НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 378.2:656.025
DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-7

Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 4 (95). С. 62–73

Логистика пассажирских перевозок на общественном транспорте для условий цифровой трансформации систем организации транспортного обслуживания

Андрей АКИМОВ

Галина БУБНОВА

Андрей Валерьевич Акимов[1], Галина Викторовна Бубнова[2]

[1] ГУП «Московский метрополитен», Москва, Россия.
[2] Российский университет транспорта, Москва, Россия.
✉ *[2] bubisek@mail.ru.*

АННОТАЦИЯ

Статья описывает применение моделей спецификации транспортных маршрутов для анализа потребности комбинированных пассажирских перевозок на популярных маршрутах населения в крупной городской агломерации. Раскрывается проблема управления цепочками поездок пассажиров на общественном транспорте (ОТ), а также сложность применения принципа «мультимодальности» на сети маршрутов населения, обусловленная несовпадением схем транспортных и пользовательских маршрутов.

Для исследования логистики перевозок пассажиров на ОТ введено понятие «пользователь общественным транспортом (ПОТ)», имеющий переменный статус отношения к потокам людей, пешеходов, пассажиров и транспорта. Описаны реестры основных параметров исследуемых маршрутов, необходимые для создания их «цифровых двойников».

Для управления цепочками поездок ПОТ, идентификации связанных участков транспортных маршрутов предлагается выделение в пассажиропотоке профильных течений, в которые включены ПОТ, имеющие общее транспортное поведение.

На основе моделей и алгоритмов сетевой близости к объектам транспортной инфраструктуры, визуализации «цифровых следов» ПОТ и результатов сравнения используемого и наилучшего варианта маршрута по моделируемым параметрам выделяются поведенческие профили ПОТ, а также регуляторы управления цепочками поездок.

Ключевые слова: городской общественный транспорт, метро, комбинированные перевозки, течения пассажиропотоков, транспортное поведение, сложные маршруты, длинные маршруты.

Для цитирования: Акимов А. В., Бубнова Г. В. Логистика пассажирских перевозок на общественном транспорте для условий цифровой трансформации систем организации транспортного обслуживания // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 4 (95). С. 62–73. DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-7.

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

© Акимов А. В., Бубнова Г. В., 2021

ВВЕДЕНИЕ

Высокие темпы развития транспорта городских агломераций в направлении увеличения протяжённости транспортной сети, связанности маршрутов различных видов пассажирского транспорта, а также организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения обеспечивают повышение уровня «транспортной доступности» и в целом качества общественного транспорта (ОТ). Наряду с улучшением этого важного показателя ОТ как у пассажиров, так и у организаций транспорта возникают определённые трудности.

Для пользователей становятся всё более сложными процессы построения и выбора индивидуального маршрута, обусловленные увеличением числа альтернативных вариантов перемещения по территории крупной городской агломерации с использованием различных маршрутов одного или нескольких видов транспорта. Как показали результаты наших исследований, например, в Московской городской агломерации доля простых маршрутов (без пересадок, с использованием одного вида транспорта) в повторяющихся в течение месяца поездках составляет около 35 %. С увеличением расстояния от места жительства мобильных субъектов до места их длительного пребывания (4–8 часов) количество пересадок на регулярные маршруты пассажирских перевозок растёт. На «длинных» маршрутах продолжительностью более 50 минут в среднем активное население делает 3 пересадки, включая пересадки на различные линии метрополитена.

У перевозчиков усложняются задачи «повышения качества транспортного обслуживания населения», управления перевозками пассажиров на таких маршрутах. Трудности их решения обусловлены непрозрачностью результатов исследований потребности населения в услугах общественного транспорта и перевозках пассажиров на различных участках маршрутной сети ОТ, отсутствием интегрированной транспортно-логистической системы общественного транспорта, а также сквозных технологий исследования потоков движения (пешеходов, пассажиров и транспорта), необходимых для синхронизации и «координации независимых процессов и участников» в сложной «мультиагентной системе» [1].

Целью настоящего исследования является определение современных инструментов анализа и управления цепочками поездок пассажиров на общественном транспорте городской агломерации. Задача – описание подходов к исследованию логистики перевозок пассажиров на ОТ, моделей спецификации связанных участков транспортных линий на популярных, сложных (комбинированных) маршрутах населения в территориальных границах мегаполиса.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Большое число публикаций посвящено анализу и оценки спроса на перевозки пассажиров применительно к конкретным видам городского пассажирского, отдельно – к уличному-наземному ОТ, метрополитену и железнодорожному транспорту, функционирующему в черте городской агломерации (город–пригород). Доминируют публикации по оценке общей потребности в услугах общественного транспорта на основе данных социологических и маркетинговых исследований. Отдельный блок научных работ затрагивает вопросы построения и выбора оптимального маршрута для пользователя мобильного приложения.

Успешная международная практика интеграции внеуличного и уличного транспорта в рамках единой системы комплексного транспортного обслуживания населения (СКТО-ОТ) определяет необходимость разработки решений, связанных с управлением цепочками поездок пассажиров, логистикой перевозок на всех видах общественного транспорта городской агломерации. Такое управление становится возможным, как отмечают авторы, на основе «логистической интеграции и сотрудничества, принципов мультимодальности», за счёт создания «центра управления городским общественным транспортом для обеспечения эффективной координации пассажирских перевозок» [2]. Авторами были предложены «алгоритмы построения оптимальных маршрутов и статистического анализа пассажиропотока», предназначенные «не для одного человека, а для всего населения города», адаптированные к «реальной транспортной сети с реальными расписаниями» наземного транспорта [3].

Необходимо заметить, что в этом и в большинстве опубликованных в открытой печати алгоритмах используются объёмные показатели пассажиропотоков на транспортных маршрутах, на отдельных участках транспортных линий, которые были получены на основе средств регистрации потока людей на входе в транспортную систему (на станцию),

выходе со станции, в местах пересадки [4]. В них не рассматривались отдельные группы пассажиров, имеющих общее транспортное поведение. Более того, в основе алгоритмов оптимизации работы общественного транспорта лежали среднестатистические значения числа поездок и обобщённые характеристики пассажиров ОТ. Соответственно, исследовался общий пассажиропоток без выделения в нём отдельных профильных течений.

Часто используемые в маркетинговых исследованиях характеристики пассажиров «вид деятельности и доход», как утверждают авторы [5], напрямую не связаны с регулярностью поездок, а значит, и малопригодны для идентификации «популярных» у населения маршрутов. Предложение о необходимости учёта «личных характеристик», «привычек», влияющих, соответственно, на показатель «регулярность» и на транспортное поведение людей, было отражено в работе [5].

Куан Лианг, Джианченг Венг (Quan Liang, Jiancheng Weng) и другие исследователи предложили «метод извлечения цепочки поездок отдельного пользователя» и метод анализа поездок пассажира на основе графической «модели индивидуального поведения», что позволило получить представление о «пространственном положении» объекта исследования и его реальном маршруте, необходимых для дальнейшего «прогнозирования поведения пассажира общественного транспорта» [6]. Информационной базой в предлагаемой технологии исследования служили данные транзакций смарт-карт ОТ. Как отмечают авторы, ранее применимость предлагаемых характеристик пассажиров, их «индивидуальные особенности не были изучены должным образом» [6].

В большинстве научных разработок (методик, алгоритмов, моделях анализа пассажиропотоков и оптимизации маршрутов для множества мобильных людей) применяется критерий – «время в пути» [7]. Часть работ посвящена исследованию влияния на выбор варианта маршрута мобильным субъектом критерия «качество обслуживания» (индекса «удовлетворённости качеством») и финансовой доступности услуг ОТ («стоимости проезда по маршруту»).

В работе Р. Р. Сидорчука и Д. М. Ефимовой предложено качество маршрута оценивать через «удовлетворённость» в «точках контакта» пассажира с объектами транспортной инфраструктуры [8], а не на участках движения различных потоков. Выбранные в этой работе «статусы респондентов», социальные группы – рабочие, специалисты, студенты, пенсионеры и временно безработные, по нашему мнению, малопригодны для определения популярных, сложных маршрутов ПОТ.

Процессный подход к спецификации потоков на маршрутах людей/транспорта на основе данных автоматической фиксации и обработки изображений (машинного зрения) был описан в работе [9]. Однако практическое его использование в большей степени относится к организации движения транспорта на линиях, определению режимов организованного на транспортном маршруте движения («профилям режимов работы» [9]), а не управлению цепочками поездок населения на ОТ.

Важным шагом в направлении совершенствования методов и инструментов исследования структурированного спроса на услуги общественного транспорта была попытка формализации транспортного поведения людей. Результаты этих исследований нашли отражение в публикациях, посвящённых зонированию карты города по уровню транспортной подвижности в привязке к социально-экономическим характеристикам жилых районов города и транспортной инфраструктуре. В частности, интересной разработкой по спецификации мест зарождения пассажиропотоков и исследованию потребности в комбинированных перевозках на «длинных» маршрутах населения является «гравитационная модель», в которой «интенсивности связей» определяются на основе «коэффициента экономического разрыва» [10]. Результаты этих исследований могут быть полезны, поскольку позволяют объяснить и прогнозировать транспортное поведение населения на территории экономических субъектов. Вместе с тем, они не позволяют определить регуляторы для управления цепочками поездок населения на ОТ и выявить участки транспортных маршрутов, востребованные различными поведенческими группами пассажиров.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В отличие от транспортных маршрутов, в которых определены дороги/пути, места для посадки и высадки пассажиров (начальные, конечные пункты, остановки/станции) и направление движения транспортных средств,

маршруты пользователей ОТ имеют включённые пешие участки, на которых население использует имеющуюся в городе уличнодорожную инфраструктуру. Пешие участки ПОТ указывают на отсутствие в определённом месте связанности транспортных маршрутов, а также отсутствие интегрированных остановок и оборудованных переходов, включённых в перечень объектов транспортной инфраструктуры.

Индивиды инициируют и вливаются в различные потоки уличной и транспортной инфраструктуры. Потребности в перевозке на ОТ у них возникают на тех участках индивидуальных (пользовательских) маршрутов, где они прибегают к услугам городского пассажирского транспорта.

Вероятностный характер перемещений людей по территории города и прилегающих к нему населённых пунктов усложняет решение задачи управления логистикой пассажирских перевозок на ОТ. Однако часть поездок и востребованность в комплексных услугах общественного транспорта вполне предсказуема. Это касается массовых, регулярных поездок и схем маятниковой миграции населения в определённые дни недели, месяца и часы.

Для связывания потоков людей, пешеходов, пассажиров, транспорта, очевидно, необходимо выделение ключевого элемента – инициатора движения. Нами был введён термин «пользователь общественным транспортом» (ПОТ). Под ним мы понимаем человека, как части социума и мобильного населения, который одновременно является: пешеходом (участником/частью движения потока людей, потока пешеходов); на объектах инфраструктуры общественного транспорта – пассажиром (частью пассажиропотока); при использовании личного автотранспорта на участках индивидуального маршрута – водителем (участником/частью движения транспортного потока). Это решение позволило нам связать данные о ПОТ из разных источников, создать базу знаний об их перемещениях и транспортном поведении (по ключевым атрибутам Smart-карт и мобильных устройств, зарегистрированных у сотовых операторов), связывать и объединять в потоки по различным признакам.

В отличие от метода «мультимодального планирования и оценки» Тодда Литмана [9] мы предлагаем использовать процессный, логистический подход к исследованию транспортных маршрутов и управлению цепочками поездок, перевозок пассажиров на ОТ с использованием цифровых технологий. Говорить о «мультимодальности» и о «мультимодальных пассажирских перевозках на ОТ», по нашему мнению, справедливо только в случае полной связанности транспортных маршрутов, совпадения схем индивидуальных маршрутов и маршрутов общественного транспорта городской агломерации. В нашем случае мы используем термины «комбинированные» перевозки пассажиров, «комбинированные» поездки людей на общественном транспорте.

В основе классификации участков транспортных маршрутов лежат схемы транспортного поведения пассажиров (ПОТ) и признаки «популярность», «предсказуемость» выбора, «нечувствительность» к параметру маршрута. Информационной базой для анализа предпочтений ПОТ являются данные о реально используемых маршрутах, осознанного или неосознанного им выбора маршрута из множества альтернативных вариантов маршрутов, который повторяется в схемах маятниковой миграции.

Для описания комбинированного маршрута, выбираемого ПОТ, и создания «цифровых двойников» популярных маршрутов мы используем классический набор параметров.

Для описания транспортных маршрутов:

$M_т = \{N_{ост}, T_т, P_т, Q_т\}$,

где $M_т$ – метамодель транспортных маршрутов;

$N_{ост}$ – модель реестра «Транспортные узлы, интегрированные остановки ОТ»;

$T_т$ – модель реестра «Время движения по участку транспортного маршрута»;

$P_м$ – модель реестра «Стоимость проезда на транспортном маршруте»;

$Q_т$ – модель реестра «Качество общественного транспорта в нотации LOS».

Для описания маршрутов ПОТ:

$M_{пот} = \{N_{пер}, T_{пот}, P_м, Q_{пот}, U\}$,

где $M_{пот}$ – метамодель характеристик комбинированного маршрута ПОТ;

$N_{пер}$ – модель реестра «Сложность комбинированного маршрута ПОТ»;

$T_{пот}$ – модель реестра «Время в пути следования по участку маршрута ПОТ»;

$P_м$ – модель реестра «Стоимость проезда по комбинированному маршруту определённого типа ПОТ»;

$Q_{пот}$ – модель реестра «Качество общественного транспорта на комбинированном маршруте ПОТ»;

U – модель реестра «Особо ценная характеристика комбинированного маршрута для ПОТ», включает латентные характеристики ($U_Н$), определяющие выбор маршрута.

Параметр маршрута *N* определяет количество переходов и их место на схеме маршрута. Учитываются переходы с пеших участков на участок транспортного маршрута, пересадки с одного транспортного маршрута на другой.

Параметры *T, P, Q, U* определяются по каждому участку маршрута ПОТ и объединяются при описании полного маршрута.

Сходство в ценностных установках мобильных субъектов в отношении качества ОТ на маршруте позволяет выделить в потоке пользователей общественным транспортом отдельные течения, которые объединяют латентные группы людей со схожим транспортным поведением.

Предлагаются следующие виды поведенческих профилей ПОТ:

• поведенческий профиль «деловой» ($W^В_Н$) → *T*;

• поведенческий профиль «экономный» ($W^Э_Н$) → *P*;

• поведенческий профиль «требовательный» ($W^Q_Н$) → *Q*;

• поведенческий профиль «рациональный» ($W^O_Н$) → *P/Q*;

• поведенческий профиль «особый» ($W^S_Н$) → *U*;

• поведенческий профиль «безразличный»[1] ($W^I_Н$).

Для экономического обоснования решений, связанных с управлением течениями пассажиропотоков, целесообразно выделение типов ПОТ/пассажир:

• Н1 – ПОТ, оплачивающий полную стоимость проезда по участку/участкам комбинированного транспортного маршрута;

• Н2 – ПОТ, имеющий социальную карту с правом бесплатного проезда на ОТ;

• Н3 – ПОТ, имеющий скидку с тарифа (социальную карту учащегося, студента).

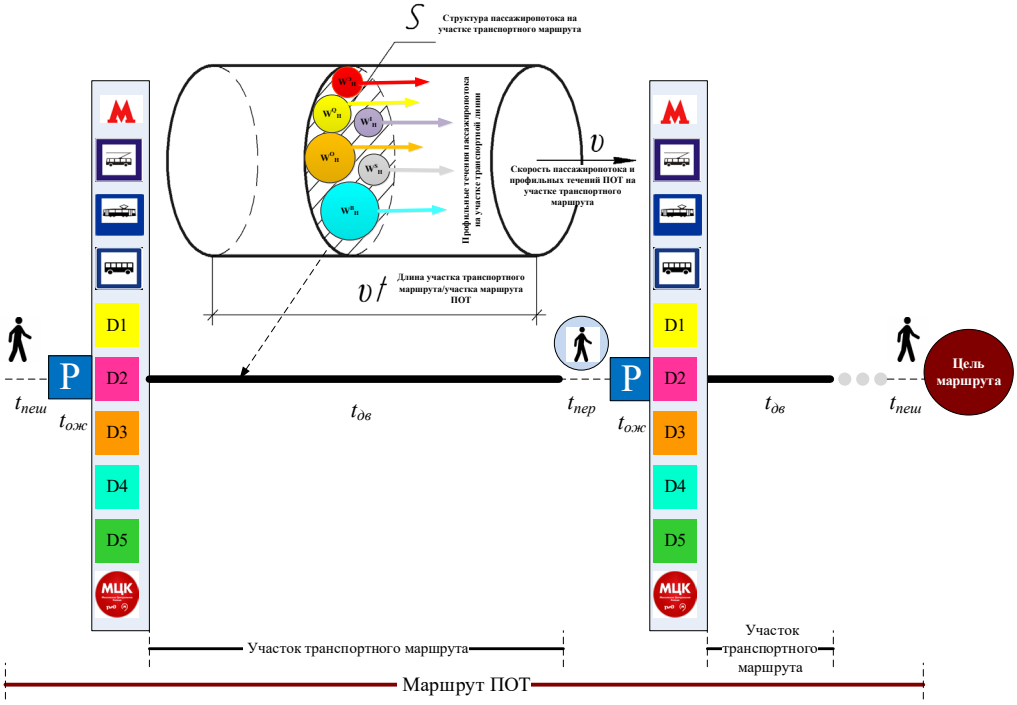
[1] Пользователи данного профиля используют нерациональный маршрут в силу: 1) отсутствия доступной информации о наилучшем для них альтернативном варианте; 2) нежелания искать оптимальный вариант по причине сложности самостоятельно анализировать и оценивать альтернативные варианты; 3) привычки. 1–2 – управляемое поведение ПОТ; 3 – частично управляемое поведение ПОТ.

В этом случае структура маршрута ПОТ и пассажиропотока на участках транспортных маршрутов, задействованных ПОТ, можно представить в виде следующей схемы, рис. 1.

С учётом развития и широкого внедрения цифровых технологий на транспорте становится возможной идентификация и регистрация выбранного участка транспортного маршрута не только различными типами, но и поведенческими профилями ПОТ.

Для исследования структуры индивидуального маршрута, цепочки поездок на общественном транспорте конкретного типа ПОТ широко используются транзакции со смарт-карт мобильного субъекта. В зарубежных транспортных системах имеется полная информация о перемещении типа пассажира (статуса плательщика) по участкам транспортных маршрутов, поскольку организованная система турникетов фиксирует вход людей на объект ОТ, их переход (пересадку) на другие транспортные линии и выход. В российской практике учёт количества и типа пассажира в разрезе тарифной схемы оплаты проезда ведётся только на входе на объекты общественного транспорта. В Научно-образовательном центре «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» (НОЦ ЦВТС) Российского университета транспорта разработаны «модели сетевой близости в информационных системах на транспорте» [11], позволяющие отобразить траектории перемещений по городу людей (без привязки к персональным данным) и построенные на информации, полученной от сотовых операторов. Это позволяет «увидеть» процесс формирования потоков пешеходов, его трансформацию в существенный по объёму пассажиропоток, а также движение по зонам города с возможной привязкой к объектам улично-дорожной и транспортной инфраструктуры без «тотального слежения» за конкретным человеком. На основе «распределения входов/выходов по времени» и «зонирования станций» [12] метрополитена (часто используемого вида транспорта) становится возможной, в этом случае, идентификация популярных, сложных пользовательских маршрутов.

Решение о перемещении по конкретному маршруту в большинстве случаев ПОТ принимает интуитивно, опираясь на опыт или на результаты экспресс-оценки по значимым для него параметрам маршрута. И это не только время и стоимость проезда. В последнее время



Условные обозначения: $t_{пеш}$ – время прохождения пешего участка маршрута; $t_{ож}$ – время ожидания транспортного средства; $t_{дв}$ – время движения транспортного средства по участку транспортного маршрута; $t_{пер}$ – время перехода на другой транспортный маршрут.

Рис. 1. Универсальная модель структуры маршрута ПОТ (разработано авторами).

значимым становится уровень удовлетворённости качеством ОТ. Последний параметр характеризуют известные индексы лояльности клиентов «SQI (методики SERVQUAL), Customer Satisfaction Index – CSI, американский (ACSI) и общеевропейский (EPSI) индекс» [13], которые применяются на практике в основном для качественного анализа городских улиц, оценки качества пешеходных зон, включая перекрёстки, а также классификации условий и характера движения транспортных потоков, организованных на улично-дорожной сети.

Очевидно, что для ПОТ важными являются значения элементов этого параметра, который отражает качество всех подсистем ОТ на его индивидуальных маршрутах. В связи с этим модель реестра «Качество общественного транспорта на комбинированном маршруте ПОТ» будет включать следующие оценки:

$Q = f(Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7)$,

где $Q1$ – оценка уровня качества *улично-дорожной инфраструктуры* на пешем участке пути ПОТ *до объекта инфраструктуры* общественного транспорта и доступности ОТ по времени и регулярности его работы.

Оценка $Q1$ определяется следующим образом:

$Q1 = f(Q10, Q11, Q12)$,

где $Q10$ – оценка удобства парковок для личного автотранспорта с учётом риска отсут-

ствия парковочных мест в заданном временном интервале на участке комбинированного маршрута ПОТ;

Q11 – оценка качества дорог, предназначенных для пешеходного движения (включая дорожное покрытие, освещение), а также схем организации перекрёстков, работы светофоров, используемых на начальном участке маршрута ПОТ до места входа на объект сооружения ОТ;

Q12 – оценка удобства на начальном участке маршрута ПОТ, места остановки наземного городского транспорта, железнодорожной станции, станции метрополитена и доступности ОТ по времени и регулярности работы.

Оценка *Q2* – качества при *входе на объект инфраструктуры* общественного транспорта (железнодорожную станцию, станцию метрополитена, остановку наземного городского транспорта) – определяется следующим образом:

Q2= f (Q21, Q22, Q23, Q24, Q25, Q26, Q27, Q28),

где *Q21* – оценка уровня качества работы и обустройства входа на объект ОТ;

Q22 – оценка уровня физического комфорта (очереди прохождения через пункт входа на объект ОТ с учётом риска неисправности внешних относительно турникетов дверей);

Q23 – оценка уровня качества атмосферной среды в закрытом помещении, регулируемого транспортными организациями (загрязнения[2], свежести[3] и температуры воздуха, шума, освещения) при входе на объект транспортной инфраструктуры;

Q24 – оценка уровня безопасности для здоровья и жизни (наличие систем защиты от нежелательных погодных явлений: осадков, сильного ветра, жары/холода; средств идентификации людей с признаками инфекционных заболеваний, средств обеззараживания; систем противодействия социальным правонарушениям; систем безопасности и уровня чистоты пешеходных участков при входе на объект транспортной инфраструктуры);

Q25 – оценка уровня эстетического комфорта (дизайна, ненавязчивого и полезного звукового и визуального сопровождения при входе на объект инфраструктуры ОТ);

Q26 – оценка уровня информационного комфорта (систем навигации, персональных предложений по оптимизации индивидуальных маршрутов с использованием ОТ);

Q27 – оценка уровня качества персонала общественного транспорта на участке входа на объект ОТ (доступности, профессионализма, вежливости, оперативности решения проблемных вопросов);

Q28 – оценка уровня качества работы платёжных систем, используемых ПОТ в разрезе способов обслуживания (приобретение билетов через терминалы, кассы, использование сети сотовых операторов, Internet).

Оценка *Q3* – уровня качества *на объекте инфраструктуры* общественного транспорта (в вестибюле, на эскалаторе, на платформе, остановке наземного городского транспорта) – определяется следующим образом:

Q3 = f (Q31, Q32, Q33, Q34, Q35, Q36),

где *Q31* – оценка уровня качества среды внутреннего пространства закрытого помещения, регулируемой транспортными организациями (загрязнения, свежести, температуры воздуха, шума, освещения) в вестибюле, на эскалаторе, платформе, остановке наземного городского транспорта;

Q32 – оценка уровня безопасности для здоровья и жизни (систем защиты от нежелательных погодных явлений: осадков, сильного ветра, жары/холода; средств идентификации людей с признаками инфекционных заболеваний, средств обеззараживания; систем противодействия социальным правонарушениям; систем безопасности и чистоты пешеходных участков на объекте транспортной инфраструктуры) на платформе, остановке наземного городского транспорта;

Q33 – оценка уровня эстетического комфорта (дизайна, ненавязчивого и полезного звукового и визуального сопровождения на объекте инфраструктуры ОТ: в вестибюле, на эскалаторе, на платформе, остановке наземного городского транспорта);

Q34 – оценка уровня физического комфорта на объекте инфраструктуры общественного транспорта (в нотации уровня обслуживания (level of service – LOS, например [13]), который рассматривается «как качественная мера влияния ряда факторов, скорость, время

---

[2] Оценка по ощущению и измерениям наличия посторонних запахов (включая токсины, канцерогены, выхлопы), газов, твёрдых частиц (в форме пыли, сажи, пыльцы, дыма и др.), инфекции (в форме плесени, вирусов, бактерий) в количестве, превышающем допустимые нормы.

[3] Оценка по ощущению и измерениям уровня насыщенности воздуха необходимыми для дыхания ПОТ компонентами в закрытом помещении (соотношение углекислого газа и кислорода).

в пути, перебои в движении, свобода манёвра, безопасность, комфорт и удобство» [14]), которая корректируется с учётом риска замедления скорости движения и увеличения плотности пассажиропотока, вызванных повторением случаев неисправности в работе технических средств;

Q35 – оценка уровня информационного комфорта (систем информационной поддержки по навигации в ОТ);

Q36 – оценка уровня качества персонала общественного транспорта в вестибюле, на станции (его доступности, профессионализма, вежливости, оперативности решения проблемных вопросов) на участке маршрута ПОТ.

Оценка *Q4* – уровня качества *в салоне транспортного средства* – определяется следующим образом:

Q4= f (Q41, Q42, Q43, Q44, Q45, Q46),

где *Q41* – оценка уровня качества физического комфорта в салоне транспортного средства для типа ПОТ с учётом дня недели, времени суток, номера вагона в поездах метрополитена и пригородной железнодорожной компании (чел./м^2);

Q42 – оценка уровня качества атмосферной среды в салоне транспортного средства (загрязнения, свежести и температуры воздуха, шума, освещения);

Q43 – оценка уровня безопасности для здоровья и жизни (систем идентификации людей с признаками инфекционных заболеваний, систем оповещения и противодействия социальным правонарушениям; чистоты в салоне);

Q44 – оценка уровня эстетического комфорта салона транспортного средства (дизайна, ненавязчивого, полезного звукового и визуального сопровождения во время нахождения ПОТ в салоне, «инновационности» технических и конструктивных решений, видимых ПОТ);

Q45 – оценка уровня информационного комфорта (качества мобильной связи: систем навигации; персональных рекомендаций по оперативной корректировке индивидуального маршрута с учётом задержки информации об изменениях параметров СКТО-ТО на планируемых участках комбинированного маршрута ПОТ);

Q46 – оценка уровня качества персонала ОТ (водителя, кондуктора наземного общественного транспорта) на участке маршрута ПОТ.

Оценка *Q5* – уровня качества *пересадочного узла* (перехода на другой транспортный маршрут, линию маршрутной сети) – определяется следующим образом:

Q5 = f (Q51, Q52, Q53, Q54, Q55),

где *Q51* – оценка уровня качества перехода, регулируемого транспортными организациями (загрязнения, свежести, температуры воздуха, шума, освещения);

Q52 – оценка уровня безопасности перехода для здоровья и жизни (систем противодействия социальным правонарушениям; чистоты переходов);

Q53 – оценка уровня эстетического комфорта перехода (дизайна, ненавязчивого и полезного звукового и визуального сопровождения на переходе);

Q54 – оценка уровня физического комфорта[4] перехода (объекта инфраструктуры ОТ) с учётом риска замедления скорости движения и увеличения плотности пассажиропотока, вызванных неисправностью в работе технических средств, несовершенством системы организации и управления движением;

Q55 – оценка уровня информационного комфорта (систем навигации в ОТ).

Оценка *Q6* – уровня качества *на выходе из объекта инфраструктуры* общественного транспорта – определяется следующим образом:

Q6= f (Q61, Q62, Q63, Q64, Q65),

где *Q61* – оценка уровня качества выхода из объекта инфраструктуры ОТ, регулируемого транспортными организациями (загрязнения, свежести, температуры воздуха, шума, освещения);

Q62 – оценка уровня безопасности выхода из объекта инфраструктуры ОТ для здоровья и жизни (систем противодействия социальным правонарушениям; чистоты переходов);

Q63 – оценка уровня эстетического комфорта объекта выхода (дизайна, ненавязчивого и полезного звукового и визуального сопровождения на выходе);

Q64 – оценка уровня физического комфорта на выходе из объекта инфраструктуры ОТ с учётом риска замедления скорости движения и увеличения плотности пассажиропотока, вызванных неисправностью в работе технических средств, несовершенством системы организации и управления движением;

[4] Включает оценку высоты ступенек лестницы, удобство перемещения ручной клади и других негабаритных объектов на колёсах, оценку работы эскалаторов.

Q65 – оценка уровня информационного комфорта на выходе из объекта инфраструктуры ОТ (систем навигации на финальном участке пути ПОТ).

Оценка *Q7* – оценка качества *улично-дорожной инфраструктуры на пешем участке пути от объекта инфраструктуры ОТ до объекта назначения ПОТ* – определяется следующим образом:

$Q7 = f(Q71, Q72)$,

где *Q71* – оценка качества дорог, предназначенных для пешеходного движения (включая дорожное покрытие, освещение), а также схем организации перекрёстков, работы светофоров, используемых на финальном участке маршрута ПОТ до места объекта назначения;

Q72 – оценка уровня удобства на финальном участке маршрута ПОТ места остановки наземного городского транспорта, железнодорожной станции, станции метрополитена.

Кроме качественных показателей, указанных выше, необходимо учитывать также U_h – реестр особых параметров маршрута, значимых для определенного типа и поведенческого профиля ПОТ, который включает скрытое, неявное требование (условие) из реестра «Качество ОТ на комбинированном маршруте».

Отличия нашего подхода к оценке параметра «качество» маршрута от предлагаемого в работе Р. Р. Сидорчука и Д. М. Ефимовой [8] включают: объект качественной оценки (участок движения потока ПОТ), набор индексов качества и статусы, типы и поведенческие профили мобильных субъектов. В структуре индексов качества маршрута включены:

• индекс физической доступности объекта транспортной инфраструктуры на начальном и конечном участке пути, где используется улично-дорожная инфраструктура города;

• индекс безопасности для жизни и здоровья ПОТ;

• индекс, отражающий уровень риска замедления движения на участке маршрута ПОТ или ухудшения характеристики объекта транспортной инфраструктуры, полученный на основе статистических измерений;

• индекс «уникальной характеристики» из реестра особо значимых для поведенческого профиля ПОТ (U).

Для исследования используемых ПОТ маршрутов необходимо формальное описание допустимого множества комбинированных маршрутов по описанным выше ключевым параметрам. Это описание становится возможным по результатам парного сравнения «реально используемого» и «наилучшего» варианта для определённого типа и поведенческого профиля ПОТ.

Обозначим сравниваемые варианты *i* и *i+1*, тогда параметры маршрутов будут иметь следующее обозначение:

N_i, N_{i+1} – количество пересадок (сложность комбинированного маршрута), ед.;

T_i, T_{i+1} – время в пути следования по комбинированному маршруту (мин);

P_i, P_{i+1} – общая стоимость проезда по комбинированному маршруту (руб.);

Q_i, Q_{i+1} – интегрированная оценка качества комбинированного маршрута;

U_i, U_{i+1} – ценная для ПОТ характеристика, особый сервис на комбинированном маршруте.

Модель описания множества маршрутов ПОТ имеет следующий вид:

$$SO = \Big\{\big[(N_i = N_{i+1}) \vee (N_i > N_{i+1}) \vee (N_i < N_{i+1})\big] \wedge$$
$$\big[(T_i = T_{i+1}) \vee (T_i > T_{i+1}) \vee (T_i < T_{i+1})\big] \wedge$$
$$\big[(P_i = P_{i+1}) \vee (P_i > P_{i+1}) \vee (T_i < T_{i+1})\big] \wedge$$
$$\begin{bmatrix} ((U_i = 0) \wedge (U_{i+1} = 1)) \vee ((U_i = 1) \wedge (U_{i+1} = 0)) \vee \\ \vee ((U_i = 0) \wedge (U_{i+1} = 0)) \end{bmatrix} \vee$$
$$((U_i = 1) \wedge (U_i = 1))\Big]\Big\}.$$

Сравнительный анализ характеристик используемых и альтернативных маршрутов ПОТ позволил нам сформировать описание 162 схем выбора (SO_j) в части предсказуемости и чувствительности к определённым параметрам комбинированного маршрута для различных поведенческих профилей ПОТ.

Фрагмент реестра этого описания схем поведения ПОТ представлен в табл. 1.

На основе повторения маршрута и знания его параметров возможно решение задачи типизации ПОТ, определения его поведенческого профиля. Модель идентификации поведенческих профилей ПОТ на основе используемых схем (SO_j) представлена на рис. 2.

В результате такой идентификации ПОТ следующим шагом становится выделение профильных течений (включающих ПОТ с одинаковыми поведенческими профилями) в пассажиропотоке на различных участках транспортных маршрутов и определение регуляторов, влияющих на востребованность

Таблица 1

Фрагмент реестра описания схем поведения ПОТ (составлено авторами)

Обозначение схемы условий выбора маршрута ПОТ	Характеристика поведения ПОТ и аргументация выбора комбинированного маршрута по результатам парного сравнения альтернативных вариантов
SO-1	непредсказуемое поведение ПОТ и выбор маршрута
… .	… .
SO-6	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от наличия уникального сервиса, нечувствительность к качеству ОТ на маршруте
… .	… .
SO-25	иррациональное поведение ПОТ, нечувствительность к стоимости проезда и времени в пути следования
… .	… .
SO-38	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от времени в пути следования и наличия уникального сервиса на маршруте
… .	… .
SO-50	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от времени в пути следования, стоимости проезда и наличия уникального сервиса
… .	… .
SO-57	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от качества ОТ на маршруте за счёт его усложнения (увеличение количества пересадок)
… .	… .
SO-63	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от качества ОТ, допустимость усложнения маршрута, нечувствительность к стоимости проезда
… .	… .
SO-65	иррациональное поведение ПОТ, нечувствительность к сложности маршрута, качеству ОТ на маршруте и стоимости проезда
… .	… .
SO-81	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от качества ОТ на маршруте, нечувствительность к сложности маршрута, времени в пути и стоимости проезда
… .	… .
SO-88	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от стоимости проезда, качества ОТ на маршруте и наличия уникального сервиса, допустимость усложнения маршрута, нечувствительность ко времени в пути следования
… .	… .
SO-96	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от времени в пути следования и наличия уникального сервиса, допустимость усложнения маршрута, нечувствительность к качеству ОТ на маршруте
… .	… .
SO-101	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от времени в пути следования, допустимость усложнения маршрута, нечувствительность к стоимости проезда и качеству ОТ на маршруте
… .	… .
SO-106	предсказуемое, рациональное поведение ПОТ, зависимость выбора от времени в пути следования, стоимости проезда, качества ОТ и наличия уникального сервиса, допустимость усложнения маршрута
… .	… .
SO-120	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от сложности маршрута и наличия уникального сервиса, нечувствительность к стоимости проезда и качеству ОТ на маршруте
… .	… .
SO-149	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от сложности маршрута (количества пересадок), времени в пути следования, нечувствительность к качеству ОТ на маршруте
… .	… .
SO-159	предсказуемое, рациональное поведение ПОТ, зависимость выбора от сложности маршрута, времени в пути следования, стоимости проезда и качества ОТ на маршруте
… .	… .
SO-162	предсказуемое поведение ПОТ, зависимость выбора от сложности маршрута, времени в пути следования, стоимости проезда и наличия уникального сервиса, нечувствительность к качеству ОТ на маршруте

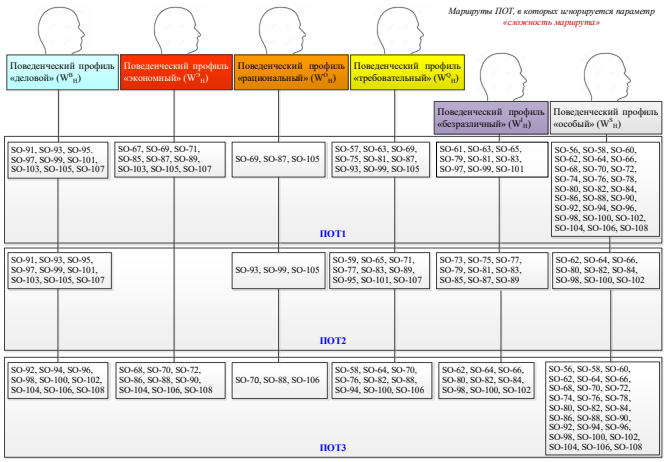


Рис. 2. Идентификация поведенческих профилей ПОТ по параметрам маршрута (разработано авторами).

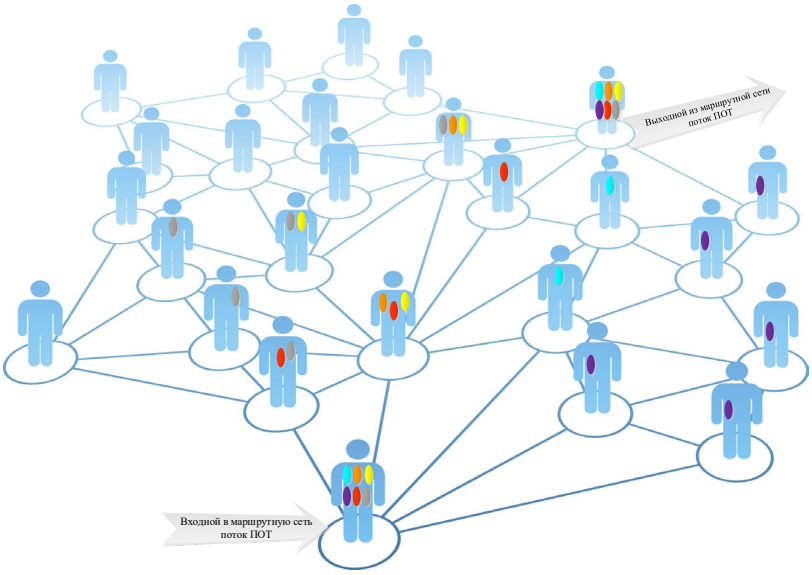


Рис. 3. Маршрутная сеть ПОТ (разработано авторами).

транспортных услуг на конкретном участке популярных маршрутов у населения.

На рис. 3 схематично представлены маршруты движения потока пользователей общественным транспортом в границах городской агломерации с метками поведенческих профилей на участках пеших и транспортных маршрутов.

На схеме видны связанные участки маршрутной сети ПОТ и регуляторы, которые легко определяются по схеме транспортного поведения ПОТ.

ВЫВОДЫ

Комплексные исследования цепочек поездок ПОТ и потоков людей/пешеходов/пассажиров/транспорта на популярных у населения сложных маршрутах с использованием «цифровых следов» перемещения людей, алгоритмов привязки к объектам транспортной инфраструктуры и выделения связанных течений пассажиропотоков на участках транспортных линий на основе бесконтактного способа определения «игнорируемых» в индивидуальных маршрутах параметров создают необходимые условия не только для повышения качества транспортного обслуживания населения, но и для эффективной организации работы ОТ в динамично растущих городских агломерациях.

В зависимости от степени загруженности транспортных линий, значений показателей пропускной и провозной способности, а также поведенческой структуры пассажиропотока на участках транспортной инфраструктуры

актуальной становится следующая задача – «тонкая настройка» ИТ-приложений экосистемы MaaS. Поскольку в концепции MaaS «мобильность» рассматривается «как услуга», она должна учитывать «потребности всех типов пользователей, должно быть внедрено понятие групп пользователей» [15]. Для организаций транспорта – это инструмент для рационального распределения пассажиропотоков по маршрутам ОТ за счёт изменения времени ожидания и времени движения транспортного средства на линии, параметров LOS, параметра пересадочности (при организации интегрированных остановок различных транспортных маршрутов, строительстве новых дорог, линий, транспортно-пересадочных узлов), обеспечивающий повышение эффективности использования транспортной инфраструктуры и работы перевозчиков. Для ПОТ – это качественная комплексная услуга общественного транспорта с более высоким уровнем потребительской ценности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бубнова Г. В., Покусаев О. Н., Акимов А. В. Управление изменениями в пассажирском комплексе мегаполиса в условиях цифровой трансформации экономики // Сборник научных трудов III международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация в экономике транспортного комплекса», 20 октября 2020, РУТ (МИИТ). – М.: Научно-издательский центр Инфра-М, 2021. – С. 63–69. ISBN 978-5-16-016779-4. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45804303&pff=1. Доступ 15.04.2021.

2. Gafforov, M., Tursunboyev, M. Logistic management of urban public transport. Bulletin of Science and Practice, 2021, Vol. 7, No. 4. DOI: https://doi.org/10.33619/2414-2948/65/39.

3. Зуева О. Н., Журавская М. А., Сидоренко А. М. Логистическая интеграция и координация управления городским общественным транспортом // Известия УрГЭУ. – 2018. – Т. 19. – № 1. – С. 51–61. DOI: 10.29141/2073-1019-2018-19-1-5.

4. Cao, Shouhua; Yuan, Zhenzhou; Zhang, Chiqing; Zhao, Li. LOS Classification for Urban Rail Transit Passages Based on Passenger Perceptions. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, Vol. 9, No. 2, pp. 99–104. DOI: 10.1016/S1570-6672(08)60059-8.

5. Qi, Ouyang; Yongbo, Lv; Yuan, Ren; Jihui, Ma; Jing, Li. Passenger Travel Regularity Analysis Based on a Large Scale Smart Card Data. Journal of Advanced Transportation, Vol. 2018, 12 p, Article ID 9457486. DOI: https://doi.org/10.1155/2018/9457486.

6. Quan, Liang; Jiancheng, Weng; Wei, Zhou; Selene, Baez Santamaria; Jianming, Ma; Jian, Rong. Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction. Journal of Advanced Transportation, 2018, 14 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2018/3859830.

7. Trofimov, S. P., Druzhinina, N. G., Trofimova, O. G. Algorithms for constructing optimal paths and statistical analysis of passenger traffic. XI International scientific and technical conference «Applied Mechanics and Dynamics Systems» 14–16 November 2017, Omsk, Russian Federation. Journal of Physics Conference Series, 2018, Vol. 944, pp. 012117. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012117.

8. Сидорчук Р. Р., Ефимова Д. М. Исследование удовлетворённости услугами Московского городского пассажирского транспорта // Маркетинг в России и за рубежом. – 2015. – № 6. – С. 32–40. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25630706. Доступ 15.04.2021. DOI: 10.13140/RG.2.1.4209.0002.

9. Litman, T. A. Introduction to Multi-Modal Transportation Planning. Principles and Practices. Victoria Transport Policy Institute, 23 April 2021, 21 p. [Электронный ресурс]: https://www.vtpi.org/multimodal_planning.pdf. Доступ 15.04.2021.

10. Li, Duo; Zhang, Yan. Study on the Method of Defining the Spatial Scope of Urban Agglomeration. E3S Web of Conferences. 5th International Conference on Advances in Energy and Environment Research, 2020, Vol. 194, pp. 05032. DOI: 10.1051/e3sconf/202019405032.

11. Намиот Д. Е., Покусаев О. Н., Чекмарев А. Е. Модели сетевой близости в информационных системах на транспорте // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – № 9. – С. 53–58. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43925429. Доступ 15.04.2021.

12. Намиот Д. Е., Акимов А. В., Некраплённая М. Н., Покусаев О. Н. Куда и когда – об одном подходе к анализу трафика в городе // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – № 3. – С. 44–48. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44853584. Доступ 15.04.2021.

13. Kittelson, W. K. Historical Overview of the Committee on Highway Capacity and Quality of Service. In: Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity, pp. 5–16. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/267221464_Historical_Overview_of_the_Committee_on_Highway_Capacity_and_Quality_of_Service/link/561e7a5008aecade1accbe65/. Доступ 15.04.2021.

14. Highway Capacity Manual. The National Academy of Sciences, Transportation Research board, 2000. ISBN 0-309-06681-6.

15. Esztergár-Kiss, D., Kerényi, T. Creation of mobility packages based on the MaaS concept. Travel Behavior and Society, 2020, Vol. 21, pp. 307–317. DOI: 10.1016/j.tbs.2019.05.007.

Информация об авторах:

***Акимов Андрей Валерьевич** – начальник службы Московских центральных диаметров ГУП Московский метрополитен, Москва, Россия, akimov_post@mail.ru.*

***Бубнова Галина Викторовна** – доктор экономических наук, заместитель директора Научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы», профессор Института экономики и финансов Российского университета транспорта, Москва, Россия, Bubisek@mail.ru.*

Статья поступила в редакцию 16.04.2021, дополнена 06.08.2021, одобрена после рецензирования 19.08.2021, принята к публикации 26.08.2021.