

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТНЫХ СЕТЕЙ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

С.М. Мочалин, Ю.А. Колебер*
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия
*uljachabol@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Городской пассажирский транспорт играет важную роль в жизнедеятельности населения города и обеспечении эффективной, бесперебойной работы всей городской системы в целом. Однако в настоящее время в сфере городского пассажирского транспорта во многих городах России накопился ряд существенных проблем. В частности, это проблемы развития городской маршрутной сети, показатели функционирования которой определяют уровень качества транспортного обслуживания населения и экономический эффект работы городского пассажирского транспорта. В связи с этим актуальным становится исследование перспектив развития методов оптимизации городской маршрутной сети.

Материалы и методы. В статье представлен хронологический анализ методов оптимизации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта. Отражена специфика их применения, приведены достоинства и недостатки. Отражены тенденции развития современных методов оптимизации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта. Существующие многочисленные методы оптимизации городских маршрутных сетей в обобщенном виде можно разделить на два типа: эвристические, ставшие на сегодняшний день классическими, и качественно новые метаэвристические, позволяющие управлять задачами, содержащими нелинейные функции в процессе оптимизации городских маршрутных сетей. В условиях современного развития науки и программно-вычислительных средств в исследуемой области метаэвристические методы становятся перспективным направлением.

Результаты. Выявлено, что со временем методы оптимизации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта совершенствовались и на сегодняшний день дают возможность учитывать противоположные интересы участников процесса перевозки пассажиров в городе, а также задавать большой набор исходных параметров и ограничений для математической модели оптимизации городской маршрутной сети. Выявлены основные особенности оптимизации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта в условиях современного развития науки и программно-вычислительных средств в исследуемой области. На сегодняшний день точных методов оптимизации городских маршрутных сетей не существует. Задача оптимизации маршрутной сети является комбинаторной.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование может быть полезным не только для дальнейшего развития науки в исследуемой области, но и для практической реализации процесса оптимизации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маршрутная сеть, городской пассажирский транспорт, оптимизация, эвристический метод, метаэвристический метод, матрица корреспонденций, пассажирский поток, транспортная сеть, остановочный пункт, подвижной состав.

© С.М. Мочалин, Ю.А. Колебер



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

URBAN PASSENGER TRANSPORT ROAD NETWORKS: PROSPECTS OF METHODS' OPTIMIZATION

S.M. Mochalin, J.A. Koleber*

Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

*uljachabol@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. City passenger transport plays an important role in life of the population of the city and in ensuring the efficient, uninterrupted operation of the entire urban system as a whole. However, currently in the field of urban passenger transport in many cities of Russia a number of significant problems have accumulated. In particular, these are problems of the development of the urban route network, the performance indicators of which determine the level of quality of transport services for the population and the economic effect of the operation of urban passenger transport. In this connection, the study of the prospects for the development of methods for optimizing the urban route network becomes relevant.

Materials and methods. The article presents a chronological analysis of methods for optimizing route networks of urban passenger transport. It reflects the specifics of their use, shows the advantages and disadvantages. The authors also reflect the trends in the development of modern methods of optimization of route networks of urban passenger transport. The existing numerous methods for optimizing urban route networks could be divided into two types: heuristic, which have become classical today, and qualitatively new ones – metaheuristic, allowing managing tasks that contain nonlinear functions in the process of optimizing urban route networks. As modern science, software and computing facilities in the studied area have been developing very fast, metaheuristic methods are becoming a promising direction.

Results. It had been revealed that over time, methods for optimizing the route networks of urban passenger transport had been improved and made it possible to take into account the opposing interests of the participants in the passenger transportation process in the city, as well as to set a large set of initial parameters and constraints for a mathematical model for optimizing the urban route network. The authors revealed the main features of the optimization of the route networks of urban passenger transport in the conditions of the modern development of science and software and computing facilities in the studied area. To date, there were no exact optimization methods for optimizing urban route networks. The task of optimizing the route network appeared to be combinatorial.

Discussion and conclusions. The research is useful not only for the further development of science in the area under study, but also for the practical implementation of the process of optimizing the route networks of urban passenger transport.

KEYWORDS: route network, public passenger transport, optimization, heuristic method, metaheuristic method, correspondence matrix, passenger flow, transport network, stopping point, rolling stock.

© S.M. Mochalin, J.A. Koleber



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В составляющих рейтинга качества жизни регионов России важное место занимает развитие городских транспортных систем. Успешное функционирование городского пассажирского транспорта (ГПТ) благотворно влияет на уровень жизни населения и городскую среду в целом. Однако в настоящее время в силу многих сложившихся факторов в сфере ГПТ многих городов России возник ряд существенных проблем, мешающих его полноценному функционированию и удовлетворению требований городского населения к уровню качества предоставляемых им транспортных услуг. Главным образом это касается функционирования городских маршрутных сетей (МС), показатели функционирования которых напрямую определяют качество перевозок пассажиров в городе и эффективность городских транспортных систем. Таким образом, оптимизация МС является на сегодняшний день актуальным направлением.

Вопросами оптимизации МС ГПТ ученые занимаются уже более 100 лет. При этом по мере пополнения базы научных разработок в этой области совершенствуются и методы оптимизации, усложняются предлагаемые математические модели, появляется возможность решения многокритериальных задач.

Анализ методов оптимизации МС ГПТ представлен в работах [1, 2, 3]. Их авторы делят все существующие методы на три группы:

- 1) оптимизация МС ГПТ в автоматизированном режиме;
- 2) совмещение оптимизации МС ГПТ в автоматизированном режиме и экспертной оценки результатов специалистом;
- 3) принятие решения на основе опыта и неформализованного анализа экспертов.

В работе [4] дана более подробная классификация научных методов решения рассматриваемой задачи, согласно которой эти методы в обобщенном виде делятся на два типа: эвристические (классические) и метаэвристические. В результате имеет смысл описать суть этих методов в настоящем исследовании. Изучение опыта оптимизации МС ГПТ позволит выявлять особенности и перспективы развития науки в исследуемой области.

Цель статьи – исследование методов и выявление особенностей оптимизации МС ГПТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В дореволюционной России вопросам ГПТ не уделялось должного научного внимания. Среди первых книг в России по ГПТ следует отметить следующие: 1908 г. – «Городские электрические железные дороги», 1910 г. – «Планировка городов» (автор книг – профессор Г.Д. Дубелир), 1912 г. – «Благоустройство городов» архитектора В.Н. Семенова. В данных книгах рассматриваются вопросы ГПТ с точки зрения планировочных решений на городских магистралях.

В 1927 г. впервые вышел в свет информационный «Трамвайный бюллетень», который стал издаваться ежемесячно. В 1932 г. вышел в печать научный журнал «Транспорт и дороги города». Это положило начало развитию научных разработок в области управления транспортными системами городов.

В конце 1932 г. создан Научно-исследовательский институт городского движения (НИИ-ГД) Моссовета. Таким образом, был заложен официальный центр научных исследований в области ГПТ.

Впервые к вопросу оптимизации МС ГПТ с научной стороны в России подошел А.Х. Зильберталь и в 1932 г. предложил метод установления трамвайных маршрутов¹. В.С. Ларионов назвал этот метод «методом увязки маршрутов по узлам»². В труде А.Х. Зильберталя впервые были заложены теоретические основы оптимизации МС всех видов ГПТ. При этом оптимизацию МС городов предлагалось производить с учетом потребностей населения и особенностей планировки города.

В 1934 г. в Секторе планировки и социалистической реконструкции городов Всесоюзного совета по делам коммунального хозяйства (ВСКХ) при ЦИК СССР одной из работ, посвященных оптимизации МС, явилась работа Г.В. Шелейховского «Уличная сеть и связанные с ней нормативы». Позднее в 1936 г. Г.В. Шелейховский в своей рукописи «Транспортные основания композиции городского плана» попытался «установить связь между размерами

¹ Зильберталь Ф.Х. Трамвайное хозяйство. М.: Гострансиздат, 1932. 304 с.

² Бронштейн Л.А., Ларионов В.С., Нелидов И.А. Организация движения городского пассажирского транспорта: Труды НИИГТ Моссовета. М.: Изд-во НКХ РСФСР. 1940. 252 с.

уличного движения и планировочной характеристикой уличной сети»³.

В целом с 1933 по 1937 гг. в НИИГД Моссовета, в ЛНИИКХ и в секторе городского транспорта АКХ исследовались методы оптимизации МС ГПТ и ее пропускная способность⁴.

В 1938 г. Н.Н. Закутин предложил «метод наименьшей стоимости» для задачи оптимизации МС⁵. Далее в 1939 г. появляется работа «Городской пассажирский транспорт» А.П. Александрова, Л.А. Бронштейна, А.А. Полякова⁶, в которой представлена методика комплексного проектирования сетей ГПТ с представлением некоторых результатов разработки перспективной схемы развития транспортной системы г. Москвы, а в 1940 г. Ларионов в своей работе [7] исследует теоретические основы оптимизации МС ГПТ.

Развертывание научных работ в области оптимизации МС ГПТ было прервано начавшейся в 1941 г. Великой Отечественной войной.

В послевоенное время научные исследования в области оптимизации МС ГПТ были возобновлены. В 1946 г. А.М. Якшин привел анализ планировочных решений с точки зрения удобства пассажирских сообщений, направленных на сокращение затрат времени на передвижение⁷. Ученый А.А. Поляков продолжил свои исследования в области оптимизации МС ГПТ и в 1953 г. в книге⁸ так же, как и А.М. Якшин, исследовал планировочные аспекты рассматриваемого процесса.

При этом особое внимание ученые уделяли формированию комплекса требований, предъявляемых к МС.

Предложенные в рассмотренный период методы к оптимизации городских МС не получили практического применения, поскольку имели ряд существенных недостатков. Среди

этих недостатков стоит отметить невозможность реализации обозначенных методов в автоматизированном режиме и сравнения большого количества вариантов МС ГПТ ввиду отсутствия электронно-вычислительных машин, формализованной математической постановки и четких рекомендаций к оптимизации МС. На практике данные методы могли получить свое применение только для простых МС и были достаточно трудоемки.

Однако, несмотря на перечисленные недостатки, обозначенные методы явились основой для дальнейшего развития базы научных разработок в области ГПТ, учеными впервые были сформулированы критерии оптимизации городских МС.

В начале 60-х гг. XX в. стали активно развиваться эвристические методы оптимизации МС ГПТ.

Первой работой, положившей начало новому этапу в развитии методов оптимизации МС ГПТ и явившейся основой для дальнейших крупных разработок и исследований в этой области, стала работа Б.Л. Геронимуса «Методика определения оптимальной схемы автомобильных маршрутов»⁹. Работа была выполнена в 1962–1963 гг. в Государственном научно-исследовательском институте автомобильного транспорта (НИИАТ). По сути, она стала прародительницей методики НИИАТ, которая дорабатывалась, дополнялась и совершенствовалась многими авторами в дальнейшем.

Позднее 1965 г. Б.Л. Геронимус совместно с коллегами В.А. Паршиковым и А.И. Егоровой предложили методику построения МС автобусного транспорта¹⁰. Ввиду особой значимости данной методики стоит подробно ее описать. Территория города разбивается на транспортные микрорайоны в соответствии с определенными требованиями зонирования. Транспортная сеть города задается в

³ Поляков А.А. Развитие науки в области городских путей сообщения [Электронный ресурс]. URL : http://www.waksman.ru/Russian/Vehi/_Polyakov.pdf (дата обращения: 02.02.2019).

⁴ Там же.

⁵ Закутин Н.Н. Организация трамвайных пассажирских перевозок. М. : Гостранстехиздат, 1938. 255 с.

⁶ Александров А.П., Бронштейн Л.А., Поляков А.А., Городской пассажирский транспорт. М. 1939. 58 с.

⁷ Якшин А.М. Планировка транспортных сетей: Опыт градостроительного исследования. М., 1946. 88 с.

⁸ Поляков А.А. Городское движение и планировка улиц. М. : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре. 1953. 251 с.

⁹ Геронимус Б.Л. Методика определения оптимальной схемы автомобильных маршрутов. 1963.

¹⁰ Геронимус Б.Л., Егорова А.И., Паршиков В.А. Математическая методика определения схемы автобусных маршрутов в городах : в кн. Совершенствование планирования и организации автомобильных перевозок. М. : Транспорт, 1965. С. 43–79.

виде графа, вершинами которого являются узловые центры полученных транспортных микрорайонов, а ребрами – участки транспортной сети, по которым возможно движение автобусов. Вершинам графа ставится в соответствие время на пересадку, а ребрам – их длина и время следования на автобусе. Ввиду невозможности оптимизации МС без данных о пассажирских корреспонденциях определяется матрица пассажирских корреспонденций между микрорайонами города методом анкетного обследования. Задача оптимизации заключается в нахождении минимума затрат времени пассажиров на передвижения, в которые включаются время ожидания автобуса, время следования по МС, время на пересадки и выраженные во временном показателе неудобства пассажиров, связанные с пересадкой и включающие дополнительные финансовые затраты на оплату проезда. Время пешеходов к ОП здесь не учитывается, поскольку оно полагается одинаковым для всех передвижений. При этом задается ряд ограничений: общее количество автобусов, коэффициент использования вместимости автобусов, протяженность каждого из маршрутов, размещение конечных остановочных пунктов, максимально допустимый интервал движения автобусов на МС. Задается, что в МС должен быть включен ряд априорных маршрутов. Построение маршрутов ведется на кратчайших по времени путях, связывающих транспортные микрорайоны города.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать эвристический метод направленного перебора вариантов, предложенный В.А. Паршиковым^{11, 12}. Согласно этому методу, на первом шаге строится начальное множество маршрутов R, включающее априорно заданные маршруты и маршруты, включение которых в МС удовлетворяет условиям присутствия их в оптимальной совокупности. Второй шаг – строится множество допустимых маршрутов D, удовлетворяющих ограничениям поставленной оптимизационной задачи. Далее в множестве D отыскивается такой маршрут, включение которого в множество

R обеспечивает максимальное уменьшение временных затрат пассажиров. Данная процедура повторяется до тех пор, пока включение маршрута из множества D в множество R не начнет способствовать уменьшению критерия. При этом рекомендуется повторить описанный перебор, но уже в иной последовательности: введение в множество R всех допустимых маршрутов множества D и отыскание маршрута, исключение которого из R обеспечит наибольшее уменьшение критерия.

В 1968 г. разработанная методика была реализована на ЭВМ «Урал-2». Однако ограниченные программы по количеству микрорайонов, на которые разбивается город при моделировании (не более 36 микрорайонов), значительно усложняло процедуру рационализации МС для крупных городов и могло препятствовать адекватности моделирования. Для сравнения: в соответствии с требованиями к зонированию города на микрорайоны требовалось разбивать его более чем на 100 зон. Однако и при таком количестве микрорайонов возникает еще одна сложность – значительные затраты времени на расчеты ввиду большого числа анализируемых вариантов маршрутов.

Стоит отметить, что в методике НИИАТ не учитывается распределение пассажиропотоков по маршрутам в зависимости от наличия маршрутов с несколькими видами ГПТ.

В 1966 г. для облегчения процесса направленного перебора вариантов МС создана методика расчета схем маршрутного пассажирского транспорта в городе с применением математических методов. В этой работе, а также в¹³ ученые предложили формировать оптимальные маршруты ГПТ методом комбинаторного анализа, который заключается в целенаправленном отборе вариантов МС посредством их сравнения между собой по определенным критериям. Ввиду того что количество сравниваемых вариантов МС может достигать огромных значений и сравнивать их представлялось достаточно сложной задачей, ученые предложили метод комбинаторного анализа с направленным отбором вариантов.

Из-за отсутствия значимых ограничений,

¹¹ Паршиков В.А. Определение оптимального размещения расчетной мощности элементов комплекса устройств // Техничко-экономические вопросы развития транспорта : труды конф. молодых специалистов. Кибернетика и транспортные процессы. М. 1963. С. 7–33.

¹² Паршиков В.А. Приближенное решение комбинаторной задачи размещения комплекса устройств // Материалы к конференции по опыту и перспективам применения математических методов и ЭВМ в планировании. Новосибирск, 1962. 8 с.

¹³ Зильберталь Ф.Х. Трамвайное хозяйство. М. : Гострансиздат, 1932. 304 с.

которые бы позволили уменьшить количество сравниваемых вариантов МС и тем самым сократить трудоемкость процесса рационализации, применение предложенных в этот период методов не получило значительного распространения. К тому же несовершенство первых ЭВМ в области совершенствования МС ГПТ усложняло процедуру поиска рационального решения.

Однако предложенная методика послужила хорошей основой для дальнейших исследований в области оптимизации МС и получила развитие и дополнение разработками других ученых (преимущественно в НИИАТ).

Так, в 1974 г. группа ученых М.Е. Антошвили, Г.А. Варелопуло, М.В. Хрущев¹⁴ усовершенствовали описанную выше методику путем исключения вариантов маршрутов, являющихся нецелесообразными для МС. Более того, для оптимизации МС ученые ввели ряд ограничений: минимальная и максимальная длина маршрута, максимально допустимый интервал движения, минимально допустимый коэффициент использования вместимости, количество автобусов и др. Данная методика позволила снизить трудоемкость процесса оптимизации.

Стоит отметить, что М.В. Хрущев¹⁵ и М.Е. Антошвили начали заниматься вопросами оптимизации городских МС еще с 1969 г.¹⁶ [6].

М.В. Хрущев, а также другие ученые продолжали развивать рассматриваемую методику в дальнейшем.

М.Д. Блатнов определил два критерия оптимизации МС: сокращение временных затрат

пассажирам на поездки и минимизация пересадочности на маршрутах¹⁷. При этом автор рассматривает последовательность формирования оптимальной МС с учетом второго критерия.

В 1974 г. Г.А. Каранян и Дж.Р. Симонян предложили итерационный метод оптимизации городских МС¹⁸. Авторы представляют процесс формирования МС в поэтапном виде с описанием критериев оптимизации. При этом делается акцент на необходимость предварительной отбраковки неэффективных маршрутов по следующему критерию: отношение максимальной интенсивности пассажиропотока к средней интенсивности пассажиропотока.

Новый этап в развитии научных разработок в области оптимизации МС начался в 1976 г., когда этой задаче было посвящено большое количество работ¹⁹ [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Более подробно стоит остановиться на работах таких ученых, как В.В. Яворский²⁰, И.П. Макаров [10] и Т.Е. Брейдо^{21, 22}, поскольку их разработки внесли существенный вклад в развитие методов оптимизации городских МС. В.В. Яворский и И.П. Макаров [10] предложили двухэтапную методику оптимизации МС и впервые решили формировать избыточную совокупность маршрутов, включающую только достаточно рациональные маршруты из всех возможных их вариантов. Таким образом, сокращается количество допустимых маршрутов, а значит, и количество анализируемых вариантов МС, что значительным образом сократит временные затраты на формирование МС и трудоемкость процесса оптимизации.

¹⁴ Антошвили М.Е., Варелопуло Г.А., Хрущев М.В. Организация городских автобусных перевозок с применением математических методов и ЭВМ. М.: Транспорт, 1974. 104 с.

¹⁵ Хрущёв М.В. Совершенствование методов организации перевозок пассажиров автобусами в городах с применением ЭЦВМ: автореф. дис. канд. техн. наук. Хрущев М.В. М.: МИЭИ, 1970.

¹⁶ Хрущёв М.В. Составление оптимальных схем автобусных маршрутов в городах // Организация и экономика автомобильного транспорта. М.: Транспорт, 1970. С. 119–133.

¹⁷ Блатнов М.Д. Пассажирские автомобильные перевозки. М.: Транспорт, 1973. 301 с.

¹⁸ Каранян Г.А., Симонян Дж.Р. Итерационный метод оптимизации маршрутной сети городского автомобильного транспорта // Совершенствование технико-эксплуатационных показателей в автомобильном транспорте. Ереван: Айстан, 1974. Вып. 5. С. 12–15.

¹⁹ Акулова А.Я., Ниедола И.Д. Совершенствование маршрутной системы массового пассажирского транспорта. : в кн. Комплексное развитие АТ крупных городов: тез. докл. П Всесоюзн. науч.-техн. конф. М. 1981. С. 68–69.

²⁰ Яворский В.В. Модели и алгоритмы проектирования маршрутных сетей городского пассажирского транспорта : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03 / Яворский Владимир Викторович. Томск, 1976. 193 с.

²¹ Брейдо Т.Е. Математическое моделирование транспортных сетей и оптимизация параметров их функционирования : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03 / Брейдо Т.Е. Горький, 1977. 248 с.

²² Брейдо Т.Е. Моделирование и оптимизация при проектировании сети ГПТ // Моделирование процессов управления транспортными системами : тез. докл. всесоюзн. конф. Владивосток, 1977. С.85–86.

ции. Формирование избыточной совокупности маршрутов составляет первый этап предложенной методики. При этом здесь выделяются микрорайоны, которые должны быть связаны одним маршрутом. В качестве критерия выступает средняя интенсивность пассажиропотока между объединяемыми микрорайонами. Далее решается задача определения последовательности прохождения микрорайонов маршрутом – обобщение задачи о коммивояжере. Критерием этой задачи являются суммарные затраты времени пассажиров или неравномерность пассажиропотока на маршруте. На втором этапе для сформированной избыточной совокупности маршрутов определяется необходимое или распределяется заданное количество подвижного состава на каждом маршруте. Затем из избыточной совокупности исключаются те маршруты, которые получили малое количество подвижного состава. Для полученного таким образом варианта МС снова осуществляется расчет количества подвижного состава на каждом маршруте и критерия оптимальности, содержащего затраты на организацию и функционирование маршрутов ГПТ, доходы от перевозок и стоимостное выражение временных затрат пассажиров на передвижения. Этот процесс повторяется до тех пор, пока исключение маршрутов не будет давать улучшение критерия оптимальности, т.е. данный процесс носит итеративный характер. Таким образом, путем подобного анализа избыточной совокупности определяют оптимальный вариант МС.

Стоит отметить следующие достоинства данного метода: сокращение временных затрат и трудоемкости процесса оптимизации МС ввиду формирования избыточной совокупности маршрутов; принятие во внимание такого фактора, как ограниченное количество подвижного состава ГПТ и его учет при оптимизации МС; содержание в критерии оптимальности такого важного показателя эффективности функционирования ГПТ, как временные затраты пассажиров.

Однако наряду со значимыми достоинствами предложенного метода он имеет ряд недостатков. Так, например, объединение микрорайонов на первом этапе проектирования по критерию средней интенсивности пассажиропотока между ними не совсем учитывает тех-

нологические особенности прокладываемых маршрутов и взаимное расположение этих микрорайонов на территории города. В результате могут получиться маршруты с большим коэффициентом непрямолинейности.

Т.Е. Брейдо задачу оптимизации МС представил как четырехкритериальную задачу синтеза многопродуктовой сети. В качестве критериев определены следующие показатели: 1-й критерий – суммарное время передвижения пассажиров; 2-й критерий – количество подвижного состава на максимально загруженном перегоне; 3-й критерий – стоимость поездок; 4-й критерий – затраты на создание и эксплуатацию МС. Задачу предлагается решать в три этапа. На первом этапе для некоторого варианта МС осуществляется распределение пассажиропотока по тем маршрутам, которые обеспечивают минимизацию первого и второго критериев. На втором этапе достигается минимизация четвертого критерия и осуществляется распределение подвижного состава по маршрутам. На третьем этапе минимизируется третий критерий, при этом ограничениями служат величины пассажиропотоков и количество подвижного состава, найденные на первых двух этапах. Затем обозначенные этапы повторяются до тех пор, пока относительное улучшение критериев не достигнет заданной точности.

Несомненным достоинством предложенного метода является то, что автором сделана формализованная постановка задачи синтеза МС в целом. Однако предложенная методика не может быть в полной мере реализована для сложных МС в крупных городах с большим количеством микрорайонов ввиду больших размеров задачи. Более успешное применение метод может получить для модификации существующей МС.

В работе Т.Ш. Горшкова²³ представлен эвристический алгоритм формирования маршрутов, заключающийся в следующем. Из матрицы корреспонденций выбирается самая длинная ненулевая корреспонденция, кратчайший путь между корреспондирующими пунктами которой образует *i*-й маршрут. К данному маршруту относятся все взаимные корреспонденции между транспортными микрорайонами, через которые проходит этот кратчайший путь. Затем выбирается следую-

²³ Горшков Т.Ш. Вопросы планирования маршрутных систем пассажирского транспорта в городах, расположенных в сложных топографических условиях (на примере г. Тбилиси) : дис. ... канд. техн. наук Горшков Т.Ш. 05.22.02 М., 1981. 193 с.

щая самая длинная ненулевая корреспонденция, не относящаяся к i -му маршруту. По ней определяется второй маршрут, который «нагружается» корреспонденциями аналогично i -му маршруту и т.д. Решение задачи направлено на минимизацию таких критериев, как количество пересадок, время передвижения, суммарная протяженность маршрутов. Однако стоит отметить, что предложенный автором метод не в полной мере обеспечивает минимизацию выдвинутых критериев.

В 80-х гг. некоторые авторы стали учитывать при оптимизации МС противоположные интересы участников системы ГПТ: затраты перевозчиков с одной стороны и стоимость оценки временных потерь пассажиров – с другой.

В 1983 г. С.Ю. Ольховский²⁴ внес значительный вклад в совершенствование методов оптимизации МС, предложив многоэтапный итерационный подход к формированию МС с подробными математическими моделями и алгоритмами. При этом в задачу оптимизации МС входит и такая важная составная часть, как определение рациональных типов и количества подвижного состава ГПТ на маршрутах.

На первом этапе формируется множество возможных маршрутов, удовлетворяющих ограничениям на размещение начально-конечных пунктов и длине маршрутов.

На втором этапе из полученного множества возможных маршрутов осуществляется формирование рациональной совокупности по критерию максимизации суммарной на МС пассажиронапряженности беспересадочных сообщений.

На третьем этапе формируются альтернативные варианты МС. При формировании вариантов МС учитывается прежде всего количество пассажиров, которые могут совершать передвижения без пересадок в рамках рассмотренного варианта МС.

После этого на четвертом этапе осуществляются анализ сформированных вариантов МС и отбор наилучшего из них. Задачами ана-

лиза являются моделирование распределения (нагрузке) корреспонденций на маршруты, определение рационального типа и количества подвижного состава на маршрутах (если они исходно не заданы), расчет основных характеристик маршрутов и МС в целом (показатели качества и эффективности ГПТ), по которым и производится сравнение вариантов МС и выбор наилучшей. По результатам четвертого этапа, как правило, приходится возвращаться к третьему и даже ко второму этапам.

Особенностью предложенного автором метода является моделирование выбора пассажиром маршрутов следования по кратчайшим по времени путям на графе беспересадочных поездок, а также возможность выбора подвижного состава из нескольких видов ГПТ. В то же время такие факторы, как неудобство, связанное с пересадками, стоимость поездки, «привлекательность» различных видов транспорта и др., также учитываются при моделировании выбора пассажирами путей следования путем «масштабирования» или введения дополнительных затрат времени на передвижения. Кроме того, автором впервые предложено для процесса получения матрицы корреспонденций зонирование города относительно остановочных пунктов, а не укрупненных транспортных узлов, что существенным образом повышает достоверность получаемых результатов.

В похожем ключе занимался исследованиями в области оптимизации МС ученый Ф.Г. Глик²⁵ [16], который также предложил метод поэтапного построения МС с последовательным приближением к оптимальному решению. Методика дает возможность прежде всего устанавливать предельно допустимый интервал движения подвижного состава на маршруте, уменьшать величины пересадочности и затраты времени при прокладке маршрутов по кратчайшим путям.

В 1990-х гг. вопросами оптимизации городских МС занимались такие ученые, как П.Ф. Горбачев [17], В.К. Доля²⁶, Э.А. Сафро-

²⁴ Ольховский С.Ю. Исследование и разработка методов совершенствования пассажирской транспортной системы город : дис. ... канд. техн. наук / Ольховский Сергей Юрьевич. М., 1983. 228 с.

²⁵ Глик Ф.Г. Методика построения маршрутной системы массового пассажирского транспорта // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния : материалы VIII Междунар. (XI Екатеринбургской) науч. практ. конф. Екатеринбург : Издательство АМБ, 2002. С. 240–247.

²⁶ Доля В.К. Теоретические основы и методы организации маршрутных автобусных перевозок пассажиров в крупнейших городах : дис. ... д-ра. техн. наук / Доля Виктор Константинович. М., 1993. 301 с.

нов, а также продолжал свои исследования Г.А. Варелопуло²⁷.

В работе Э.А.Сафронова²⁸ отмечается, что если минимизировать уровень обеспеченности жителей города магистральной сетью, повысив, таким образом, удельную загрузку маршрутов, и одновременно снизить до минимума маршрутный коэффициент, будет повышена эффективность функционирования системы ГПТ. Это объясняется тем, что в итоге будет снижена удельная потребность населения в транспортной сети и подвижном составе ГПТ. Потребность в подвижном составе ГПТ снизится по причине того, что рост удельной загрузки маршрутов позволит повысить вместимость подвижного состава ГПТ. Автор отмечает важность увеличения скорости передвижения пассажиров для повышения эффективности работы системы ГПТ. А за рубежом, согласно [18], скорость уже давно заложена в основу уровня качества передвижений пассажиров.

Г.А. Варелопуло предлагает рассчитывать МС по критерию минимизации затрат времени населения на передвижения с использованием ГПТ. Сначала формируется набор кратчайших путей следования от каждого транспортно-го узла до каждого пассажиропоглощающего пункта. Затем из полученных кратчайших путей (цепочек связей) выбирается тот, который содержит наибольшее число адресов. Если обнаруживаются пути, количество адресов в которых совпадает, выбирается путь с наибольшей мощностью пассажиропотока. В случае если находятся пути, имеющие как одинаковое количество адресов, так и мощности пассажиропотока, выбирается путь, меньший по времени. Выбранный путь берется за основание маршрута-кандидата. Далее последовательно в порядке убывания количества адресов, связей просматриваются все пути с общей последовательностью и номерами адресов, совпадающими с какой-либо частью выбранного маршрута-кандидата.

В работе [19] предлагается по результатам оптимизации снизить временные затраты пассажиров на осуществление поездок.

В 2000-х годах с обострением транспортных проблем в городах и нарастанием напряженности на городских магистралях ученые стали посвящать свои работы комплексному изучению и исследованию вопросов оптимизации МС.

Появилось большое количество оптимизационных аппаратов, учитывающих в качестве главного параметра оптимизации перегрузку транспортной сети и позволяющих снижать ее на основе рационализации структуры парка подвижного состава ГПТ по вместимости и количеству²⁹.

Усовершенствовались и усложнились программно-вычислительные средства оптимизации МС, что позволило задавать большой набор исходных данных и ограничений для решения поставленной задачи.

Оптимизационные решения стали строиться на принципе системности и формирования комплексного набора показателей качества перевозок [20], учитывать факторы неопределенности и применять логистические подходы [21, 22] для решения проблем функционирования ГПТ с целью обеспечения необходимого уровня качества обслуживания пассажиров и повышения эффективности перевозочного процесса. Так, М.Р. Якимовым³⁰ разработана «многоуровневая система показателей оценки качества» функционирования городских транспортных систем, при этом набор показателей оценки качества значительно расширен автором.

В рассматриваемый период также стали совершенствоваться оптимизационные модели, позволяющие учитывать противоположные интересы участников системы ГПТ [23, 24, 25, 26, 27]. Так, в работе [23] в качестве критерия, учитывающего противоположные интересы участников системы ГПТ, выступает плотность пассажиропотока на исследуемом участке дороги. Авторы объясняют выбор этого критерия следующим. В результате его максимизация ведет к сокращению уровня пересадочности, что выгодно для пассажира, а также к увеличению пассажиропотока, что увеличивает прибыль перевозчика.

²⁷ Варелопуло Г.А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. М. : Транспорт, 1990. 208 с.

²⁸ Сафронов Э.А. Научно-методические основы развития системы городского пассажирского транспорта : автореф. дисс. ... докт. техн. наук : 05.22.10 / Сафронов Эдуард Алексеевич. М., 1993. 43 с.

²⁹ Сафронов Э.А. Транспортные системы городов и регионов : учебное пособие. Изд-во АСВ, М., 2005. 272 с.

³⁰ Якимов М.Р. Научная методология формирования эффективной транспортной системы крупного города : дисс. д-ра. техн. наук : 05.22.01 / Якимов Михаил Ростиславович. М., 2011. 46 с.

Ученые стали предлагать метаэвристические методы оптимизации МС ГПТ и делать акцент на их перспективность. В связи с этим эвристические методы, получившие развитие в начале 60-х гг. прошлого века, уже называют классическими. При этом отмечается, что метаэвристические методы являются более качественными, поскольку они способны преодолеть точку локального оптимума для продолжения поиска оптимального решения и, таким образом, не являются законченными эвристиками. Так, в работах [23, 28, 29] предлагается метаэвристический алгоритм муравьиных колоний для оптимизации МС. Согласно этому алгоритму, автобусы могут рассматриваться как колонии муравьев, начальные остановочные пункты – как гнезда, из которых муравьи начинают свой путь, конечные остановочные пункты – как источник пищи для муравьев. В результате задача оптимизации МС сводится к процессу поиска муравьиными колониями пищи по феромонам, т.е. поиска оптимальных автобусных маршрутов от начального остановочного пункта к конечному с учетом плотности пассажиров прямого сообщения (собственно, критерий оптимизации). Однако недостаток этого алгоритма заключается в рассмотрении только автобусных маршрутов как потенциально возможных, т.е. в невозможности учета привлекательности различных видов ГПТ. В то же время несомненным достоинством предложенного авторами метода является то, что при получении матрицы корреспонденций, необходимой для реализации описанного алгоритма, зонирование города предлагается производить относительно остановочных пунктов, а не укрупненных транспортных узлов. При этом описана возможность автоматизированного получения искомой информации с помощью данных электронных карт.

В работах [26, 27] предложен генетический алгоритм в составе метаэвристических методов оптимизации МС ГПТ как способ управления нелинейными функциями в процессе решения сложных задач управления городскими пассажирскими перевозками.

Ученый М.В. Хрущев продолжил развивать методику института НИИАТ. В его работе³¹ критерием оптимальности МС выступает минимум суммарных временных затрат населения на передвижения с использованием транспорта. Стоит отметить, что данный критерий при-

меняется при заданном ограниченном количестве подвижного состава ГПТ на маршрутах, однако на сегодняшний день в качестве альтернативы ограниченному количеству подвижного состава ГПТ на маршрутах выступает выход на рынок частных перевозчиков, в связи с чем данная методика для настоящих условий организации перевозок пассажиров в городе может быть мало применима. Также в процессе оптимизации при очередном добавлении маршрутов пересчитываются все показатели, хотя достаточно только пересчитывать тот критерий, который выступает в качестве определяющего.

Анализ работ рассматриваемого периода показывает, что методы оптимизации МС ГПТ отличаются по двум основным критериям качества перевозочного процесса: одни авторы в качестве главного критерия определяют сокращение временных затрат пассажиров на передвижения, другие – сокращение количества пересадок и непрямолинейности маршрута.

В странах Европейского союза и США уже давно развита система небольшого количества маршрутов и, как следствие, высокого уровня коэффициента пересадочности. При этом сохранение нормальных условий для пользования пассажирами ГПТ обеспечивается за счет массового внедрения системы зонно-повременных пересадочных тарифов (в России эта система не развита).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Более чем за 100 лет накоплено множество методов оптимизации городских МС. С течением времени многие из них дорабатывались, совершенствовались, появлялись качественно новые методы. Если первые из них не имели формализованной математической постановки и четких рекомендаций к процессу оптимизации МС, то в дальнейшем стали активно развиваться эвристические методы, моделирование стало базироваться на применении прикладных экономико-математических методов и автоматизированных систем обработки информации. А в дальнейшем стали предлагаться метаэвристические методы оптимизации МС ГПТ, которые, по мнению их авторов, помогают находить более оптимальные решения. Кроме того, развитие современных программно-вычислительных средств позво-

³¹ Хрущев М.В. Исследование методов маршрутизации автобусного транспорта в городах : дис. ... д-ра экон. Наук : 08.00.05 / Хрущев Михаил Владимирович. М., 2000. 206 с.

ляет учитывать целый набор исходных данных и ограничений к процессу оптимизации МС, а также применять сложные математические модели.

Таким образом, в результате настоящего исследования можно сформулировать следующие особенности, характерные для процесса оптимизации МС ГПТ:

1. Оптимизация МС ГПТ невозможна без предварительного получения матрицы пассажирских корреспонденций.

2. Процессу оптимизации МС ГПТ должен предшествовать процесс сбора большого количества исходных данных.

3. Задачу оптимизации МС усложняет расхождение интересов перевозчиков и пассажиров в системе ГПТ. Многие современные ученые пытаются учитывать это расхождение интересов при разработке методов оптимизации городских МС.

4. При современном развитии методов оптимизации МС ГПТ невозможно обойтись без применения соответствующих сложных программно-вычислительных комплексов, но в то же время необходимы заключительные оценки экспертов-проектировщиков.

5. Процесс оптимизации МС ГПТ как таковой требует задания целевой функции при заданном наборе ограничений.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что точных оптимизационных моделей построения МС ГПТ на сегодняшний день не существует. Это связано прежде всего с тем, что процесс перевозки пассажиров в городах имеет множество факторов неопределенности и стохастичности и является достаточно сложным, включая в себя целый комплекс исходных данных. Таким образом, задача оптимизации МС ГПТ носит комбинаторный характер.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная в начале исследования цель достигнута. Авторами изучены и проанализированы в хронологическом порядке известные на сегодняшний день методы оптимизации МС. На основе полученного анализа можно сделать вывод, что наука в исследуемой области продолжает развиваться главным образом за счет совершенствования математических моделей и программно-вычислительных средств оптимизации МС ГПТ. Определены особенности процесса оптимизации городских МС. Авторы считают, что в современных условиях функционирования ГПТ процесс оптимизации городской МС должен учитывать как интересы

пассажира, так и интересы перевозчиков. В таком случае процесс оптимизации МС позволит повысить эффективность функционирования системы ГПТ в целом.

Представленный в исследовании анализ методов оптимизации МС ГПТ может быть полезен в процессе дальнейшего развития науки в исследуемой области. Выявленные особенности развития методов оптимизации МС ГПТ могут быть использованы в качестве основы как для теоретических разработок в области оптимизации МС ГПТ, так и для практической реализации процесса оптимизации МС ГПТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурлуцкий А.А. Анализ опыта формирования оптимальных маршрутных схем городского пассажирского транспорта // Вестник ТГАСУ. 2013. №2. С. 371–380.

2. Мартынова Ю.А. Анализ опыта проектирования рациональных маршрутных сетей городского пассажирского транспорта // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 2 (21). С. 1–10.

3. Федоров В.А. К вопросу о возможности оптимизации маршрутной сети городского пассажирского транспорта в мегаполисах // Молодой ученый. 2015. № 2 (82). С. 331–333.

4. Кочегурова Е.А., Мартынова Ю.А. Оптимизация составления маршрутов общественного транспорта при создании автоматизированной системы поддержки принятия решений // Известия Томского политехнического университета. 2013. № 5. Т. 323. С. 79–84.

5. Геронимус, Б.Л., Джумаев Д.Д., Коноплин В.В. Расчет рациональной схемы автобусных маршрутов // Автомобильный транспорт. 1966. № 9. С. 20–21.

6. Хрущёв М. В., Антошвили М. Е. Определение оптимальных схем автобусных маршрутов в городах // Бюллетень Организации сотрудничества железных дорог. Варшава, 1970. С. 28 – 31.

7. Джваршейшвили Т.М., Ломидзе Н.Н., Цомаея Г.Г., Цулукидзе Т.В. Моделирование пассажирской транспортной системы города с применением методов эвристического программирования // Проблемы и перспективы развития АТ крупных городов: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1981. С. 227–229.

8. Кирзнер Ю.С. Исследование возможностей корректировки маршрутных систем на основе оценки их качества // Совершенствование перевозок пассажиров АТб : науч. тр. / НИИАТ. М., 1980. С. 70–79.

9. Кирзнер Ю.С. Совершенствование маршрутных систем и стоимостная оценка продолжительности передвижений пассажиров // *Город и транспорт*. М., 1979. С. 24–27.
10. Макаров И.П., Яворский В.В. Модели проектирования сети маршрутов городского пассажирского транспорта // *Моделирование процессов управления транспортными системами: тез. докл. Всесоюзн. конф. Владивосток, 1977*. С. 92–95.
11. Мартынов В.А., Мирицкий Л.Б. Градостроительная проблема проектирования маршрутной системы городского пассажирского транспорта (на примере г. Минска) // *Комплексное развитие АТ крупных городов: тез. докл. II Всесоюзн. науч.-техн. конф. М., 1981*. С. 145–147.
12. Пискорский Л.Ф., Закиров А. Трассирование линий метрополитена поисковыми методами на плане города // *Вопросы вычислительной и прикладной математики*. Ташкент, 1977. Вып. 48. С. 81–86.
13. Рубец А.Д. Развитие методов оптимизации схемы городских автобусных маршрутов // *Совершенствование перевозок пассажиров АТ: сб. науч. статей / НИИАТ*. М., 1979. С. 55–62.
14. Яворский В.В. Модели и алгоритмы проектирования сети городского С. 93–102.
15. Rapp M.H., Mattenberger P., Piguet S., Robert-Grandpiezre A. Interactive graphics systems for transit route optimization. *Transp. Res. Rec.*, 1976, No. 559, p. 73–88.
16. Глик Ф.Г. Интерактивное конструирование маршрутной системы городского пассажирского транспорта // *Градостроительство*. Вып. 39. Киев: Будівельник, 1987, С. 100–106.
17. Горбачев П.Ф., Доля В.К. Формирование рациональной схемы маршрутов пассажирского транспорта в крупнейших городах // *Передовой производственный опыт и научно-технические достижения, рекомендации для внедрения на АТ : информ. Сб. Мин-ва автомоб. трансп. РСФСР.М.: ЦБНТИ, 1990*. С. 8–12.
18. Sutaria, T.C., I. Haynes. Relation of Signalized Intersection Level of Service to Failure Rate and Average Individual Delay. // *Highway Res. Rec.*, 1970. no. 321. P. 107–113.
19. Pattnaik S.B., Mohan S., Tom V.M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm // *Journal of Transportation Engineering*. 1998. V. 124 (4). P. 368–375.
20. Федоров М.П., Ерихов М.М., Знаменский Д.Н. Системное обоснование критерия оптимизации маршрутной сети городского пассажирского транспорта // *Автотранспортное предприятие*. 2010. № 4. С. 32–34.
21. Болтенко Ю.А. Модель логистической системы общественного пассажирского транспорта // *Молодой ученый*. 2016. № 26 (130). С. 17–20.
22. Нгуен Тхи Тху Хыонг, Рябов И.М. Особенности логистики общественного пассажирского транспорта г. Ханоя // *Символ науки*. 2018. № 6. С. 53–59.
23. Кочегурова Е.А., Мартынов Я.А., Мартынова Ю.А., Цапко С.Г. Алгоритм муравьиных колоний для задачи проектирования рациональных маршрутных сетей городского пассажирского транспорта // *Вестник СибГУТИ*. 2014. № 3. С. 89–100.
24. Nallusamy R., Duaiswamy K., Dhanalaksmi R. Optimization of multiple vehicle routing problems using approximation algorithms // *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2009. V. 1 (3). P. 129–135.
25. Bachelet B., Yon L. Enhancing theoretical optimization solutions by coupling with simulation // *Proceeding of the 1st OICMS, Clermont-Ferrand. France, 2005*. P. 331–342.
26. Afandizadeh Sh., Khaksar H., Kalantari N. Bus fleet optimization using genetic algorithm a case study of Mashhad // *International Journal of Civil Engineering*. 2012. V. 11. P. 43–52.
27. Лебедева О.А. Оптимизация маршрутной сети городского общественного транспорта // *Вестник АНГТУ*. 2018. № 12. С. 185–188.
28. Zhongzhen Ya., Bin Yu, Chuntian Ch. Parallel ant colony algorithm for bus network optimization // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2007. no. 22. pp. 44–55.
29. Yu B., Yang Z. Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm // *In Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2005. no. 5 pp. 374–389.

REFERENCES

1. Burluckij A.A. Analiz opyta formirovaniya optimal'nyh marshrutnyh shem gorodskogo passazhirskogo transporta [Analysis of experience of the optimum route schemes formation of city passenger transport]. *Vestnik TGASU*, 2013; 2: 371–380 (in Russian).
2. Martynova Ju.A. Analiz opyta proektirovaniya racional'nyh marshrutnyh setej gorodskogo passazhirskogo transporta [Analysis of experience of the rational route networks design of city passenger transport]. *Internet-zhurnal NAUKOVEDENIE*, 2014; 2(21): 1–10 (in Russian).
3. Fedorov V.A. K voprosu o vozmozhnosti optimizacii marshrutnoj seti gorodskogo passazhirskogo transporta v megapolisah [To

the question of the possibility of optimizing the route network of urban passenger transport in metropolitan areas]. *Molodoj uchenyj*, 2015; 2(82): 331–333 (in Russian).

4. Kochegurova E.A., Martynova Ju.A., Optimizacija sostavlenija marshrutov obshhestvennogo transporta pri sozdanii avtomatizirovannoj sistemy podderzhki prinjatija reshenij [Optimization of drawing up routes of public transport during creation of the automated system of decision-making support]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2013; 5(323): 79–84 (in Russian).

5. Geronimus, B.L., Dzhumaev D.D., Konoplin V.V. Raschet racional'noj shemy avtobusnyh marshrutov [Calculation of the rational scheme of bus routes]. *Avtomobil'nyj transport*, 1966; 9: 20–21 (in Russian).

6. Hrushh'ov M. V., Antoshvili M. E. Opredelenie optimal'nyh shem avtobusnyh marshrutov v gorodah [Definition of optimum schemes of bus routes in the cities]. *Bjulleten' Organizacii sotrudnichestva zheleznih dorog*, 1970; Varshava: 28–31 (in Russian).

7. Dzhvarshejshvili T.M., Lomidze N.N., Comaja G.G., Culukidze T.V. Modelirovanie passazhirskoj transportnoj sistemy goroda s primeneniem metodov jevrsticheskogo programmirovaniya [Modeling of the city passenger transport system with application of the heuristic programming methods]. V kn. *Problemy i perspektivy razvitiya AT krupnyh gorodov: tez. dokl. Vsesojuzn. nauch.-tehn. konf. Moscow*, 1981; 227–229 (in Russian).

8. Kirzner Ju.S. Issledovanie vozmozhnostej korekcionirovki marshrutnyh sistem na osnove ocenki ih kachestva [Research of opportunities of the route systems correction on the basis of quality assessment]. V kn. *Sovershenstvovanie perevozok passazhirov AT. Sb. nauch. tr. NIIAT. Moscow*, 1980; 70–79 (in Russian).

9. Kirzner Ju.S. Sovershenstvovanie marshrutnyh sistem i stoimostnaja ocenka prodolzhitel'nosti peredvizhenij passazhirov [Improvement of route systems and cost assessment of the passengers' movement duration]. V kn. *Gorod i transport. Moscow*, 1979; 24–27 (in Russian).

10. Makarov I.P., Javorskij V.V. Modeli proektirovaniya seti marshrutov gorodskogo passazhirskogo transporta [Models of the network routes design of city passenger transport]. V kn. *Modelirovanie processov upravleniya transportnymi sistemami. Tez. dokl. Vsesojuzn. konf. Vladivostok*, 1977; 92–95 (in Russian).

11. Martynov V.A., Mirickij L.B. Gradostroitel'naja problema proektirovaniya

marshrutnoj sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta (na primere g. Minska) [Town-planning problem of design of a route system of city passenger transport (on the example of Minsk)]. V kn. *Kompleksnoe razvitie AT krupnyh gorodov: tez. dokl. P Vsesojuzn. nauch.-tehn. konf. Moscow*, 1981; 145–147 (in Russian).

12. Piskorskij L.F., Zakirov A. Trassirovanie linij metropolitena poiskovymi metodami na plane goroda [Tracing of the subway lines by search methods on city map]. V kn. *Voprosy vychislitel'noj i prikladnoj matematiki. Tashkent*, 1977; 48: 81–86 (in Russian).

13. Rubec A.D. Razvitie metodov optimizacii shemy gorodskih avtobusnyh marshrutov [Development of the optimization methods of the city bus routes]. V kn. *Sovershenstvovanie perevozok passazhirov AT: sb. nauch. Statej. NIIAT. Moscow*, 1979; 55–62 (in Russian).

14. Javorskij V.V. Modeli i algoritmy proektirovaniya seti gorodskogo passazhirskogo transporta [Models and algorithms of the network design of city passenger transport]. V kn. *Problemy postroenija ASU na transporte. Kiev*, 1976; 93–102 (in Russian).

15. Rapp M.H., Mattenberger P., Piguet S., Robert-Grandpiezre A. Interactive graphics systems for transit route optimization. *Transp. Res. Rec.*, 1976; 559: 73–88.

16. Glik F.G. Interaktivnoe konstruirovanie marshrutnoj sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta [Interactive designing of a route system of city passenger transport]. *Gradostroitel'stvo. Vyp. 39. Kiev: Budivel'nik*, 1987; 100–106 (in Russian).

17. Gorbachev P.F., Dolja V.K. Formirovanie racional'noj shemy marshrutov passazhirskogo transporta v krupnejshih gorodah [Formation of a rational scheme of passenger transport routes in major cities]. *Peredovoj proizvodstvennyj opyt i nauchno-tehnicheskie dostizhenija, rekomendacii dlja vnedrenija na AT. Inform. sbornik Min-vo avtomob. transp. RSFSR. Moscow, CBNTI*, 1990; 8–12 (in Russian).

18. Sutaria, T.C., I. Haynes. Relation of Signalized Intersection Level of Service to Failure Rate and Average Individual Delay. *Highway Res. Rec.*, 1970; 321: 107–113.

19. Pattnaik S.B., Mohan S., Tom V.M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*. 1998; 124(4): 368–375.

20. Fedorov M.P., Erihov M.M., Znamenskij D.N. Sistemnoe obosnovanie kriterija optimizacii marshrutnoj seti gorodskogo passazhirskogo transporta [System justification of the optimization

criterion of the city passenger transport route network]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2010; 4: 32–34 (in Russian).

21. Boltenko Ju.A. Model' logisticheskoy sistemy obshhestvennogo passazhirskogo transporta [Model of a logistics system of public passenger transport]. *Molodoj uchenyj*, 2016; 26(130): 17–20 (in Russian).

22. Nguen Thi Thu Hyong, Rjabov I.M. Osobennosti logistiki obshhestvennogo passazhirskogo transporta g. Hanoja [Features of logistics of Hanoi public passenger transport]. *Simvol nauki*, 2018; 6: 53–59 (in Russian).

23. Kochegurova E.A., Martynov Ja.A., Martynova Ju.A., Sapko S.G. Algoritm murav'inyh kolonij dlja zadachi proektirovaniya racional'nyh marshrutnyh setej gorodskogo passazhirskogo transporta [Algorithm of ant colonies for a problem of design of rational route networks of city passenger transport]. *Vestnik SibGUTI*, 2014; 3: 89–100 (in Russian).

24. Nallusamy R., Duaiswamy K., Dhanalaksmi R. Optimization of multiple vehicle routing problems using approximation algorithms. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2009; 1(3): 129–135.

25. Bachelet B., Yon L. Enhancing theoretical optimization solutions by coupling with simulation. *Proceeding of the 1st OICMS, Clermont-Ferrand, France*, 2005; 331–342.

26. Afandizadeh Sh., Khaksar H., Kalantari N. Bus fleet optimization using genetic algorithm a case study of Mashhad. *International Journal of Civil Engineering*, 2012; 11: 43–52.

27. Lebedeva O.A. Optimizacija marshrutnoj seti gorodskogo obshhestvennogo transporta [Optimization of route network of city public transport]. *Vestnik AnGTU*, 2018; 12: 185–188 (in Russian).

28. Zhongzhen Ya., Bin Yu, Chuntian Ch. Parallel ant colony algorithm for bus network optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007; 22: 44–55.

29. Yu B., Yang Z. Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm. In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005; 5: 374–389.

Поступила 15.02.2019, принята к публикации 21.06.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мочалин Сергей Михайлович – д-р техн. наук, проф., декан факультета «Экономика и управление», заведующий кафедрой «Логистика», ORCID: 0000-0003-3651-0961, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: mochalin_sm@mail.ru).

Коллебер Юлия Андреевна – аспирантка кафедры «Логистика», ORCID: 0000-0002-6844-1895, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: uljachabol@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey M. Mochalin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Economics and Management Faculty, Head of the Logistic Department, ORCID: 0000-0003-3651-0961, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: mochalin_sm@mail.ru).

Julia A. Koleber – Postgraduate Student of the Logistic Department, ORCID: 0000-0002-6844-1895, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: uljachabol@mail.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Мочалин С.М. Рекомендации по исследованию материалов. Формирование разделов: «Введение», «Результаты» (1/2), «Обсуждение и заключение» (1/2). Проверка и корректура статьи.

Коллебер Ю.А. Исследование и анализ материалов. Формирование разделов: «Аннотация», «Материалы и методы», «Результаты» (1/2), «Обсуждение и заключение» (1/2). Оформление готового варианта статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Sergey M. Mochalin – recommendations for the materials' research; formation of such sections as Introduction, Results (1/2), Discussion and Conclusions (1/2); manuscript's verification and correction.

Julia A. Koleber – materials research and analysis; formation of such sections as Abstract, Materials and Methods, Results (1/2), Discussion and Conclusions (1/2); formatting of the finished manuscript's version.