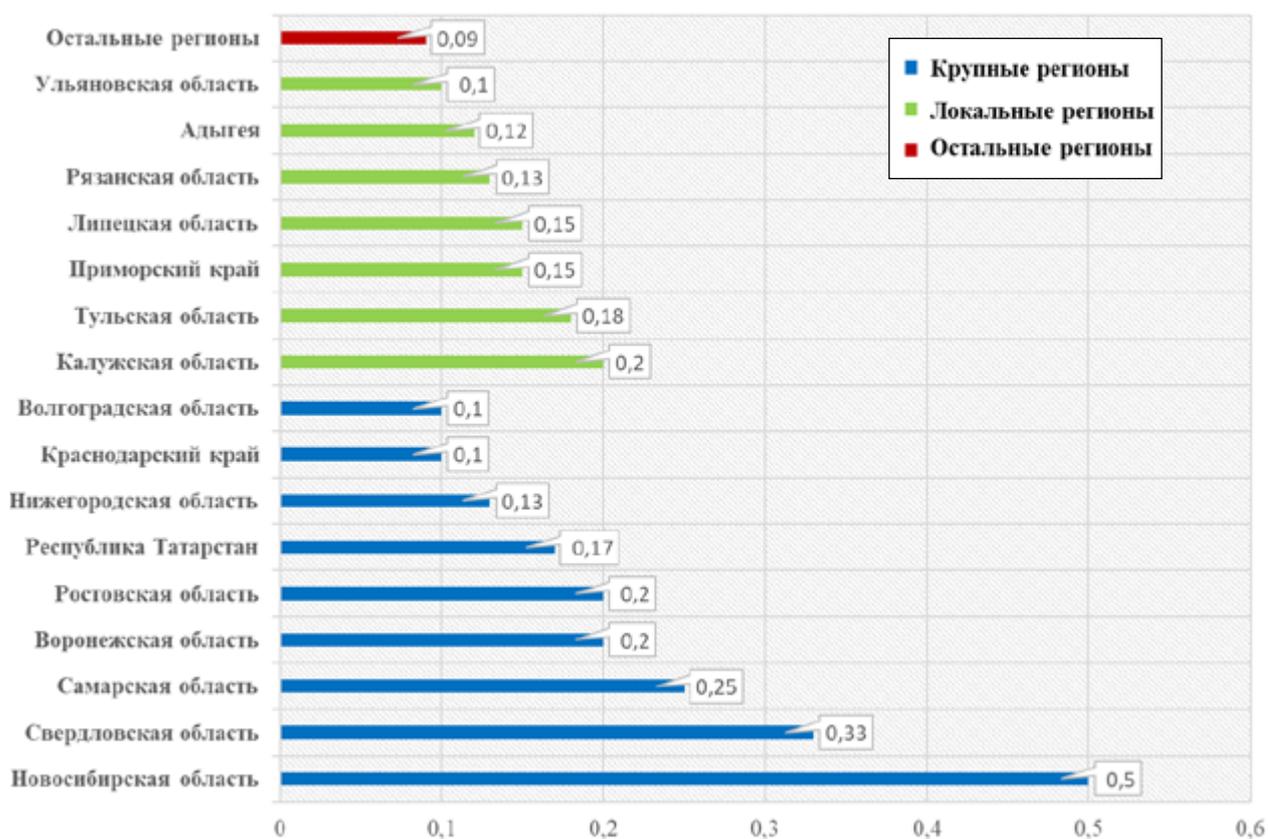


Рис. 3. Региональная обеспеченность складской недвижимостью, м<sup>2</sup>/чел.

Для решения указанной задачи используются аналитические и оптимизационные методы (вторые, как правило, основаны на задаче линейного программирования), а также методы имитационного моделирования. Чаще всего, исходя из сочетаний таких параметров, как расстояние транспортировки и вес грузовых отправок, путем расчетов находят «центры тяжести» географического местоположения существующих ЛГРЦ, а также возможных новых. Однако реальные условия эксплуатации зачастую требуют последующей корректировки полученных результатов.

Очевидный и простой способ повышения качества обслуживания клиентов состоит в том, чтобы переместить географический «складской центр тяжести» какого-либо из распределительных центров как можно ближе к тем областям, на которых в большей степени сконцентрированы потребители рассматриваемых транспортно-логистических услуг. При оптимизационном моделировании местоположений ЛГРЦ обычно учитываются как расстояния между этими центрами и крупнейшими кластерами (зонами) клиентов, так и местоположения источников входящих грузопотоков (то есть предприятий-производителей, грузовых железнодорожных станций и автомобильных хабов и т. п.), которыми обеспечивается функционирование предыдущих звеньев логистической цепи. В большинстве случаев снабжение грузами осуществляется не от одного производственного предприятия или центрального склада и ЛГРЦ имеют весьма обширную географическую базу поставщиков.

Если сформулировать коротко, то целью настоящих исследований является разработка метода нахождения на территории транспортного узла таких местоположений ЛГРЦ, которые являются оптимальными в рамках имеющихся ограничений. При этом могут варьироваться подходы, используемые для выявления зон охвата потребителей распределительными центрами (и коли-

чество этих центров), части территории транспортного узла, на которых могут находиться эти центры, а также природа ограничений, накладываемых на расположение центров, и иерархии в этих ограничениях.

### Теоретические основы метода

Рассмотрим далее применение и отличие авторского метода экономико-географического разграничения «областей влияния» транспортных объектов от рассмотренных в работах [2–4]. Важным является то, что в рассматриваемых исследованиях построение оптимизационной геометрической евклидовой модели позволяет находить наилучшие варианты распределения грузопотоков путем разбиения их на части согласно размерам областей обслуживания. Также следует отметить, что впервые в транспортно-логистических исследованиях применены и изучены алгебраические кривые высших порядков в разграничении областей влияния, что позволяет наиболее точно учитывать область территории, обслуживаемой железнодорожной станцией (терминалом, портом и т. п.).

Геометрическая идея подхода в транспортно-логистических исследованиях, содержащаяся в работе [6], получила существенное развитие в статьях [7–10]. Метод экономико-географического разграничения «областей влияния» ЛГРЦ позволяет строить *геометрическую евклидову модель (ГЕМ)* территориального олигополистического рынка грузовых перевозок в рассматриваемом регионе. В этой модели реальная ситуация «идеализируется» в том смысле, что все транспортные маршруты подразумеваются прямолинейными, и поэтому их длинами являются евклидовы расстояния между началами и концами транспортировки груза. Как и в предыдущих исследованиях, в настоящей работе предполагается, что зависимость стоимости  $c$  перевозки грузов от длины  $l$  маршрута является линейной. Приведем краткое

описание основ ГЕМ в случае дуополии складского рынка.

На плоской географической карте рассматриваемого региона введем декартову систему координат. Если расстояние между 1-м и 2-м дуополистами (то есть станциями погрузки или же, как в настоящей работе, распределительными центрами) равно  $L$  (км), то будем предполагать, что они находятся соответственно в точках  $O(0, 0)$  и  $A(L, 0)$ . Это предположение является условным и вводится для того, чтобы при построении математической модели можно было воспользоваться методом аналитической геометрии. Разграничение «областей влияния» указанных дуополистов будет осуществляться в соответствии со стоимостью перевозки грузов от их местоположения до пунктов назначения. Эти пункты могут находиться, вообще говоря, в любых точках рассматриваемой плоской карты. Пусть  $p_i$  — стоимость начально-конечных операций, а  $q_i$  — стоимость движенческих операций на 1 км пути, приходящихся на одну транспортную единицу для  $i$ -го дуополиста ( $i = 1, 2$ ). Линия, разграничивающая «области влияния» дуополистов, записывается неявным уравнением вида:

$$p_1 + q_1 \sqrt{x^2 + y^2} = p_2 + q_2 \sqrt{(x - L)^2 + y^2}. \quad (1)$$

Отметим, что равенством (1) записывается целый набор алгебраических линий 2-го и 4-го порядков. При этом существенное значение имеют соотношения между параметрами  $L, p_i$  и  $q_i$  ( $i = 1, 2$ ). Приведем несколько пояснений как геометрического, так и логистического характера в отношении некоторых из этих линий.

В простейших случаях, когда  $p_1 = p_2$  и  $q_1 \neq q_2$ , уравнением (1) задаются окружности. Если же  $q_1 = q_2$  и  $p_1 \neq p_2$ , то в зависимости от величины  $L$  линия может оказаться ветвью гиперболы, прямолинейным лучом или пустым множеством. Таким образом, в указанных здесь нетривиальных

случаях получаются алгебраические линии 2-го порядка. Линии, имеющие гораздо более сложную аналитическую и геометрическую природу, получаются, когда у рассматриваемых дуополистов отличаются как стоимости начально-конечных операций, так и стоимости движенческих операций. Например, если  $p_1 > p_2$  и  $q_1 < q_2$ , то задаваемая уравнением (1) алгебраическая линия может иметь 4-й порядок, точнее, представлять собой улитку Паскаля [8–10].

В отношении «неравноправия» в «областях влияния» рассматриваемых дуополистов обратим внимание на то, что (как и окружность) улитка Паскаля, в отличие, например, от гиперболы, является ограниченной линией на плоскости. Поэтому в случаях, когда  $p_1 > p_2$  и  $q_1 < q_2$ , ограничиваемая этой линией «область влияния» 2-го дуополиста является ограниченным множеством на плоскости [7, 8]. Таким образом, несмотря то, что стоимость начально-конечных операций у 1-го дуополиста может быть существенно больше, чем у 2-го дуополиста, 1-й оказывается более конкурентоспособным в грузоперевозках во все достаточно удаленные пункты назначения.

Отметим теперь, что если в уравнении (1) предположить  $p_1 = p_2$  и  $q_1 = q_2$ , то получится (как и следовало ожидать), что «области влияния» дуополистов разграничены прямой линией

$$x = \frac{L}{2}.$$

### Предварительный этап построения математической модели

С общей экономической точки зрения изучаемая в настоящей работе ситуация в отношении ЛГРЦ представляет собой олигополию. Выступающие в качестве олигополистов распределительные центры конкурируют между собой на рынке предоставляемых в регионе транспортно-логистических услуг. Экономико-географический метод разграничения «областей влияния» распределительных центров позволяет выявить

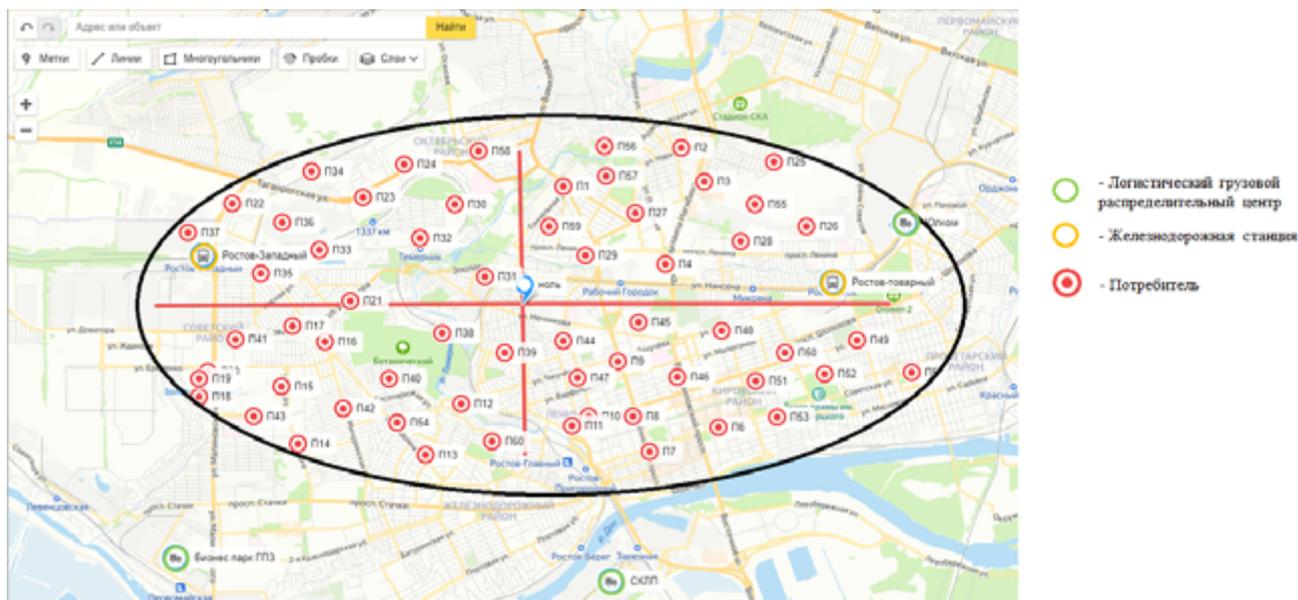


Рис. 4. Схематическое изображение части транспортно-складской инфраструктуры транспортного узла «Р»

зоны обслуживания, которые расположены в рассматриваемом регионе и в соответствии со стоимостью грузоперевозок могут быть отнесены к какому-либо из олигополистов.

Объектом применения, разработанного в статье модифицированного метода экономико-географического разграничения «областей влияния», является логистическая складская инфраструктура транспортного узла «Р». Исходим из того, что на основной части территории города (см. рис. 4) располагается равномерно распределенный массив потребителей услуг, предоставляемых уже имеющимися ЛГРЦ, а также распределительными центрами, получаемыми перемещением каких-либо из этих центров или центрами, введенными дополнительно. При построении математической модели соответствующего транспортно-логистического процесса границу указанного массива (то есть основной, наиболее уплотненно застроенной части городской территории) представим в виде некоторого эллипса. Такая геометрическая интерпретация объясняется тем, что, как и транспортный узел «Р», указанная территория вытянута вдоль реки (рис. 4).

В настоящей работе будем предполагать, что относящееся к железнодорожным перевозкам звено логистической цепи представлено двумя грузовыми станциями «Т» и «З». С этих станций тарно-штучные грузы доставляются автомобильным транспортом в три ЛГРЦ: «Г», «С» и «Ю». Далее в результате выполнения комплекса транспортно-складских и логистических услуг грузы из распределительных центров попадают в розничную торговую сеть. Напомним, что представляющие потребителей пункты розничной торговли равномерно распределены на территории, ограниченной указанным на рис. 4 эллипсом. Кроме двух грузовых железнодорожных станций, рассматриваемые ЛГРЦ могут получать продукцию в ассортименте от целого ряда производственных предприятий, а также некоторого центрального склада.

Предполагается также, что все внутриузловые грузоперевозки, начиная от железнодорожных станций, осуществляются автомобильным транспортом. Отметим, что разработанный в статье модифицированный экономико-географический метод разграничения «областей влияния» ЛГРЦ

является универсальным в отношении наземных видов транспорта и применим также и к мультимодальным грузоперевозкам.

Построение математической модели транспортно-логистического процесса методом экономико-географического разграничения предполагает выполнение некоторого предварительного анализа рассматриваемой ситуации. После обработки методом наименьших квадратов данных, предоставляемых электронной биржей автомобильных перевозок АТІ.SU, есть основания предполагать, что для каждого из ЛГРЦ стоимость  $c$  (тыс. руб.) перевозки одной транспортной единицы к потребителям линейным образом зависит от длины  $l$  (км) пройденного маршрута. То есть имеет место равенство:

$$c = p + ql, \quad (2)$$

в котором коэффициенты  $p$  и  $q$  представляют собой соответственно стоимость начально-конечных операций и стоимость движенических операций на 1 км пути, приходящихся на одну транспортную единицу. Для трех рассматриваемых ЛГРЦ и автомобилей грузоподъемностью до 5 т величина  $q$  оказалась одинаковой и равной 1 тыс. руб./км. Решение начнем с рассмотрения случая, когда величина  $p$  для всех центров также одинакова и равна 0 тыс. руб./км.

### **Оптимизация распределений грузопотоков модифицированным методом экономико-географического разграничения**

Перейдем непосредственно к построению *оптимизационной геометрической евклидовой модели (ОГЕМ)* процесса грузоперевозок, осуществляемых на территории рассматриваемого транспортного узла. Эта модель позволит найти оптимальные (в том смысле, как это определено ниже) распределения грузопотоков в данном регионе путем разбиения его на части, представля-

ющие собой «области влияния» ЛГРЦ, входящих в транспортный узел. Напомним, что из распределительных центров грузоперевозки выполняются напрямую в пункты розничной торговой сети.

В отношении транспортного узла «Р», который рассматриваем в качестве конкретного примера, обратим внимание на следующее обстоятельство. В настоящее время распределительный центр «Ю» находится на территории уплотненной городской застройки, граница которой при построении математической модели процесса грузоперевозок представлена эллипсом, изображенным на рис. 4. Поэтому для указанного центра размер арендной платы может быть значительно выше, чем для центров «Г» и «С», которые находятся вне эллипса. Указанные обстоятельства могут влиять (в частности, в зависимости от налоговой ситуации в данном регионе) на суммарную стоимость производимых на центре «Ю» начально-конечных операций. Учитывая сказанное, в рамках задачи конфигурирования терминально-складской инфраструктуры транспортного узла рассмотрим вопрос об изменении местоположения именно этого распределительного центра. Решение соответствующей оптимизационной задачи будет представлять собой нахождение такого (вообще говоря, отличного от первоначального) местоположения «Ю», при котором с учетом данного комплекса ограничений «область влияния» этого распределительного центра имеет наибольшую площадь. Таким образом, в качестве подлежащей максимизации целевой функции будем рассматривать площадь «области влияния» распределительного центра, который интересует нас в данной ситуации в первую очередь.

Разработанный в статье алгоритм оптимизации процесса грузоперевозок, основанный на методах классического интегрального исчисления, позволяет находить среди множества возможных местоположений распределительного

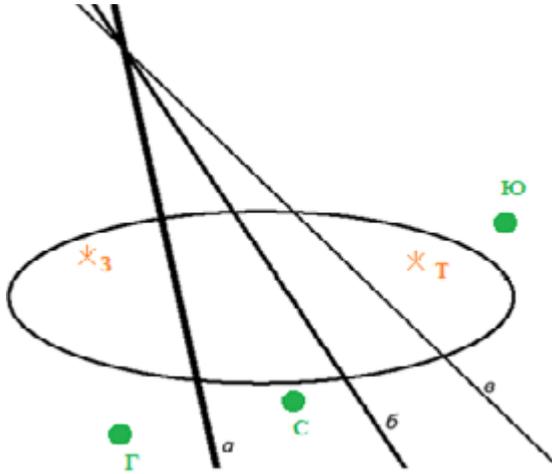


Рис. 5. Разбиение территории уплотненной городской застройки в результате первой итерации

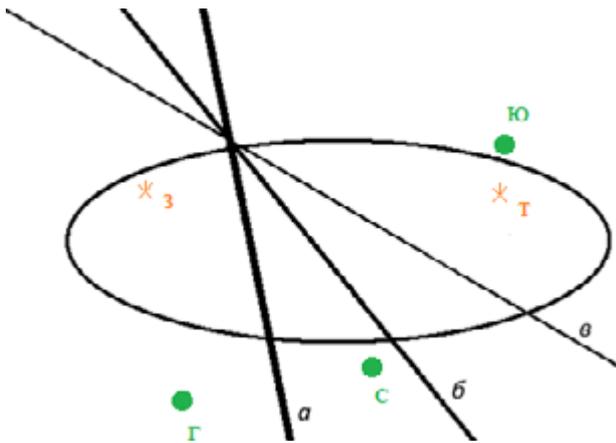


Рис. 6. Разбиение территории уплотненной городской застройки в результате предпоследней итерации

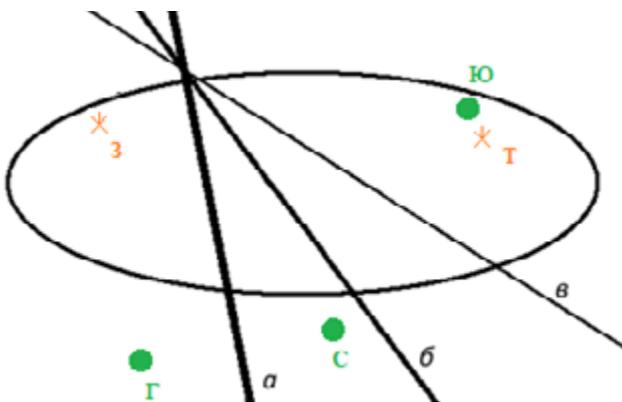


Рис. 7. Разбиение территории уплотненной городской застройки в результате последней итерации

центра те, которые дают решение сформулированной выше задачи. Соответствующие вычислительные процедуры выполнены в среде Maxima (Free Ware) и опираются на аналитические и графические возможности этой системы компьютерной математики.

Предполагается, что начало декартовой системы координат (которая имеет условный характер) находится в месте расположения администрации города «Р». На рис. 5–7 приведены результаты первой и двух последних итераций, выполненных программным модулем Maxima в процессе реализации указанного оптимизационного алгоритма. Каждый из результатов представляет собой разбиение территории уплотненной городской застройки на «области влияния» трех рассматриваемых распределительных центров. Поясним, что для дуополий «Г» — «С», «Г» — «Ю» и «С» — «Ю» указанные разбиения осуществляются прямыми *a*, *б* и *в*. Результат первой итерации показывает, что новое местоположение распределительного центра «Ю» определяется координатами  $x = 8$  (км) и  $y = 1,6$  (км). В соответствующем разбиении основной, наиболее уплотненно застроенной части городской территории (то есть массива потребителей услуг, предоставляемых рассматриваемыми ЛГРЦ) «область влияния» этого распределительного центра представляет собой часть внутренности эллипса, расположенную правее прямой *в* и имеющую площадь, равную 16,77 кв. км. При этом наибольшей оказывается равная 36,21 кв. км площадь «области влияния» центра «С», представляющая собой часть внутренности эллипса, которая расположена между прямыми *a* и *в*.

Обратим внимание на то, что последнюю, выполняемую в процессе оптимизации итерацию мы определили тем условием, чтобы точка пересечения прямых *a*, *б* и *в* приблизилась вплотную к эллипсу (рис. 7). Сделаем здесь общее замечание. В соответствии с содержанием метода эконо-

мико-географического разграничения «областей влияния» станций погрузки и согласно свойству транзитивности отношения равенства в каждом случае три рассматриваемых линии  $a$ ,  $b$  и  $v$  должны пересекаться в одной точке.

### Заключение

Итак, полученные результаты показывают, что оптимальным (в рамках поставленной задачи) является местоположение «Ю», определяемое координатами  $x = 5$  км и  $y = 1,6$  км (рис. 6). В соответствующем разбиении «область влияния» этого центра есть часть внутренности эллипса, расположенная правее прямой  $v$  и имеющая площадь, равную 28,09 кв. км. В этом случае площадь «области влияния» центра «С» (представляющей собой часть внутренности эллипса, расположенную между прямыми  $a$  и  $v$ ) оказывается равной 24,89 кв. км.

В заключение покажем на примере, насколько в рассматриваемой ситуации усложняется территориальная картина распределения грузопотоков методом экономико-географического разграничения «областей влияния» распределительных центров, если у этих центров оказываются различными затраты  $p$  на начально-конечные операции — см. формулу (2). На рис. 8 приведено полученное в программном модуле Maxima разбиение территории уплотненной городской застройки в случае, когда  $p_1 = 10,5$  тыс. руб./тр.ед.,  $p_2 = 14,6$  тыс. руб./тр.ед.,  $p_3 = 17,7$  тыс. руб./тр.ед.

В качестве линий  $a$ ,  $b$  и  $v$ , разделяющих «области влияния» трех рассматриваемых распределительных центров в дуополистических ситуациях, выступают ветви гипербола. В этом случае «область влияния» центра «Ю» представляет собой часть внутренности эллипса, расположенную правее ветви гиперболы  $v$ . После всех итераций в программе Maxima и определения оптимальной «области влияния» для ЛГРЦ при одном и том же пройденном маршруте на рассматрива-

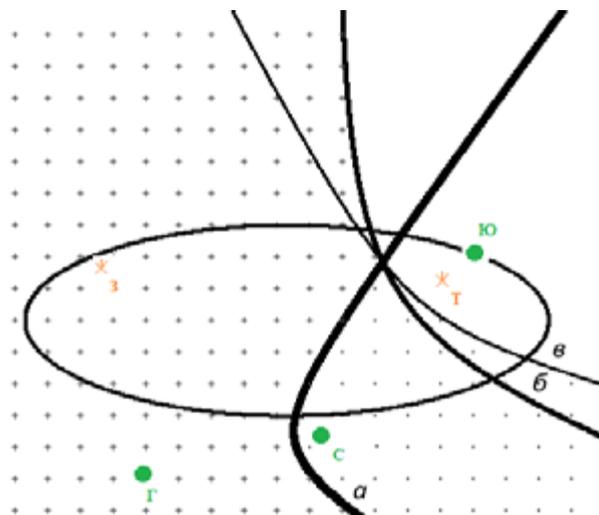


Рис. 8. Разбиение территории уплотненной городской застройки при различных стоимостях начально-конечных операций у центров

емой территории количество потребительских услуг может измениться посредством коррекции коэффициентов модели.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51014.*

*The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-38-51014.*

### Библиографический список

1. Числов О. Н. Методы формирования и принципы интеллектуализации в управлении терминально-складской системой транспортного узла / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, В. В. Алабина и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 1(81). — С. 104–114. — DOI: 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_104.
2. Гусев С. Проблемы определения местоположения склада / С. Гусев // Логистика. — 2011. — № 2(55). — С. 53–55.

3. Demirel T. Multi-criteria warehouse location selection using Choquet integral / T. Demirel, N. Çetin Demirel, C. Kahraman // *Expert Systems with Applications*. — Vol. 37. — Iss. 5, May 2010. — Pp. 3943–3952.

4. Харитонов Д. М. Определение оптимального места расположения распределительных центров / Д. М. Харитонов // *Наука в современном мире: приоритеты развития*. — 2019. — № 1(5). — С. 124–129.

5. Кусраева Р. Ю. Выбор местоположения склада с помощью метода анализа иерархий / Р. Ю. Кусраева // *Евразийское научное объединение*. — 2017. — Т. 2. — № 6(28). — С. 122–128.

6. Крынский Х. Э. Математика для экономистов / Х. Э. Крынский. — М.: Статистика. 1970. 580 с.

7. Chislov O. N. Modelling of the rail freight traffic by the methods of economic-geographical delimitation in the region of the south-easter coast of the Baltic sea / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. M. Zadorozhnyi et al. // *Transport Problems, SUT*. — 2019. — Vol. 14. — № 2. — Pp. 77–87. — DOI: 10.20858/tp. 2019.14.2.7.

8. Chislov O. N. Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport Complex / O. N. Chislov, V. M. Zadorozhnyi, V. A. Bogachev et al. // *Decision Support Methods in Modern Transportation Systems and Networks, Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, 2021. — Pp. 197–210. — DOI: 10.1007/978-3-030-71771-1\_13.

9. Числов О. Н. Распределение вагонопотоков операторской компании в припортовых транспортных узлах методом экономико-географического разграничения / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожний и др. // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2016. — № 3(48). — С. 302–313.

10. Chislov O. N. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system / O. Chislov, V. Bogachev, V. Zadorozhnyi et al. // *Transport Problems, SUT*, 2021. — Vol. 16. — № 2. — Pp. 141–152. — DOI: 10.21307/tp-2021-031.

Дата поступления: 21.06.2022

Решение о публикации: 16.09.2022

#### Контактная информация:

ЧИСЛОВ Олег Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой; o\_chislov@mail.ru

БОГАЧЕВ Виктор Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доц.; bogachev-va@yandex.ru

ТРАПЕНОВ Владимир Викторович — ст. преподаватель; vladimir.trapenov@mail.ru

БОГАЧЕВ Тарас Викторович — канд. физ.-мат. наук, доц.; bogachev73@yandex.ru

ЗАДОРОЖНИЙ Вячеслав Михайлович — канд. техн. наук, доц.; zadorozhnyi91@mail.ru

## Configuring Terminal-Warehouse Infrastructure of Transport Hub Basing on the Development of Method of Economic-Geographical Differentiation of Cargo Flows

O. N. Chislov<sup>1,2</sup>, V. A. Bogachev<sup>1</sup>, V. V. Trapenov<sup>1</sup>, T. V. Bogachev<sup>3</sup>, V. M. Zadorozhnyi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

<sup>2</sup>Sirius University, Sirius town, 1, Olimpiyskiy pr., Sochi, 354340, Russian Federation

<sup>3</sup>Rostov State University of Economics, 69, Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation

**For citation:** Chislov O. N., Bogachev V. A., Trapenov V. V., Bogachev T. V., Zadorozhnyi V. M. Configuring Terminal-Warehouse Infrastructure of Transport Hub Basing on the Development of Method of Economic-Geographical Differentiation of Cargo Flows // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 800–811. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811

### Summary

**Purpose:** To formulate proposals for configuring terminal-warehouse infrastructure for the placement of storage facilities inside a transport hub. **Methods:** Basing on the analysis of publications in the trend of the research data, optimization geometric Euclidean model of freight process, embodied on the territory of a transport hub, was applied to find optimal cargo flow distribution by dividing the flow into parts representing “influence areas”.

**Results:** optimization algorithm for freight process was developed in the article on the basis of classical integral calculus methods, the algorithm allows to discover those ones among many distributive center possible locations which allows in view of restriction complex to determine “influence area” of distributive center with the largest area in comparison with the initial area. **Practical significance:** Economic effect was obtained from base rental rate reduction that is due to possible change of logistic freight distribution center location outside dense urban development territory where base rental rate is higher.

**Keywords:** Warehouse logistics, transport hub, logistic freight distributive center, economic-geographical method, Rostov transport hub, optimization of cargo flow distributions, retail trade network, oligopolistic market, duopoly, higher order algebraic curves.

## References

1. Chislov O. N., Trapenov V. V., Alabina V. V., Bakalov M. V. *Metody formirovaniya i printsipy intellektualizatsii v upravlenii terminal'noskladskoy sistemoy transportnogo uzla* [Methods of formation and principles of intellectualization in the management of the terminal warehouse system of the transport hub]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2021, I. 1(81), pp. 104–114. DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_104. (In Russian)

2. Gusev S. *Problemy opredeleniya mestopolozheniya sklada* [Problems of determining the location of the warehouse]. *Logistika* [Logistics]. 2011, I. 2(55), pp. 53–55. (In Russian)

3. Tufan Demirel, Nihan Çetin Demirel, Cengiz Kahraman. Multi-criteria warehouse location selection using Choquet integral, Expert Systems with Applications. 2010, vol. 37, I. 5, pp. 3943–3952.

4. Kharitonov D. M. *Opredelenie optimal'nogo mesta raspolozheniya raspredelitel'nykh tsentrov* [Determining the optimal location of distribution centers]. *Nauka v sovremennom mire: priority razvitiya* [Science in the modern world: development priorities]. 2019, I. 1(5), pp. 124–129. (In Russian)

5. Kusraeva R. Yu. *Vybor mestopolozheniya sklada s pomoshch'yu metoda analiza ierarkhiy* [Choosing a warehouse location using the hierarchy analysis method]. *Evrasiyskoe Nauchnoe Ob'edinenie* [Eurasian Scientific Association]. 2017, vol. 2, I. 6(28), pp. 122–128. (In Russian)

6. Kryn'skiy Kh. E. *Matematika dlya ekonomistov* [Mathematics for economists]. Moscow: Statistika Publ., 1970. 580 p. (In Russian)

7. Chislov O. N., Bogachev V. A., Zadorozhnyy V. M., Bogachev T. V., Demchenko O. I., Khan V. V. *Modelling of the rail freight traffic by the methods of economic-geographical delimitation in the region of the south-easter coast of the Baltic sea*. *Transport Problems, SUT*. 2019, vol. 14, I. 2,

pp. 77–87. Print edition: ISSN 1896-0596. Online edition: ISSN 2300-861X. DOI: 10.20858/tp. 2019.14.2.7.

8. Chislov O. N., Zadorozhnyy V. M., Bogachev V. A., Kravets A. S., Egorova I. N., Bogachev T. A. *Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport*. *Decision Support Methods in Modern Transportation Systems and Networks, Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer. 2021, pp. 197–210. DOI: 10.1007/978-3-030-71771-1\_13.

9. Chislov O. N. *Raspredelenie vagonopotokov operator-skoj kompanii v priportovykh transportnykh uzlakh metodom ekonomiko-geograficheskogo razgranicheniya* [Distribution of car flows of the operator company in the port transport hubs using the method of economic and geographical delimitation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. 2016, I. 3 (48), pp. 302–313. (In Russian)

10. Chislov O., Bogachev V., Zadorozhnyy V., Kravets A., Bakalov M., Bogachev T. *Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system*. *Transport Problems, SUT*. 2021, vol. 16, I. 2, pp. 141–152. DOI: 10.21307/tp-2021-031.

Received: June 21, 2022

Accepted: September 16, 2022

## Author's information:

Oleg N. CHISLOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department; o\_chislov@mail.ru  
 Viktor A. BOGACHEV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor; bogachev-va@yandex.ru  
 Vladimir V. TRAPENOV — Senior Lecturer; vladimir.trapenov@mail.ru  
 Taras V. BOGACHEV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor; bogachev73@yandex.ru  
 Viacheslav M. ZADOROZHNIY — PhD in Engineering, Associate Professor; zadorozhnyy91@mail.ru