

ПАВЕЛ ДОНСКОЙ, ПЕТР МАЛАХАЛЬЦЕВ ON DEMAND:

АДАПТИВНЫЕ МАРШРУТЫ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Донской Павел Михайлович, руководитель проектов, ООО «РoadAP»; Российская Федерация, 420500, Республика Татарстан, Иннополис, ул. Университетская, 7.

E-mail: pavel.donskoy@gmail.com

Малахальцев Петр Михайлович, технический директор, ООО «ФСТ-Интегро»; Российская Федерация, 420500, Республика Татарстан, Иннополис, ул. Спортивная, д. 102.

E-mail: malakhaltsev@gmail.com

Статья посвящена адаптивному общественному транспорту и принципам его работы. Предполагается, что шаттлы разной вместительности перевозят пассажиров по запросу, без фиксированных остановок с возможностью корректировать маршрут. Маршрут строится на основе многофакторной модели, цель которой — минимизация значений определенных параметров: пройденное шаттлом расстояние, время ожидания и время в пути для пассажира. Описывается механизм балансировки этих параметров. Приводятся данные по эксплуатации маршрута общественного транспорта на базе гибких маршрутов по запросу в городе Иннополис в период с июня 2018-го по январь 2020 года. Представлены результаты сравнительного моделирования транспортных систем разной степени гибкости на примере конкретной дорожной сети: при одинаковых заданных параметрах по числу транспортных средств и пассажиропотоку авторы сравнили технико-экономические показатели и параметры качества сервиса маршрутных систем разной степени гибкости. В рамках модели доказана эффективность сочетания адаптивных маршрутов разной степени гибкости. Принцип сочетания маршрутов: часть транспортных средств выделяется на обслуживание хорошо прогнозируемых потоков пассажиров с допуском небольших отклонений от основного маршрута, остальные же транспортные средства размещаются в районе функционирования сервиса без ограничений по маршруту следования и графику движения, перемещаясь в те районы и на те направления, которые становятся более востребованными в течение суток.

Ключевые слова: общественный транспорт; пассажирский транспорт; микротранзитные перевозки; гибкие маршруты; пассажирские перевозки; облачный сервис; умный город

Цитирование: Донской П.М., Малахальцев П.М. (2019) On demand: адаптивные маршруты общественного транспорта // Городские исследования и практики. Т. 4. № 4. С. 93–125. DOI: <https://doi.org/10.17323/usp44201993-125>

Введение

Организация эффективной системы пассажирского транспорта — одна из главных задач, стоящих перед современными городами. Существенная доля бюджетов наиболее крупных городов мира приходится на расходы по организации общественного транспорта. Рост населения городов, увеличение количества транспортных средств на жителя при одновременной невозможности расширять пропускную способность дорожного полотна и площадей парковочных пространств приводят к серьезным экологическим проблемам и экономическим потерям, связанным с простоями в пробках и расходами на обслуживание инфраструктуры.

В последнее время меняется подход к организации транспортных систем. На смену вопросу «Какое количество транспортных средств может пропустить дорожная сеть?» приходит вопрос «Какое количество пассажиров может пропустить дорожная сеть?». Старая парадигма оценивала транспортную систему в первую очередь по скорости, комфортабельности и доступности поездок на автомобиле. Новая парадигма более всесторонняя и мультимодальная [Litman, 2013]. Перевозка пассажиров шаттлами, автобусами и другими видами общественного транспорта является более эффективной по сравнению с личным транспортом, поскольку автобус занимает меньшую площадь дорожного полотна из расчета на одного пассажира, его не нужно парковать и занимать парковочное место. В личном транспорте чаще всего неэффективно используется даже имеющееся небольшое число посадочных мест — в персональном автомобиле в среднем

едет 1–2 человека, включая водителя, а коэффициент использования личного транспортного средства колеблется в районе 5% (по времени использования) [Burgstaller S. et al., 2017].

Растущая урбанизация и потребность в мобильности зачастую приводят к перегрузке существующей инфраструктуры: дороги и парковочные пространства загружены до предела. В связи с этим на первый план выходит использование транспортных средств, а не владение ими, что отражает общий тренд движения к шеринговой экономике [Ganter R., Berrisford C., Dennean K., Dessloch S., 2017]. Примеры такой экономики — это сервисы Airbnb (совместное использование отпускного жилья) и eBay (вторая жизнь для вещей, бывших в употреблении). В этот тренд укладывается и разработка *vehicle-sharing* решений, *MaaS* (mobility as a service) решений: это сервисы, подразумевающие совместное использование транспортных средств в качестве альтернативы личному транспорту. *MaaS* становится областью применения передовых технологий, развиваясь от статичного Dial-a-Ride Transit (бронирование «по звонку» на день вперед с последующим ручным планированием маршрута) до современных динамичных приложений с нейросетями и машинным обучением «под капотом». Формы *MaaS* — это такси-агрегаторы (Uber, Yandex.Такси, LYFT и DiDi), сервисы совместных поездок (BlaBlaCar), каршеринговые сервисы, *vanpooling*-решения (VIA) и другие.

В данной статье мы сконцентрируемся на *vanpooling*-решениях (решениях, фокусирующихся на совместном использовании шаттлов, минивэнов), которые теоретически могут обеспечить более доступный по сравнению с такси сервис и, таким образом, сделать мобильность доступнее для более широких слоев населения. Организация *vanpooling*-сервисов является сложной задачей, при решении которой необходимо учитывать большое количество параметров. При наличии сегодня на рынке успешно работающих решений необходимо помнить и анализировать опыт закрытых по разным причинам *vanpooling*-сервисов Kutsuplus и BRIDJ. Одной из главных внутренних проблем таких сервисов — не считая, например, внешнего правового регулирования — является сложность нахождения баланса между прибыльностью сервиса и поддержанием необходимого уровня его качества [Liyanage, Dia, 2020].

С этой проблемой мы столкнулись в ходе реализации проекта по созданию *vanpooling*-сервиса в городе Иннополисе. Для его решения мы прошли путь от упрощенного MVP-решения (решения с минимальной достаточной функциональностью), основанного на однофакторной оптимизационной модели, до многофакторной сбалансированной модели, в которой целевая функция — это минимизация значений параметров: пройденное шаттлом расстояние, время ожидания и время в пути для пассажира. В настоящей статье мы продемонстрируем разработанную нами методику моделирования, расчета и оценки технико-экономических параметров гибких систем маршрутизации, опишем алгоритм расчета гибких маршрутов, приведем данные по работе решения в Иннополисе, проведем анализ результатов моделирования транспортных систем разной степени гибкости и сделаем вывод о применимости *vanpooling*-сервиса в условиях современных городов.

Задача нашего исследования и приведенных здесь результатов — добиться лучшего понимания места адаптивных систем общественного транспорта и способов организации экономически эффективных сервисов в этой сфере.

Понятие и виды адаптивного общественного транспорта. Примеры сервисов

В соответствии с определением Генерального директората энергетики и транспорта Еврокомиссии, адаптивный общественный транспорт (demand responsive transport, DRT) — это «новые ориентированные на пользователя виды общественного транспорта, характеризующиеся гибкими маршрутами и расписанием движения малых/средних транспортных средств в режиме совместной поездки между местами посадки и высадки в соответствии с потребностями пассажиров» [Linares, Barceló, Carmona, Montero, 2016]. Изначально DRT-системы разрабатывались, чтобы обеспечить транспортное сообщение в районах с низким пассажиропотоком, где регулярные автобусы неэффективны. Подход получил развитие в виде множества типов транспортных сервисов по схеме *ride-sharing*.

Адаптивный общественный транспорт — это форма организации пассажирских перевозок, при которой транспортные средства строят свои маршруты на основе текущего запроса на поездки со стороны пассажиров: время отправления и прибытия, остановочные станции, точки маршрута и другие параметры формируются динамически. По своей сути такси-сервис также

является адаптивным пассажирским транспортом, а такси-шеринговые сервисы (которые позволяют водителю такси подобрать по дороге нескольких пассажиров, направляющихся в разные точки) являются переходной формой между такси и общественным транспортом. Но здесь мы рассматриваем использование принципа «транспорт по запросу» применительно к общественному транспорту, то есть транспортным средствам вместимостью более 4 пассажиров. В англоязычной литературе для обозначения того, что мы в настоящей статье называем адаптивным общественным транспортом, распространены термины *flexible mobility on demand (FMoD)*, *demand-responsive transport*, *demand-responsive transit (DRT)*, *dial-a-ride transit (DART)*, *flexible transport services (FTS)* [Mageean, Nelson, 2003; Liyanage, Dia, Abduljabbar, Bagloee, 2019].

Сферы применения адаптивных транспортных систем варьируются от нишевых сервисов для решения специфических транспортных проблем до полноценного элемента городского общественного транспорта — тогда шаттлы по запросу создают новые маршруты или дополняют существующие [Hazan, Lang, Wegscheider, Fassenot, 2019]. Изучив данные о случаях внедрения on-demand шаттл-сервисов, перечисленных в табл. 2, мы выделили основные области применения адаптивных транспортных систем:

- микротранзит (короткие поездки внутри определенной территории или района города, перемещение между магистральными направлениями традиционных маршрутов общественного транспорта);
- туризм (гибкий вариант hop-on/hop-off автобуса, который курсирует по запросу туристов между отелями и достопримечательностями, подвид микротранзита);
- «последняя миля» (last mile; сбор пассажиров на определенной территории и их доставка на узловую транспортную станцию или другой «аттрактор» и обратно);
- «бизнес-перевозки», commute (доставка сотрудников на работу и обратно, корпоративные перевозки, вахта);
- трансфер (сбор пассажиров на обширной территории и их доставка на станцию назначения, например сбор и доставка пассажиров в аэропорт ко времени вылета);
- транспортные сервисы для пассажиров с ограниченной мобильностью (паратранзит).

Маршруты транспортных средств, работающих в адаптивных транспортных системах, могут различаться по степени гибкости. Сравнив по этому критерию перечисленные в табл. 2 сервисы, мы выбрали четыре основных фактора, на основе которых следует классифицировать адаптивные транспортные сервисы:

- маршрут движения транспортного средства между остановками (фиксированный или гибкий);
- список остановочных станций (фиксированный или гибкий);
- допустимость объездов пробок и иных препятствий на маршруте (допустимы или нет);
- необходимость бронирования поездки пассажиров до выезда транспортного средства (требуется или нет).

Ниже в табл. 1 приведены варианты маршрутов общественного транспорта, упорядоченные по степени гибкости, где на первом месте стоит классический маршрут с фиксированным набором остановок и недопустимостью объездов. Наибольшей гибкостью обладает сервис, в котором все параметры могут изменяться в зависимости от запроса — вплоть до района функционирования транспортного средства (например, в утренние и вечерние часы транспортное средство может использоваться в режиме «последняя миля» или commute, а в течение дня и после вечернего часа пик — в режиме «микротранзит» в границах заданного района).

Таблица 1. Виды адаптивных маршрутов по степени гибкости

№ п/п	Пример	Маршрут	Частота движения	Остановки	Объезды	Бронирование поездки
1	Традиционные городские маршруты («большие автобусы»)	фикс.	фикс.*	фикс.	нет	нет
2	Городские маршруты с динамически управляемым расписанием	фикс.	гибкий	фикс.	нет	нет

3	Междугородные автобусы	фикс.	фикс.*	фикс.	нет	требуется
4	Традиционные городские маршруты («маршрутки»)	фикс.	фикс.*	фикс.	допусти- мы	нет
5	Op-demand шаттлы с ограничением по остановкам	гибкий	фикс.*/ гибкий	фикс.	допусти- мы	требуется
6	Op-demand шаттлы с ограничением по территории, виртуальными остановками	гибкий	гибкий	гибкий	допусти- мы	требуется

* – планируется исходя из прогноза пассажиропотока, но не может меняться динамически в автоматизированном режиме.

Почти все адаптивные маршруты требуют бронирования поездки, что является одним из ограничений возможного использования таких сервисов — во всяком случае до тех пор, пока вызов транспортного средства не станет привычной и неотъемлемой частью поездки на общественном транспорте, а также пока не будут разработаны системы заказа поездки без использования персонального смартфона (например, на основе видеоаналитики или с помощью специально оборудованных остановочных станций). Не требуют бронирования поездки лишь частично адаптивные системы (строка 2 табл. 1), в которых может изменяться частота, расписание движения автобусов по маршруту (при этом интенсивность движения автобусов варьируется в течение дня и в традиционных системах общественного транспорта; отличие лишь в том, что в адаптивных системах частота движения может динамически меняться на основании данных о спросе на поездки) [Gkiotsalitis, Stathopoulos, 2016].

Адаптивные транспортные решения работают по всему миру: в Австралии, Канаде, Германии, Японии, Швеции, Великобритании, Мексике, Египте и других странах. Ниже приведены наиболее известные ride-sharing сервисы:

Таблица 2. Сервисы в сфере адаптивного общественного транспорта

Название сервиса	Ссылки	Комментарии
MOIA	https://www.moia.io/en/hamburg https://www.moia.io/en/hanover	Ride-sharing шаттл-сервис от Volkswagen в Гамбурге и Ганновере
VIA	https://ridewithvia.com/ https://www.allygatorshuttle.com/	VIA — это платформа для транспортных компаний, с помощью которых можно организовать on-demand шаттл-сервис. Работает в Нью-Йорке, Берлине и других городах. Приведена также ссылка на сайт партнера VIA, транспортной компании, являющейся оператором сервиса в Берлине
Shotl	https://shotl.com/	Ride-sharing шаттл-сервис, работает в основном в пригородах муниципалитетов Испании
Shuttl	https://ride.shuttl.com/	Сервис в Индии, ориентированный на большие автобусы, доставляющие сотрудников до офиса и обратно на основе on-demand маршрутов
Uber Bus	https://www.uber.com/en-EG/blog/introducing-uber-bus-a-new-way-to-commute/	Сервис гибких маршрутов в Каире, организованный Uber. Ориентирован на микротранзитные перевозки и commute-сервис (доставку сотрудников до работы и обратно)
Transdev	https://www.transdev.com/	Разработчик решений для организации различных видов общественного транспорта, в том числе предоставляет решения для on-demand шаттл-сервисов в Австралии, США, Франции, Нидерландах [Transdev, 2018]

Circuit	https://www.ridecircuit.com/	Сервис шаттлов «по запросу», функционирующий в 20+ городах США
Kutsuplus (сервис закрыт)	https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/8_2016_kutsuplus_finalreport_english.pdf	Одна из первых попыток запуска городского сервиса on-demand шаттлов. Сервис закрыт по решению муниципалитета до выхода на расчетные мощности, при которых ожидалась окупаемость расходов на его содержание [Rissanen, 2016]

Источник: данные авторов.

Данные по эксплуатации гибкого маршрута по запросу в Иннополисе

В июне 2018 года при участии авторов данной статьи была организована работа on-demand шаттл-сервиса для жителей города Иннополис (население около 3500–4000 жителей). До того здесь, по данным СМИ, функционировал традиционный маршрут с отправлением по маршруту каждый час. Маршрут состоял из шести остановок — автобус делал круг вокруг города и возвращался на начальную остановку. Протяженность маршрута — 4,6 км, полный круг занимал 10 минут. Автобус выходил на рейс вне зависимости от наличия или отсутствия пассажиров и проезжал через все запланированные остановки.

В задачи внедрения адаптивного общественного транспорта входили оптимизация расходов на транспорт, расширение транспортной сети (увеличение числа остановок и включение в маршрут соседних населенных пунктов и достопримечательностей), повышение качества сервиса в целом.

Информационные системы для адаптивного общественного транспорта обычно содержат следующие составные части:

а) система заказа поездки: запрос посадки пассажира в месте с определенными координатами, указание координат точки назначения и необходимого числа посадочных мест;

б) система назначения транспортного средства: привязка доступного транспортного средства к заказу;

в) генератор «плавающих» автобусных остановок: поездка может быть запрошена от уже существующей остановки, либо виртуальная остановка может быть создана в ближайшей от пассажира точке дорожной сети;

г) планировщик маршрута: в результате обработки заказа формируется маршрут, который назначается свободному автобусу, либо обновляется уже созданный активный маршрут, если новый заказ находится в «доступном радиусе» [McKenna, Clarke, Golpayegani, 2019].

Для организации услуги гибкого маршрута по запросу в Иннополисе было разработано и опубликовано мобильное приложение, доступное в AppStore¹ и Google Play², были разработаны система назначения транспортного средства и планировщик маршрута (структура программного продукта описана в Приложениях 1 и 2). Генератор «плавающих» автобусных остановок не разрабатывался, вместо этого было увеличено число фиксированных остановок (при этом остановками стали не только оборудованные остановочные павильоны, но и многие другие выбранные вручную незапрещенные для остановки транспорта точки). Позже было разработано веб-приложение для заказа поездок с любого мобильного устройства через веб-браузер³. Приложение поддерживает функции выбора станций отправления и назначения, желаемого времени отправления (выбор из доступных вариантов), бронирования поездки и отслеживания местоположения автобуса. Также разработано мобильное приложение водителя — для просмотра списка запланированных рейсов, остановок в каждом рейсе (исходя из сделанных пассажирами заказов), навигации по маршруту и верификации пассажира при посадке в автобус (верификационный код для пассажира генерируется при бронировании и отображается на странице бронирования).

1 Название: Innobus, <https://apps.apple.com/us/app/innobus/id1358129481>.

2 Название: Innobus, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mobidisco.avtobus&hl=en>.

3 <http://app.innobus.ru/zakaz/>.

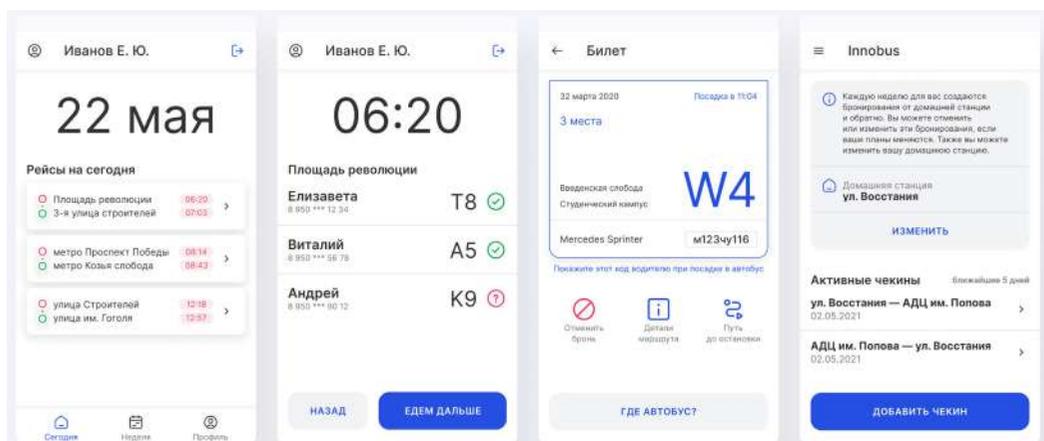


Рис. 1. Интерфейсы приложений водителя и пассажира для заказа поездок

За период с июля 2019 года по июль 2020 года наработана база активных пользователей более 1000 пассажиров, выполнено более 20 000 рейсов. Удалось сократить среднемесечный километраж-пробег транспортного средства на маршруте на ~20%, при этом возможная частота выездов автобуса на маршрут выросла до 4 раз в час (с 1 раза в час до внедрения). Площадь покрытия сервиса увеличилась в несколько раз: было добавлено 10 остановочных станций (их число увеличилось с 6 до 16, что не является пределом, так как шаттл-сервис в принципе может останавливаться без привязки к остановочным павильонам), причем не только в Иннополисе, но и в соседних населенных пунктах. Так, появилась возможность доехать до горнолыжного курорта ГСОК «Свияжские холмы». Использование системы гибких маршрутов и приложения для поездок по запросу, позволило повысить качество и охват сервиса при сокращении расходов на перевозки.

Алгоритм построения маршрута для on-demand общественного транспорта

Сеть маршрутов общественного транспорта часто моделируется с помощью графов, в которых каждый узел является станцией, станции соединены направленными ребрами, а длина ребер определяет расписание (время отправления/прибытия на станцию) [Wang, Lin, Yang, Xiao, 2015]. При формировании расписания традиционных маршрутов последовательность узлов (станций) фиксирована. Маршруты и «расписание» (оценка времени прибытия на станцию) адаптивного общественного транспорта, напротив, строятся на основе динамической маршрутизации, где последовательность узлов (станций) может быть произвольной и может оптимизироваться. Динамическое расписание — это прогноз движения автобусов, созданный на основе активных заказов от пассажиров и прогнозных моделей, используемых системой для определения положения транспорта исходя из прогнозируемых заказов. Такое расписание может быть изменено, если меняется дорожная ситуация и (или) появляются новые заказы. Основой для его составления являются алгоритмы формирования и оптимизации маршрутов — они определяют направление и скорость движения автобуса, очередность исполнения заказов, а значит, и время, в которое он должен прибыть на те или иные станции.

Принцип построения маршрутов для адаптивных транспортных систем зависит от цели, которую ставит заказчик, организатор перевозок. В районах с низким спросом и невысокой транспортной доступностью маршруты могут строиться на основе простой минимизации расстояния, пройденного автобусом. Однако как только повышается запрос пассажиров к качеству сервиса и появляются конкурирующие сервисы, предоставляющие услуги перевозок, модель усложняется из-за необходимости находить баланс между экономией расходов на перевозки и ценностью сервиса для пассажира. Способ поиска такого баланса — разработка многофакторной модели расчета маршрута и алгоритмов балансировки (системы весовых коэффициентов) для определения баланса между противоречащими факторами. В ходе запуска адаптивного маршрута в Иннополисе необходимо было создать многофакторную модель, на основе которой можно формировать динамическое расписание.

Приведем описание базовой математической модели оптимизации маршрутов, которая использовалась на старте пилотного проекта в Иннополисе. Транспортная (дорожная) инфраструктура города представлена в виде полного взвешенного ориентированного графа $G(V, E)$, где $V_{1..n}$ — множество остановок, а $E_{1..n(n-1)}$ — пути между остановками, $w(E) = w_{ij}$ — вес ребра, расстояние между остановками.

Был использован и адаптирован алгоритм поиска кратчайшего пути на графе с учетом направления движения пассажиров [Guze, 2014]. В начале алгоритма устанавливается стартовая остановка V_0 , а пути от нее к остановкам, на которых ждут пассажиры, добавляются в множество доступных путей $A(E) = \{E_{V_0V_1}, \dots, E_{V_0V_k}\}$.

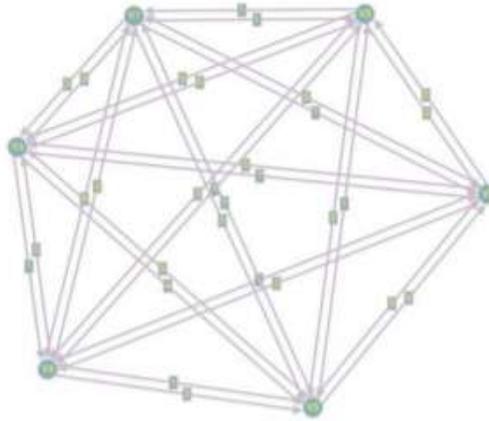


Рис. 2. Иллюстрация полного взвешенного ориентированного графа

Источник: построено авторами.

На каждом шаге алгоритм выбирает произвольный путь $\alpha_{v_i v_j} \in A(E)$, добавляет его в общий путь $D = \{\alpha_1 \dots \alpha_k\}$ и удаляет из $A(E)$. Все пути $E_{1..p}$ к остановкам, на которые направляются пассажиры с остановки V_i , добавляются в $A(E)$. Алгоритм прекращает выполнение при условии $\exists \alpha_{v_i v_j} \in A(E)$. Общее расстояние текущего маршрута $M(D) = \sum_{k=0}^{|D|} w(\alpha_k)$. Соответственно $\exists D_0 : M(D_0) \leq M(D_k) \forall k$.

Одна из проблем этого алгоритма состоит в том, что он не учитывает время, проведенное пассажиром в автобусе. Время пассажира в пути не планировалось использовать в качестве основного критерия оптимизации, однако среднее и максимальное время, проведенное пассажиром в автобусе, может служить в качестве одного из входных условий при построении маршрута или быть частью критерия оценки качества маршрута.

Поэтому исходный алгоритм был доработан для решения поставленных выше проблем (отсутствие учета времени в пути для пассажира, балансировка целевых параметров) — от однофакторной оптимизации, приемлемой для MVP (продукта с минимально достаточной функциональностью), система переведена на многофакторную оптимизацию. Как и в предыдущем алгоритме, мы представляем дорожную систему в виде полного взвешенного ориентированного графа $G(V, E)$, где $V_{1..n}$ — множество остановок, а $E_{1..n(n-1)}$ — пути между остановками, $w(E) = w_{ij}$ — вес ребра, расстояние между остановками.

В начале алгоритма устанавливается стартовая остановка V_0 , а пути от нее к остановкам, на которых ждут пассажиры, добавляются в множество доступных путей $A(E) = \{E_{V_0V_1}, \dots, E_{V_0V_k}\}$.

Кроме того, мы задаем функцию оценки качества маршрута $Q(D) = \sum_{k=0}^{|D|} c_1 w(\alpha_k) + c_2 p(\alpha_k)$, где $p(\alpha_k)$ — расстояние для пассажиров на текущем шаге, которое зависит от числа пассажиров в автобусе в данный момент, c_1 — коэффициент значимости расстояния для автобуса, c_2 — коэффициент значимости расстояния для пассажиров.

На каждом шаге алгоритм выбирает произвольный путь $\alpha_{v_i v_j} \in A(E)$, добавляет его в общий путь $D = \{\alpha_1 \dots \alpha_k\}$, вычисляет количество пассажиров и расстояние для пассажиров $P = \{p_1 \alpha_1 \dots p_k \alpha_k\}$ и вычисляет значение функции качества маршрута $Q(D)$, а также удаляет $\alpha_{v_i v_j}$ из $A(E)$. Если на данном шаге текущее значение $Q(D) > Q_{\min}$, то вариант с выбором $\alpha_{v_i v_j}$ на данном шаге исключается из вычисления, так как является заведомо не оптимальным.

Все пути $E_{1..p}$ к остановкам, на которые направляются пассажиры с остановки V_j , добавляются в $A(E)$. Алгоритм прекращает выполнение при условии $\exists \alpha_{v_i v_j} \in A(E)$. Соответственно $\exists D_o : Q(D_o) \leq Q(D_k) \forall k$.

Ниже приведены примеры того, как формируются маршруты в соответствии со старым (однофакторным — по расстоянию в пути) и новым (многофакторным) методами расчета. В каждом из рассмотренных случаев приведены сделанные пассажирами бронирования (initial checkins), запланированная очередность остановок (planned route), общее пройденное автобусом расстояние (total distance bus), общее пройденное расстояние всеми пассажирами (total distance passengers), максимальная дистанция для пассажира (max distance for passenger).

Для Варианта 1 мы выбрали маршрут, на который было сделано 10 заказов (initial checkins). Длина маршрута, построенного на основе однофакторной оптимизации (минимизации расстояния для автобуса), составила 3360 м, на основе минимизации расстояния для пассажиров — 4540 м, длина маршрута, полученного многофакторным методом, — 3540 м. При этом в первом случае (оптимизация по расстоянию в пути для автобуса) все пассажиры в совокупности проехали 18 860 м, а в случае многофакторного маршрута — 13 440 м. Другими словами, увеличив пробег автобуса на 5,34%, мы улучшили пользовательский опыт на 28,74%. При этом фактически в данном примере мы добавили к пути автобуса всего 180 м, по-другому построив маршрут, очередность станций. Кроме того, в данном случае улучшился worst coefficient — это степень отличия реального маршрута от оптимального для пассажира с самым длинным маршрутом. При расчете маршрута по кратчайшему пути для автобуса он составлял 4,67. При расчете маршрута по многофакторной модели он составил 3,6. То есть путь самого «неудобного» для системы пассажира улучшился на 22,91%. Однофакторный метод на основе целевого параметра «кратчайший путь для пассажира» мы далее не рассматриваем, так как в этом случае автобус начинает выполнять отдельные заказы пассажиров, работая практически в режиме такси, что является неприемлемым для перевозчиков.

Таблица 3. Вариант 1. Кратчайший путь для автобуса (однофакторный метод)

Заказы пассажиров				Построенный маршрут	Детали построенного маршрута				
№ заказа	Остановка «Откуда»	Остановка «Куда»	К-во пасс.		№ заказа	Прямой маршрут, м	Фактич. маршрут, м	Отклонение	
1	Студ. кампус	Дет. сад	2	* Студ. кампус * Дом 104 * Дом 112 * Дет. сад * АДЦ им. А.С. Попова * Университет * Мед. центр	1	1100	1230	1,12	
2	Студ. кампус	Мед. центр	1		2	720	3360	4,67	
3	Студ. кампус	Дом 112	1		3	1000	1000	1	
4	Дом 104	Мед. центр	2		4	1300	2460	1,89	
5	Дом 104	Университет	1		5	950	2080	2,19	
6	Дом 104	Университет	1		6	950	2080	2,19	
7	Дом 104	Университет	1		7	950	2080	2,19	
8	Дом 112	АДЦ им. А.С. Попова	1		8	750	880	1,17	
Расстояние, пройденное автобусом								3360	
Сумма всех расстояний маршрутов каждого из пассажиров								18 860	
Максимальное расстояние для пассажира								3360	
Worst coefficient (худшее из отклонений)								4,67	

Источник: данные авторов.

Таблица 4. Вариант 1. Кратчайший путь для пассажиров (однофакторный метод)

Заказы пассажиров				Построенный маршрут	Детали построенного маршрута			
№ заказа	Остановка «Откуда»	Остановка «Куда»	К-во пасс.		№ заказа	Прямой маршрут, м	Фактич. маршрут, м	Отклонение
1	Студ. кампус	Дет. сад	2	* Дом 112 * АДЦ им. А.С. Попова * Студ. кампус * Дет. сад * Дом 104 * Дом 112 * Университет * Мед. центр	1	1100	1100	1
2	Студ. кампус	Мед. центр	1		2	720	2590	3,6
3	Студ. кампус	Дом 112	1		3	1000	1440	1,44
4	Дом 104	Мед. центр	2		4	1300	1300	1
5	Дом 104	Университет	1		5	950	950	1
6	Дом 104	Университет	1		6	950	950	1
7	Дом 104	Университет	1		7	950	950	1
8	Дом 112	АДЦ им. А.С. Попова	1		8	750	1900	2,53
Расстояние, пройденное автобусом								4540
Сумма всех расстояний маршрутов каждого из пассажиров								13 240
Максимальное расстояние для пассажира								2590
Worst coefficient (худшее из отклонений)								3,6

Источник: данные авторов.

Таблица 5. Вариант 1. Многофакторный метод

Заказы пассажиров				Построенный маршрут	Детали построенного маршрута			
№ заказа	Остановка «Откуда»	Остановка «Куда»	К-во пасс.		№ заказа	Прямой маршрут, м.	Фактич. маршрут, м.	Отклонение
1	Студ. кампус	Дет. сад	2	* Дом 112 * АДЦ им. А.С. Попова * Студ. кампус * Дет. сад * Дом 104 * Дом 112 * Университет * Мед. центр	1	1100	1100	1
2	Студ. кампус	Мед. центр	1		2	720	2590	3,6
3	Студ. кампус	Дом 112	1		3	1000	1440	1,44
4	Дом 104	Мед. центр	2		4	1300	1300	1
5	Дом 104	Университет	1		5	950	950	1
6	Дом 104	Университет	1		6	950	950	1
7	Дом 104	Университет	1		7	950	950	1
8	Дом 112	АДЦ им. А.С. Попова	1		8	750	2100	2,8
Расстояние, пройденное автобусом								3540

Сумма всех расстояний маршрутов каждого из пассажиров	13 440
Максимальное расстояние для пассажира	2590
Worst coefficient (худшее из отклонений)	2,8

Источник: данные авторов.

Таблица 6. Вариант 1. Сравнение маршрутов, построенных при помощи разных методов

Показатель	Min расстояние для автобуса, м	Min расстояние для пассажира, м	Многофакторная модель, м
Total distance bus	3360	4540	3540
Total distance passengers	18 860	13 240	13 440
Max distance for passengers	3360	2590	2590
Worst coefficient	1,17	2,53	2,8

Источник: данные авторов.

Для Варианта 2 взят маршрут с 10 заказами. Расстояние для автобуса увеличилось существенно — с 4440 до 5630 м. Однако при этом общее расстояние для пассажиров снизилось с 20 490 до 12 800 м — на 37,53%. При этом «самый неудобный» пассажир проехал 1750 м вместо 3040 м, то есть меньше на 42,43%. Однако worst coefficient незначительно, но вырос — с 2,76 до 3,13. При разнонаправленном в целом изменении показателей общий вектор — улучшение модели, если рассматривать эффективность сервиса в целом.

В задачи следующего этапа исследования входит поиск путей балансировки многофакторной модели, чтобы перевозчик смог искать баланс между сокращением собственных расходов и оптимизацией сервиса для пассажиров, то есть достижением оптимальных параметров QoS (качество обслуживания). Для кейсов, аналогичных данному (когда расстояние в пути для автобусов увеличивается, например, на 26%), необходимо предоставить перевозчику инструмент настройки модели: какие параметры являются для него наиболее приоритетными и в какой пропорции, чтобы система могла принимать решение о построении маршрута на основе этих настроек.

Таблица 7. Вариант 2. Кратчайший путь для автобуса (однофакторный метод)

Заказы пассажиров				Построенный маршрут	Детали построенного маршрута			
№ заказа	Остановка «Откуда»	Остановка «Куда»	К-во пасс.		№ заказа	Прямой маршрут, м	Фактич. маршрут, м	Отклонение
1	АДЦ им. А.С. Попова	Zion	1	* Студ. кампус * АДЦ им. А.С. Попова * Zion * Дом 104 * Дом 112 * Дет. сад * Мед. центр	1	550	550	1
2	Студ. кампус	АДЦ им. А.С. Попова	1		2	560	560	1
3	Студ. кампус	Дет. сад	2		3	1100	3040	2,76
4	Студ. кампус	Дет. сад	2		4	1100	3040	2,76
5	Zion	Дет. сад	1		5	1700	1930	1,14
6	Zion	Дет. сад	1		6	1700	1930	1,14
7	Дом 104	Мед. центр	1		7	1300	1730	1,33
8	Дом 112	Мед. центр	1		8	1500	1630	1,09

Расстояние, пройденное автобусом	4440
Сумма всех расстояний маршрутов каждого из пассажиров	20 490
Максимальное расстояние для пассажира	3040
Worst coefficient (худшее из отклонений)	2,76

Источник: данные авторов

Таблица 8. Вариант 2. Многофакторный метод

Заказы пассажиров				Построенный маршрут	Детали построенного маршрута			
№ заказа	Остановка «Откуда»	Остановка «Куда»	К-во пасс.		№ заказа	Прямой маршрут, м	Фактич. маршрут, м	Отклонение
1	АДЦ им. А.С. Попова	Zion	1	* Студ. кампус * Дет.сад * АДЦ им. А.С. Попова * Zion * Дет.сад * Дом 112 * Дом 104 * Мед. центр	1	550	550	1
2	Студ. кампус	АДЦ им. А.С. Попова	1		2	560	1750	3,13
3	Студ. кампус	Дет. сад	2		3	1100	1100	1
4	Студ. кампус	Дет. сад	2		4	1100	1100	1
5	Zion	Дет. сад	1		5	1700	1700	1
6	Zion	Дет. сад	1		6	1700	1700	1
7	Дом 104	Мед. центр	1		7	1300	1300	1
8	Дом 112	Мед. центр	1		8	1500	1500	1
Расстояние, пройденное автобусом					5630			
Сумма всех расстояний маршрутов каждого из пассажиров					12 800			
Максимальное расстояние для пассажира					1750			
Worst coefficient (худшее из отклонений)					3,13			

Источник: данные авторов.

Таблица 9. Вариант 2. Сравнение маршрутов, построенных при помощи разных методов

Показатель	Однофакторный метод (min расстояние для автобуса, м)	Многофакторная модель, м
Total distance bus	4440	5630
Total distance passengers	20 490	12 800
Max distance for passengers	3040	1750
Worst coefficient	2,76	3,13

Источник: данные авторов.

Описанный выше алгоритм используется для организации работы адаптивного транспортного сервиса в Иннополисе и эффективно справляется с относительно небольшим количе-

ством запросов. Для организации работы аналогичного сервиса в крупных городах, где интенсивность пассажиропотока существенно выше, а дорожная ситуация меняется гораздо чаще, требуется использование более совершенных математических алгоритмов, в том числе приближенные решения, базирующиеся на использовании генетических алгоритмов и различных эвристик для уменьшения вычислительной нагрузки [Сатунин, 2009].

Описание принципов работы системы моделирования адаптивного общественного транспорта

Мы изучили подход к моделированию адаптивного общественного транспорта, основанный на агентных (agent-based) фреймворках. Агентные фреймворки позволяют моделировать поведение пассажиров на основе сета данных об их индивидуальных характеристиках и поведении и используются для оценки эффекта адаптивного общественного транспорта [Liyanage, Dia, 2020]. Кроме того, при определении подходов к моделированию мы ориентировались на модели, которые предсказывают график активностей каждого жителя в определенный день на основе последовательно принимаемых решений [Zhou, Dorsman, Snelder, de Romph, Mandjes, 2019]. Разработанная нами модель позволяет поделить пассажиров на группы, каждая из которых обладает индивидуальным набором характеристик, и моделировать заказ каждого из пассажиров с учетом особенностей его группы. Также она позволяет моделировать различные сценарии, изменяя параметры, определяющие правила функционирования адаптивного общественного транспорта.

Для моделирования работы различных способов организации общественного транспорта мы разработали программное обеспечение, поддерживающее (1) загрузку исходных данных о дорожной сети и пассажиропотоке, (2) генерацию запросов на поездки от пассажиров на основе заложенных в систему алгоритмов и исходных данных о дорожной сети и пассажиропотоке, (3) генерацию маршрутов на основе описанной выше многофакторной модели для построения гибких маршрутов, (4) подсчет итоговых значений технико-экономических показателей и параметров качества сервиса⁴.

Наша система моделирования состоит из четырех частей:

- input — страница, на которой загружаются данные;
- алгоритмы симуляции — математический аппарат для выполнения симуляций;
- map — страница, на которой демонстрируется работа системы;
- output — страница, на которой выводятся результаты моделирования.

В input вводятся координаты участка дорожной сети (четыре точки-координаты), количество транспортных средств на маршруте, их вместительность, стоимость 1 км поездки шаттла, расходы в час на 1 шаттл, фиксированные расходы на 1 шаттл, накладные расходы в сутки, часы работы сервиса. Также в csv-файлах загружаются следующие данные:

1. Список остановок (название остановки — название района — координаты). В этой таблице в систему загружается перечень остановок, на которых может останавливаться on-demand шаттл. Остановки могут быть виртуальными — без специально оборудованных остановочных павильонов, при условии, что в данном месте не запрещена остановка транспортных средств.
2. Список районов с указанием числа жителей в районе (название района — координаты центра района — численность — % работающих — % учащихся — % туристов — % жителей с достатком ниже среднего — % жителей со средним достатком — % жителей с достатком выше среднего). Разбивка на районы выполняется искусственно, вручную, исходя из особенностей исследуемой территории. Район задается своей центральной точкой, к этой точке привязываются загруженные ранее ближайшие остановки. В этой таблице в систему загружаются данные о том, как распределено население в городе и какова структура населения в конкретном районе: пропорции работающего населения, учащихся, домохозяев, туристов (от того, в какой категории находится потенциальный пассажир, зависит, в какое время и куда он потенциально может поехать).
3. Список аттракторов: название аттрактора, тип аттрактора (офис, учебное заведение, быт, достопримечательность, транспортный узел), координаты, сила притяже-

⁴ Веб-версия системы, использованной для моделирования: <http://analytic.staffboost.ru/simulation/input>.

ния пассажиропотока к аттрактору в зависимости от времени суток (относительная субъективная оценка от 1 до 10), ожидаемое среднее время нахождения на территории аттрактора. Аттракторы помогают определить, куда поедут пассажиры в то или иное время (в тех случаях, когда у нас нет точных данных о численности пассажиров). Время нахождения на территории аттрактора влияет на то, когда пассажир поедет от этого аттрактора обратно. Тип аттрактора определяет, какой тип пассажиров, скорее всего, поедет к этому аттрактору («работающие» едут в офис, «учащиеся» — в учебные заведения, туристы едут к «достопримечательностям»). Отдельно следует учесть аттрактор «транспортный узел». Он нужен, когда мы анализируем работу маршрута в районах, которые соединяются с другими районами с помощью транспортного узла. Например, окраинный район города и станция метро, к которой стекается большинство типов пассажиров. Такой тип аттрактора может привлекать пассажиров любого типа.

4. Пассажиропоток: время, станция отправления, станция прибытия, пассажиропоток (количество человек). Эта таблица нужна, чтобы загрузить известные нам данные о пассажиропотоке.
5. Маршруты общественного транспорта: номер маршрута, часы работы, число автобусов и время на круг или частота движения, список остановок (название — координаты), стоимость работы одного автобуса в сутки, стоимость проезда. Данная таблица необходима для того, чтобы в систему были загружены данные о конкуренте в виде автобусов.
6. Данные по такси: время суток, стоимость километра для пассажира и среднее время подачи в это время суток. Эта таблица необходима, чтобы в систему были загружены данные о такси как конкурирующем виде транспорта.

После того, как загружены все данные, выполняется моделирование на основе алгоритмов. Описание приводится ниже.

а) Система считает количество потенциальных пассажиров в загруженных в систему районах города, при этом из общего числа жителей выбираются только жители со средним достатком. Таким образом, мы получаем потенциальный пассажиропоток, распределенный по районам города, с указанием типа пассажиропотока — работающее население, учащиеся, туристы. Выстраивается таблица: название района, категория пассажиров, число потенциальных пассажиров в данной категории без учета тех, кто останется дома.

б) Считается доля пассажиров, которые в этот день планируют поездку. Из категории «работающие» куда-то поедут в рабочий день 95%, из категории «учащиеся» — 70%, из категории «домохозяйка» — 50%, из категории «туристы» — 80% (20% за весь день не воспользуются транспортом, будут ходить пешком). Указанные данные доступны для корректировки в глобальных настройках, так как в зависимости от территории после проведения дополнительных исследований они могут меняться, уточняться. Получаем таблицу: название района, категория пассажиров, число потенциальных пассажиров в данной категории, которые вероятно куда-то поедут сегодня.

в) Определяется время, когда сегодняшние пассажиры совершат поездку. Для этого опять же в глобальные настройки выносятся таблица, аналогичная *табл. 10*.

Таблица 10. Пример распределения поездок пассажиров определенной категории по времени суток

Категория пассажира: Работающие	
Начало промежутка (каждый час суток)	Вероятность поездки в это время (в сумме должно быть 100%)
05:00	
06:00	15%
07:00	20%
...	...

Источник: данные авторов.

Получаем таблицу: название района, категория пассажиров, время выезда, число пассажиров. Причем желаемое время выезда здесь должно выбираться случайно в течение часа с начала промежутка из *табл. 10*.

г) Определяем, с какой станции пассажиры отправятся в поездку. С равной вероятностью поездка может быть совершена с любой из станций. Получаем таблицу: название района, категория пассажира, время выезда, id пассажира, номер заказа (число заказов на данном этапе соответствует числу пассажиров, которые едут сегодня из этой точки), станция отправления.

д) Определяем, к аттракторам какого типа поедет пассажир. Работающие едут к аттракторам типа «офис», учащиеся — «учебное заведение», домохозяйка — «быт», туристы — «достопримечательность». К аттракторам типа «транспортный узел» (далее — ТУ) могут ехать пассажиры всех категорий. Вероятность того, к какому аттрактору поедет пассажир, зависит от оценки силы аттрактора в загруженной таблице. Сила аттракторов может корректироваться данными о пассажиропотоке, если они есть. О том, как именно корректируется оценка силы аттрактора, написано ниже в разделе «Корректировка оценки силы аттрактора». Получаем таблицу: название района, категория пассажира, время выезда, id пассажира, номер заказа, станция отправления, станция назначения.

е) Генерируем обратные и повторные поездки:

- «Работающий» пассажир с вероятностью 10% совершит внутри рабочего дня поездку от одного офиса до другого офиса (офис в данном случае — тип аттрактора). В глобальных настройках данный параметр, по умолчанию равный 10%, управляется полем под названием «Вероятность внутриденной поездки работающего пассажира».
- «Работающий» пассажир с вероятностью 90% в конце рабочего дня (через 8 часов после первой поездки) совершит поездку обратно к станции отправления. В глобальных настройках этот параметр, по умолчанию равный 90%, управляется полем под названием «Вероятность поездки домой после рабочего дня».
- «Работающий» пассажир с вероятностью 10% в конце рабочего дня (через 8 часов после первой поездки) совершит поездку к любой случайной станции города, пробудет там 2 часа, а потом поедет к станции отправления. В глобальных настройках этот параметр по умолчанию равен 10% и управляется полем под названием «Вероятность случайной поездки по делам после рабочего дня».
- «Учащийся» пассажир с вероятностью 50% совершит в конце учебного дня (через 4 часа после первой поездки) поездку обратно к станции отправления. В глобальных настройках соответствующий параметр, по умолчанию равный 50%, управляется полем под названием «Вероятность поездки домой после учебного дня».
- «Учащийся» пассажир с вероятностью 50% совершит в конце рабочего дня (через 4 часа после первой поездки) поездку к любой случайной станции города, пробудет там 2 часа, а потом поедет к станции отправления. В глобальных настройках этот параметр, по умолчанию равный 50%, управляется полем под названием «Вероятность случайной поездки по делам после учебного дня».
- «Домохозяин» с вероятностью 90% после поездки (через 1 час после первой поездки) совершит еще одну поездку обратно к станции отправления. В глобальных настройках соответствующий параметр по умолчанию равен 90% и управляется полем под названием «Вероятность поездки домой после бытового дела».
- «Домохозяин» с вероятностью 10% совершит после поездки (через 1 час после первой поездки) поездку к любой случайной станции города, пробудет там 1 час, а потом поедет к станции отправления. В глобальных настройках данный параметр (по умолчанию равен 10%) управляется полем под названием «Вероятность случайной поездки по делам после бытового дела».
- «Домохозяин» с вероятностью 10% совершит повторную поездку туда-обратно в случайное время в течение дня. В глобальных настройках данный параметр по умолчанию равен 10% и управляется полем под названием «Вероятность повторной поездки домохозяина». В данном пункте генерируется 2 поездки — туда и обратно через 1 час.

В свою очередь, «турист» может:

- поехать обратно в пункт отправления с вероятностью 10% через 3 часа после отправления «туда»;

- поехать обратно на исходную позицию с вероятностью 10% через 5 часов после отправления «туда»;
- поехать обратно на исходную позицию с вероятностью 10% через 8 часов после отправления «туда»;
- поехать к следующему аттрактору типа «достопримечательность» через 1,5 часа после первой поездки, а потом на исходную позицию еще через 1,5 часа;
- поехать к следующему аттрактору типа «достопримечательность» через 1,5 часа после первой поездки, затем еще к одной достопримечательности, а потом на исходную позицию еще через 1,5 часа.

Всеми этими оценками можно управлять в глобальных настройках.

ж) Следующий этап — корректировка оценки силы аттрактора. Корректировка выполняется при загрузке таблиц в систему перед началом симуляции. Предположим, мы имеем 3 аттрактора с субъективной оценкой 5 каждый. Но данные пассажиропотока говорят, что к аттрактору 1 в сутки приезжает 1000 человек, к аттрактору 2 — 700 человек, к аттрактору 3 — 300 человек. На основании этих данных и простых пропорций мы корректируем оценку аттрактора в пределах $\pm 0,5$, то есть от 4,5 до 5,5. Разница между 5,5 и 4,5 равна единице и составляет 100%. Максимальный пассажиропоток идет к аттрактору 1, значит, он получает все 100% и к нижней границе прибавляется 100% от единицы. На втором месте — аттрактор 2, он получает прибавку к нижней границе 70%, то есть 0,7. Аттрактор 3 получает прибавку 0,3.

Таким образом, оценка корректируется:

Для аттрактора 1: $4,5 + 1 = 5,5$.

Для аттрактора 2: $4,5 + 0,7 = 5,3$.

Для аттрактора 3: $4,5 + 0,3 = 4,8$.

Если для некоторых аттракторов нет данных о посещаемости, то их оценка остается неизменной и равняется 5.

з) Далее на основе описанной выше многофакторной модели строятся маршруты. Шаги по генерации маршрутов:

— Доступные шаттлы размещаются в точках, наиболее близких к вероятно наибольшему числу заказов в час начала работы сервиса.

— Для каждого потенциального заказа, сгенерированного ранее, рассчитывается возможное время подачи шаттла. Если оно меньше, чем время подачи такси, увеличенное на 30%, а также меньше, чем время подачи рейсового автобуса, увеличенное на 20%, то пассажир выбирает шаттл-сервис. Принцип принятия решения показан в таблице ниже для условий, что время подачи автобуса — 15 минут, время подачи такси — 7 минут.

Таблица 11. Пример сравнения вариантов поездки с помощью такси и шаттла с гибким маршрутом

Время ожидания шаттла	Сравнительное время такси и рейсового автобуса	Решение
8 минут	Автобус: 10 минут + 20% = 12 минут	Положительное (в пользу шаттла)
	Такси: 7 минут + 30% = 9,1 минуты	
10 минут	Автобус: 10 минут + 20% = 12 минут	Отрицательное (в пользу такси или автобуса)
	Такси: 7 минут + 30% = 9,1 минуты	

Источник: данные авторов.

«Запас» от такси и автобуса (20 и 30% в данном примере и по умолчанию) указывается и корректируется в глобальных настройках.

в) Для каждого автобуса строится маршрут на основе описанной выше многофакторной модели построения маршрутов. Считается пройденный километраж и количество перевезенных пассажиров. Определяется точка завершения маршрута. За N минут до завершения маршрута начинают собираться заказы на следующую поездку.

Эти итерации повторяются в течение работы сервиса. По результатам моделирования всех итераций считаются итоговые параметры функционирования сервиса — технико-экономические показатели и параметры качества сервиса.

Моделирование и сравнительный анализ показателей работы маршрутных систем различной степени гибкости

В этом разделе представлено исследование, целью которого является сравнение технико-экономических показателей и параметров качества работы систем городского транспорта разной степени адаптивности, работающих по различным сценариям, задача которого — определение оптимального набора параметров при организации адаптивного общественного транспорта. Сценарии рассчитываются на основе разработанной нами модели для Иннополиса, принципы работы которой описаны выше. Расчеты производятся с одинаковым набором исходных данных, меняются только правила, по которым осуществляется работа общественного транспорта. Исходный набор данных упрощается до наиболее существенных параметров, оказывающих наиболее существенное влияние на результат моделирования.

Для моделирования мы выбрали дорожную сеть района города Видное (население ~77 тыс. человек) и района Бирюлево Восточное города Москвы (население ~155 тыс. человек). В систему моделирования дорожная сеть загружена с помощью сервиса Google Maps, границы моделирования не задаются — они будут определены загруженными координатами остановочных станций.

В городе Видное выбрана 31 исходная станция (исходными считаются станции, от которых начинаются утренние поездки и к которым совершаются последние вечерние поездки), для упрощения модели население города равномерно распределено между этими станциями. Атрибуты и степень их влияния на пассажиропоток перечислены и оценены в Приложении 3. В Бирюлево Восточном выбраны 44 исходные станции, атрибуты и степень их влияния на пассажиропоток перечислены и оценены в Приложении 4.

Мы провели моделирование трех сценариев, корректируя параметры гибкости, приведенные в *табл. 1*, и приняв, что в рамках одной транспортной системы могут работать одновременно различные сервисы с разной степенью гибкости:

Сценарий 1. Транспортное обслуживание осуществляется 20 автобусами вместительностью 17 мест, которые абсолютно свободны в своих перемещениях между заданными остановками.

Сценарий 2. Транспортное обслуживание осуществляется 4 автобусами вместительностью 17 мест на маршруте «Видное — метро Царицыно (по ул. Липецкая)», 4 автобусами на маршруте «Видное — ТРК Вегас», 4 автобусами на маршруте «Восточное Бирюлево — ТРК Вегас», 8 автобусами с любыми остановками без ограничений по маршруту и району.

Сценарий 3: Транспортное обслуживание осуществляется 4 автобусами вместительностью 17 мест на маршруте «Видное — метро Царицыно» (по ул. Липецкая)», 4 автобусами на маршруте «Видное — ТРК Вегас», 4 автобусами на маршруте «Восточное Бирюлево — ТРК Вегас», 4 автобусами с любыми остановками внутри Бирюлево Восточного без права выезда за пределы района, 4 автобусами с любыми остановками внутри города Видное без права выезда за пределы города.

Во всех трех сценариях мы имеем одну и ту же дорожную сеть, одинаковое распределение пассажиров и заказов. Отличаются лишь ограничения, которые мы задаем для отдельных автобусов, направляя их на определенные направления. При этом заданные ограничения достаточны для того, чтобы строить гибкие маршруты.

Для сравнения мы выбрали следующие целевые показатели.

а) Общее расстояние, пройденное автобусами. Оно отражает общий километраж, который необходимо пройти всем транспортным средствам, принимающим участие в обслуживании пассажиропотока, чтобы выполнить все заказы пассажиров. Чем меньше общее расстояние, тем предпочтительнее и экономичнее сценарий.

б) Общее расстояние в пути пассажиров. Оно отражает сумму всех расстояний, которое проехал каждый отдельный пассажир при выполнении заказа на поездку, включая объезды, отклонения от оптимального маршрута для того, чтобы «подсадить» или «высадить» других пассажиров.

в) Среднее время ожидания автобуса — среднее время, которое проходит с момента вызова автобуса до прибытия автобуса на станцию отправления, на которой пассажиру удобно осуществить посадку в автобус.

г) Коэффициент удобства — среднее арифметическое между коэффициентами, посчитанными как отношение расстояния, которое пассажир проезжает с учетом отклонений от оптимального маршрута и расстояния, которое требовалось бы для выполнения заказа по оптимальному маршруту (таким маршрутом поехало бы такси), по каждому из пассажиров.

Статистика работы автобусов и их основные показатели приведены в Приложении 5 «Статистика работы автобусов по Сценариям 1–3».

По показателям «Общее расстояние, пройденное автобусами» и «Общее расстояние пассажиров» Сценарий 1 хуже всех. В Сценарии 3 общее расстояние, пройденное автобусом, на 3% меньше, чем в Сценарии 2, однако общее расстояние, пройденное пассажирами, больше на 5%, поэтому Сценарий 2 предпочтительнее.

Таблица 12. Сравнение сценариев, часть 1

Сценарий	Общее расстояние, м	Общее расстояние пассажиров, м
Сценарий 1	17 334,4	204 351,6
Сценарий 2	17 114,6	183 474,8
Сценарий 3	16 614,4	192 267,7

Источник: данные авторов.

По показателю «Среднее время ожидания автобуса» выигрывает Сценарий 2. Кроме того, у этого сценария лучше и коэффициент удобства. Все это также говорит в пользу того, что он является наиболее удобным для пассажиров.

Таблица 13. Сравнение сценариев, часть 2

Сценарий	Среднее время ожидания автобуса, мин	Коэффициент удобства
Сценарий 1	9,44	3,61
Сценарий 2	9,37	3,35
Сценарий 3	9,68	3,42

Источник: данные авторов.

Дополнительно мы оценили процент загрузки автобусов в перечисленных сценариях. Сценарий 3 уступает по целевым показателям. Средний процент загрузки в Сценариях 1 и 2 одинаков, но если посмотреть на распределение загрузки, то видно, что Сценарий 2 более оптимален, поскольку меньше автобусов загружены на 0–20% и больше — на 50–80% и 20–50%. Все это создает предпосылки для дальнейшей оптимизации Сценария 2, при ограниченности таких предпосылок для Сценария 1.

Результаты моделирования показали, что наиболее оптимальными способами организации адаптивного городского транспорта являются:

- выделение ограниченно гибких маршрутов для обслуживания основных стабильных и заранее прогнозируемых пассажиропотоков: транспортные средства курсируют между основными контрольными точками, имея права на незначительные отклонения от маршрута для выполнения заказов пассажиров вне основной магистрали;
- выделение пула транспортных средств без ограничений по району функционирования, которые могут реагировать на меняющуюся обстановку, перемещаясь в точки наивысшего спроса.

Заключение

Мы обсудили понятие и принципы работы адаптивного общественного транспорта: шаттлы разной вместительности перевозят пассажиров по запросу без фиксированных остановок, с возможностью корректировать маршрут. Перечислены и проанализированы основные модели функционирования адаптивного транспорта.

Приведены данные по эксплуатации маршрута общественного транспорта на базе гибких маршрутов по запросу в городе Иннополисе за период с июня 2018-го по январь 2020 года. Результатом работы сервиса стало сокращение на ~20% пробега транспортных средств, в ~6 раз увеличен охват территории, для которой стал доступен общественный транспорт.

Этого улучшения показателей удалось добиться за счет разработанной нами многофакторной модели, на основе которой строится маршрут гибкого шаттла в Иннополисе. Мы приводим описание ее устройства и функционирования. Цель этой модели — минимизация значений параметров: пройденное шаттлом расстояние, время ожидания и время в пути для пассажира. Описан механизм балансировки этих параметров. Приведены примеры запросов пользователей и показатели качества посчитанных маршрутов, основными из которых являются среднее и максимальное отклонения посчитанного маршрута от прямого маршрута.

Представлены результаты сравнительного моделирования транспортных сервисов разной степени гибкости на примере конкретной дорожной сети: при одинаковых заданных параметрах по числу транспортных средств и пассажиропотоку мы сравнили технико-экономические показатели и параметры качества сервиса маршрутных систем разной степени гибкости.

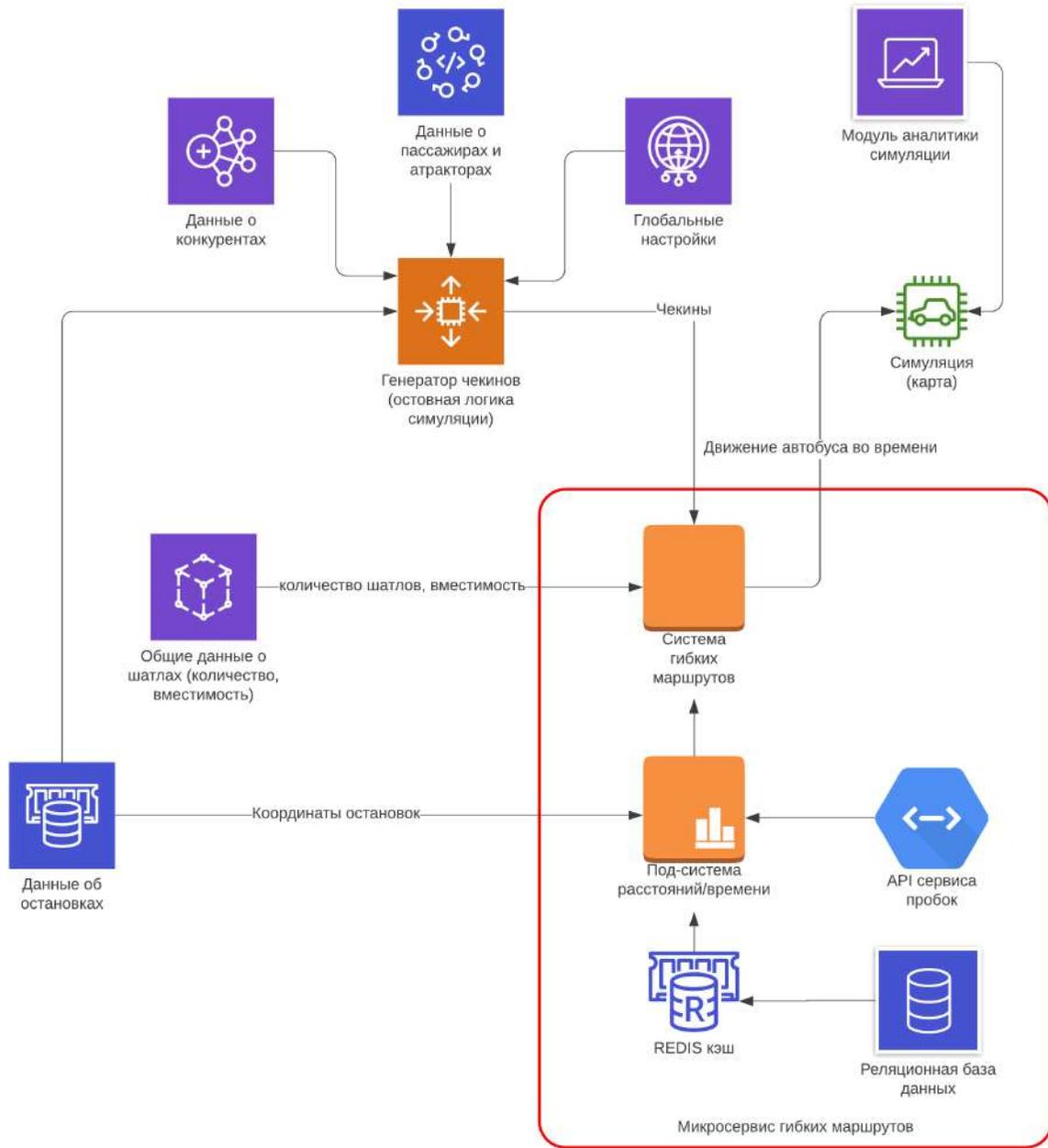
В рамках нашей многофакторной модели нам удалось доказать эффективность сочетания адаптивных маршрутов разной степени гибкости внутри района функционирования сервиса. Сочетание маршрутов осуществляется следующим образом: часть транспортных средств выделяется на обслуживание хорошо прогнозируемых потоков пассажиров с допуском небольших отклонений от основного маршрута; остальная же часть транспортных средств размещается в районе функционирования сервиса без ограничений по маршруту следования и графику движения, перемещаясь, таким образом, в те районы и на те направления, которые становятся востребованными в разные периоды в течение дня.

Необходимо продолжать исследования различных подходов к организации адаптивного транспорта. Особенно полезным для моделирования является анализ данных пилотных проектов с реальными пассажирами, адаптированных к реальным особенностям того, как жители городов пользуются транспортом — насколько они готовы его заказывать и ожидать. Мы считаем, что сочетание маршрутов автобусов «по запросу» разной степени гибкости с традиционными маршрутами позволит снизить и распределить нагрузку на дорожную сеть, повысить доступность транспортных услуг для населения и повысить глобальную эффективность городского транспорта.

При этом наше моделирование было проведено на ограниченном наборе данных (разработка модели базировалась на пилотном проекте в городе Иннополисе с населением 3500–4000 человек); в реальности же чем больше город, тем выше число зависимостей и факторов, оказывающих влияние на эффективность адаптивных транспортных систем. Отдельной проработки требует вопрос сохранения экономической эффективности традиционного общественного транспорта: если часть платежеспособных пассажиров предпочтет использование on-demand транспорта, не приведет ли это к росту требуемых субсидий на содержание социально значимых традиционных маршрутов?

Отдельным дополнительным вопросом для исследования является конкуренция адаптивных систем организации городского транспорта с общественным транспортом и обеспечение роста глобальной эффективности городской транспортной инфраструктуры.

Приложение 1. Общая схема потоков данных в системе моделирования адаптивных маршрутов, разработанной в рамках пилотного проекта в г. Иннополисе



Источник: построено авторами.

Приложение 2. Список сервисов в системе моделирования адаптивных маршрутов, разработанной в рамках пилотного проекта в г. Иннополисе

Сервис	Основное назначение	Основные методы
StorageService	Хранит вводные данные, позволяет сохранять и загружать входные данные для разных симуляций	Save() – сохраняет данные. Load() – загружает все данные необходимые для симуляции. Update() – заменяет вводные данные (частично или полностью)
SimulationService	Основной сервис – генератор заказов от пассажиров на поездки, который получает данные из StorageService, распределяет их среди прочих сервисов и координирует симуляцию	InitServices() – инициализирует сервисы. RunSimulation() – запускает симуляцию. ExportToMap() – экспортирует данные симуляции на карту. ExportToReport() – экспортирует данные симуляции для отчета
StopsService	Сервис остановок – предоставляет информацию об остановках	getStopList() – экспортирует список остановок
CompetitorService	Сервис конкурентов (автобусы, такси)	getCompetitorTime() – считает время конкурента для потенциального чекина. getCompetitorStats() – экспортирует статистику по конкуренту. useCompetitor() – потенциальный пассажир использует конкурента
PassengerService	Сервис пассажиров	Generate() – генерирует список пассажиров с их предпочтениям. AssignPassengerTransport() – задает транспорт пассажиру
GlobalSettingsService	Сервис глобальных настроек	getValue() – получить глобальное значение. setValue() – задать глобальное значение
MapService (module)	Сервис карты – отображает карту, позицию шатлов и другие параметры симуляции	getSnap() – получить расположение транспортных средств в момент времени
ReportService	Статистика – отображает отчет	getReport() – экспорт данных для отчета
RouteService	Сервис взаимодействия с микросервисом гибких маршрутов	getRoute() – получить маршрут для шаттла. setInitialData() – отправляет входные данные для шаттлов (количество, вместимость, остановки, чекины)

Источник: данные авторов

Приложение 3. Параметры моделирования по остановкам в городе Видное

№	Название	Тип объ-екта	Террито-рия	Коорди-наты	Насе-ление	Тип ат-трактора	Сила аттрактора			
							с 7:00 до 10:00	с 10:00 до 17:00	с 17:00 до 21:00	с 21:00 до 7:00
1	6-й ми-крорайон	Исход-ная оста-новка	Видное	55.542934, 37.720241	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
2	АТС	Исход-ная оста-новка	Видное	55.550036, 37.712458	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
3	Березо-вая улица	Исход-ная оста-новка	Видное	55.545680, 37.720157	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
4	ВНИИКОП	Исход-ная оста-новка	Видное	55.553756, 37.691824	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
5	Гастро-ном	Исход-ная оста-новка	Видное	55.545822, 37.708032	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
6	Детский сад	Исход-ная оста-новка	Видное	55.553858, 37.695833	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
7	Дон-басская улица	Исход-ная оста-новка	Видное	55.543730, 37.692506	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
8	ЖК «Зеленые аллеи»	Исход-ная оста-новка	Видное	55.558412, 37.691350	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
9	ЖК «Го-сударев дом»	Исход-ная оста-новка	Видное	55.533079, 37.650413	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
10	Заводо-управле-ние	Исход-ная оста-новка	Видное	55.548419, 37.764620	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
11	Завод-ская улица	Исход-ная оста-новка	Видное	55.555432, 37.714963	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
12	Киноте-атр	Исход-ная оста-новка	Видное	55.552403, 37.702270	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
13	Ленин-ский	Исход-ная оста-новка	Видное	55.560652, 37.684319	2484	Быт	1%	2%	1%	2%
14	Лопатино	Исход-ная оста-новка	Видное	55.533079, 37.650413	2484	Быт	1%	1%	1%	1%
15	Магазин «Все для дома»	Исход-ная оста-новка	Видное	55.548190, 37.713126	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
16	Мебель-ный магазин	Исход-ная оста-новка	Видное	55.559992, 37.725475	2484	Быт	1%	2%	2%	2%

17	МКГЗ	Исходная остановка	Видное	55.549155, 37.753873	2484	Быт	1%	1%	1%	1%
18	Мкр «Завидное»	Исходная остановка	Видное	55.538199, 37.723330	2484	Быт	1%	2%	1%	2%
19	Нарсуд	Исходная остановка	Видное	55.559673, 37.717650	2484	Быт	1%	2%	1%	2%
20	Олимпийская улица	Исходная остановка	Видное	55.547138, 37.693060	2484	Быт	1%	2%	1%	2%
21	Петровский проезд	Исходная остановка	Видное	55.539861, 37.662266	2484	Быт	1%	1%	1%	1%
22	Площадь	Исходная остановка	Видное	55.557478, 37.709573	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
23	Поликлиника	Исходная остановка	Видное	55.553728, 37.724399	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
24	Проспект Ленинского Комсомола	Исходная остановка	Видное	55.544544, 37.702019	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
25	Станция «Расторгуево»	Исходная остановка	Видное	55.549042, 37.686070	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
26	Станция «Расторгуево»	Аттрактор	Видное	55.549042, 37.686070	—	ТУ	35%	17,50%	8,75%	17,50%
27	Спасский проезд	Исходная остановка	Видное	55.542977, 37.649077	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
28	Суханово	Исходная остановка	Видное	55.529054, 37.660016	2 484	Быт	1%	1%	1%	1%
29	Таблово	Исходная остановка	Видное	55.549089, 37.742704	2484	Быт	1%	2%	1%	2%
30	Типографские дома	Исходная остановка	Видное	55.534403, 37.658369	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
31	Школа №2	Исходная остановка	Видное	55.555087, 37.702297	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
32	Школа милиции	Исходная остановка	Видное	55.541888, 37.669035	2484	Быт	1%	2%	2%	2%
33	Метро «Царицыно»	Аттрактор	Бирюлево Восточное	55.620681, 37.669612	—	ТУ	25%	12,50%	6,25%	12,50%

34	ТРЦ «Ве-гас»	Аттрактор	Видное	55.587404, 37.723454	—	Быт	5%	5%	15%	5%
35	ТК «Конструктор»	Аттрактор	Видное	55.582892, 37.708896	—	Быт	1%	2%	3%	2%
36	Гипермаркет «Лента»	Аттрактор	Видное	55.566776, 37.688423	—	Быт	1%	1%	5%	1%
37	Бирюлевский дендропарк	Аттрактор	Бирюлево Восточное	55.593374, 37.673013	—	Быт	1%	2%	4%	2%
38	Парк «Царицыно»	Аттрактор	Бирюлево Восточное	55.609759, 37.664842	—	Быт	1%	2%	5%	2%

Источник: данные авторов.

Приложение 4. Параметры моделирования по остановкам в районе «Бирюлево Восточное»

№	Название	Тип объекта	Территория	Координаты	Население	Тип аттрактора	Сила аттрактора			
							с 7:00 до 10:00	с 10:00 до 17:00	с 17:00 до 21:00	с 21:00 до 7:00
1	Загорьевский проезд, 7	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.573926, 37.665686	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
2	Почта	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.574433, 37.669652	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
3	Магазин	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.576591, 37.663124	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
4	5-й мкр Загорья	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.577824, 37.662439	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
5	Михневский проезд	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.577744, 37.668248	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
6	Михневская улица, 19	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.579482, 37.664170	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
7	Институт садоводства	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.581495, 37.671229	3 523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
8	Загорьевская, 10	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.580275, 37.677617	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
9	Ягодная улица	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.577132, 37.676389	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
10	Загорьевский проезд, 15	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.577331, 37.680507	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
11	Школа	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.585436, 37.667223	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
12	Лебедянская	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.587633, 37.665016	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
13	Травмпункт	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.587141, 37.666855	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%

14	Аптека	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.586762, 37.673024	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
15	Ряжская	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.589548, 37.672085	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
16	Поликлиника	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.590343, 37.667236	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
17	Лебедянская, 4	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.590343, 37.667236	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
18	Бирюлево-Пассажирская	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.582289, 37.661891	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
19	Бирюлево-Пассажирская	Аттрактор	Бирюлево Восточное	55.582289, 37.661891	–	ТУ	14,00%	10,00%	14,00%	10,00%
20	Мебельная фабрика	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.591262, 37.664271	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
21	Кинотеатр «Керчь»	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.591262, 37.664271	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
22	Бирюлево-Товарная	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.591262, 37.664271	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
23	Бирюлево-Товарная	Аттрактор	Бирюлево Восточное	55.591262, 37.664271	–	ТУ	14,00%	10,00%	14,00%	10,00%
24	Касимовская	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.599267, 37.653736	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
25	Бирюлевская улица	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.599722, 37.662441	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
26	Элеваторная	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.601844, 37.667452	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
27	Детская муз. школа	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.601844, 37.667452	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
28	Элеваторная 2	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.601844, 37.667452	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%

29	Мкр «Царицыно»	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.603689, 37.658148	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
30	6-я Радиальная	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.607366, 37.650491	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
31	6-я Радиальная, 20	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.607366, 37.650491	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
32	Завод «Огонек»	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.607544, 37.658453	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
33	Дуговая	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.607672, 37.662758	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
34	Стекольный завод	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.612033, 37.662154	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
35	6-я Радиальная, 10	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.609751, 37.664871	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
36	Финансовый колледж	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.605424, 37.668815	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
37	Липецкая	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.600980, 37.671174	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
38	Педагогическая	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.600980, 37.671174	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
39	Бирюлевский дендропарк	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.592431, 37.672833	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
40	Липецкая, 40	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.584037, 37.679249	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
41	Липецкая, 46	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.584037, 37.679249	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
42	Загорье	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.579772, 37.683422	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
43	Загорьевская, 29	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.583946, 37.698060	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%

44	Детский сад	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.585086, 37.694478	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
45	6-й мкр Загорья	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.585602, 37.691602	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
46	Липецкая, 7	Исходная остановка	Бирюлево Восточное	55.585602, 37.691602	3523	Быт	0,50%	1,00%	0,50%	1,00%
47	метро «Царицыно»	Аттрактор	Бирюлево Восточное	55.620681, 37.669612	–	ТУ	43,00%	20,00%	43,00%	20,00%
48	ТРЦ «Вегас»	Аттрактор	Видное	55.587404, 37.723454	–	Быт	3,00%	7,00%	3,00%	7,00%
49	Бирюлевский дендропарк	Аттрактор	Бирюлево Восточное	55.593374, 37.673013	–	Быт	2,00%	4,50%	2,00%	4,50%
50	Парк «Царицыно»	Аттрактор	Бирюлево Восточное	55.609759, 37.664842	–	Быт	2,00%	4,50%	2,00%	4,50%

Приложение 5. Статистика работы автобусов по Сценариям 1–3

Сценарий 1

Автобус	Общее расстояние, км	Общее расстояние пассажиров, км	Пассажи-ров доставлено	Часов при 80–100% загрузке	Часов при 50–80% загрузке	Часов при 20–50% загрузке	Часов при 0–20% загрузке
Standard #1	1,183.2	16,865.0	940	22	2	0	0
Standard #2	1,173.7	15,388.4	891	21	1	2	0
Standard #3	1,096.3	15,003.1	859	19	3	1	1
Standard #4	1,114.0	15,809.3	899	22	0	2	0
Standard #5	1,114.8	15,945.6	851	19	2	3	0
Standard #6	933.3	12,115.7	831	16	7	0	1
Standard #7	1,112.4	14,702.5	832	18	3	3	0
Standard #8	1,046.1	12,654.6	783	15	6	2	1
Standard #9	897.5	11,411.4	649	11	5	4	4
Standard #10	1,072.3	14,805.0	724	14	4	3	3
Standard #11	723.9	9,349.3	511	9	3	4	8
Standard #12	761.8	7,169.4	481	6	4	7	7
Standard #13	771.0	7,836.8	454	5	5	6	8
Standard #14	887.7	8,850.7	482	3	8	8	5
Standard #15	623.4	4,971.5	356	2	3	10	9
Standard #16	641.9	4,787.3	294	2	3	9	10
Standard #17	771.0	6,879.4	402	3	7	6	8
Standard #18	499.2	3,666.6	269	1	5	6	12
Standard #19	502.3	3,400.1	270	0	5	6	13
Standard #20	413.5	2,739.9	222	1	3	5	15

Сценарий 2

Автобус	Общее расстояние, км	Общее расстояние пассажиров, км	Пассажи-ров доставлено	Часов при 80–100% загрузке	Часов при 50–80% загрузке	Часов при 20–50% загрузке	Часов при 0–20% загрузке
Vid-Zar #1	1,489.1	20,202.7	960	24	0	0	0
Vid-Zar #2	1,377.9	18,910.6	923	22	2	0	0

Автобус	Общее расстояние, км	Общее расстояние пассажиров, км	Пассажи-ров доставлено	Часов при 80–100% загрузке	Часов при 50–80% загрузке	Часов при 20–50% загрузке	Часов при 0–20% загрузке
Vid-Zar #3	1,347.2	18,504.0	891	21	1	2	0
Vid-Zar #4	1,309.3	16,279.0	846	18	4	1	1
Vid-Vegas #1	930.3	9,494.3	573	4	13	5	2
Vid-Vegas #2	772.6	6,504.1	480	5	6	9	4
Vid-Vegas #3	706.2	3,979.0	328	0	5	14	5
Vid-Vegas #4	503.7	2,148.2	211	0	1	11	12
Bir-Vegas #1	850.7	11,576.1	902	21	2	1	0
Bir-Vegas #2	799.3	9,779.2	833	18	3	2	1
Bir-Vegas #3	841.3	12,236.6	857	19	4	0	1
Bir-Vegas #4	713.8	8,885.2	775	14	5	5	0
Standard #1	948.1	9,259.3	677	11	7	3	3
Standard #2	614.6	6,286.3	511	7	6	4	7
Standard #3	712.5	5,264.3	468	5	6	8	5
Standard #4	563.4	4,059.3	347	2	5	6	11
Standard #5	602.4	4,790.0	344	1	7	5	11
Standard #6	677.4	4,615.7	363	0	7	10	7
Standard #7	715.2	5,684.8	399	3	5	8	8
Standard #8	639.8	5,016.3	312	3	4	4	13

Сценарий 3

Автобус	Общее расстояние, км	Общее расстояние пассажиров, км	Пассажи-ров доставлено	Часов при 80–100% загрузке	Часов при 50–80% загрузке	Часов при 20–50% загрузке	Часов при 0–20% загрузке
Vid-Zar #1	1,464.3	19,954.8	960	24	0	0	0
Vid-Zar #2	1,459.5	21,557.5	953	24	0	0	0
Vid-Zar #3	1,474.6	20,858.3	905	22	1	0	1
Vid-Zar #4	1,609.7	23,999.4	902	22	1	0	1
Vid-Vegas #1	921.5	9,557.0	559	6	7	8	3
Vid-Vegas #2	668.4	4,778.2	413	1	9	8	6

Автобус	Общее расстояние, км	Общее расстояние пассажиров, км	Пассажи-ров доставлено	Часов при 80–100% загрузке	Часов при 50–80% загрузке	Часов при 20–50% загрузке	Часов при 0–20% загрузке
Vid-Vegas #3	650.1	4,717.9	370	0	9	6	9
Vid-Vegas #4	527.9	2,506.0	237	0	1	11	12
Bir-Vegas #1	927.6	12,999.8	949	23	1	0	0
Bir-Vegas #2	879.8	12,968.8	946	24	0	0	0
Bir-Vegas #3	962.6	12,748.7	831	18	3	2	1
Bir-Vegas #4	917.6	12,583.9	892	20	4	0	0
Vidnoe #1	359.8	1,532.6	139	0	0	7	17
Vidnoe #2	362.6	1,179.5	157	0	0	8	16
Vidnoe #3	225.7	454.4	70	0	0	2	22
Vidnoe #4	228.9	589.0	83	0	0	3	21
Birulevo #1	720.8	7,349.5	716	14	4	5	1
Birulevo #2	606.2	5,425.0	514	2	11	8	3
Birulevo #3	505.8	5,269.9	519	4	9	8	3
Birulevo #4	423.9	3,019.3	366	2	7	7	8

Источники

- Сатунин С.В. (2009) Применение комбинаторных аукционов для планирования маршрутов в моделировании задачи «Транспорт по запросу»//Бизнес-информатика. № 4 (10). С. 3–9.
- Burgstaller S. et al. (2017) Rethinking Mobility//Equity Research. Режим доступа: <https://docplayer.net/47862070-Rethinking-david-tamberrino-cfa-goldman-sachs-and-co-llc.html> (дата обращения: 20.03.2021).
- Ganter R., Berrisford C., Dennean K., Dessloch S. (2017) Longer Term Investments. Smart Mobility//Chief Investment Office Americas, Wealth Management. UBS.
- Gkiotsalitis K., Stathopoulos A. (2016) Demand-responsive Public Transportation Re-Scheduling for Adjusting to the Joint Leisure Activity Demand//International Journal of Transportation Science and Technology. Vol. 5. No.2. P. 68–82.
- Guze S. (2014) Graph Theory Approach to Transportation Systems Design and Optimization//The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. No. 8 (4). P. 571–578.
- Hazan J.N.L., Wegscheider A.K., Fassenot B. (2019) On-Demand Transit Can Unlock Urban Mobility//Boston Consulting Group. Режим доступа: <https://www.bcg.com/en-au/publications/2019/on-demand-transit-can-unlock-urban-mobility.aspx> (дата обращения: 20.03.2021).
- Linares MP, Barceló J., Carmona C., Montero L. (2016) Analysis and Operational Challenges of Dynamic Ride Sharing Demand Responsive Transportation Models//Transportation Research Procedia. No. 21. P. 110–129.
- Litman T. (2013) The New Transportation Planning Paradigm//ITE Journal. Vol. 83. No. 6. P. 20–24, 26, 27.
- Liyanage S., Dia H., Abduljabbar R., Bagloee S.A. (2019) Flexible Mobility On-Demand: An Environmental Scan//Sustainability. No. 11 (5). P. 1262.
- Liyanage S., Dia H. (2020) An Agent-based Simulation Approach for Evaluating the Performance of On-Demand Bus Services//Sustainability. No. 12 (10). P. 4117.
- Mageean J., Nelson J. (2003) The Evaluation of Demand Responsive Transport Services in Europe//Journal of Transport Geography. No. 11. P. 255–270.

- McKenna C., Clarke S., Golpayegani F. (2019) Floating Buses: Dynamic Route Planning and Passenger Allocation Based on Real-time Demand//IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC). P. 2203–2207.
- Rissanen K. (2016) Kutsuplus – Final Report//Helsinki Regional Transport Authority (HSL). Режим доступа: https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/8_2016_kutsuplus_finalreport_english.pdf (дата обращения: 20.03.2021).
- Transdev (2018) First- and Last-Mile Solutions. Режим доступа: <https://cdn.transdev.com/wp-content/uploads/2017/03/5bc8f37-3668-POE-LMFM-pour-le-WEB-GB-05-2018.pdf> (дата обращения: 20.03.2021).
- Wang S., Lin W., Yang Y., Xiao X. (2015) Efficient Route Planning on Public Transportation Networks//Conference: The 2015 ACM SIGMOD International Conference. P. 967–982.
- Zhou H., Dorsman J.L., Snelder M., de Romph E., Mandjes M. (2019) GPU-based Parallel Computing for Activity-based Travel Demand Models//Procedia Computer Science. Vol. 151. P. 726–732.

PAVEL DONSKOI, PETR MALAKHALTSEV

ON-DEMAND:

ADAPTIVE ROUTES FOR PUBLIC TRANSPORTATION

Pavel M. Donskoi, project manager, RoadAR LLC; 7 Universitetskaya str., Innopolis, The Republic of Tatarstan, 420500, Russian Federation.

E-mail: pavel.donskoy@gmail.com

Petr M. Malakhaltsev, CTO, FST-Integro LLC; 102 Sportivnaya str., Innopolis, The Republic of Tatarstan, 420500, Russian Federation.

E-mail: malakhaltsev@gmail.com

Abstract

This article considers the concepts and principles of adaptive public transport: shuttles carrying passengers on request, without fixed stops, with the ability to adjust their routes on demand. The route calculation is based on a multifactor model, where the goal is to minimize the distance traveled by shuttle, waiting time and travel time. We describe algorithms to balance these parameters with data collected in Innopolis city (a satellite city of Kazan, the capital of the Republic of Tatarstan) where an on-demand shuttle has operated since June 2018. The results of comparative modeling of on-demand transport systems with different degrees of flexibility and specific road networks are presented. We compared technical and economic indicators and the quality-of-service parameters of models with different degrees of flexibility but with the same parameters for the number of vehicles and passenger traffic. The results show the efficiency of the combination of adaptive routes with varying degrees of flexibility within the service operation area. The optimal combination of routes was where some of the vehicles are allocated to serve well-predicted passenger flows, with small deviations from the main route; the rest of the vehicles are without route or schedule restrictions, moving to the areas and in the directions where demand increases at different periods.

Key words: public transportation; smart mobility; smart city; on demand mobility; van-sharing; vanpooling

Citation: Donskoi P., Malakhaltsev P. (2019) On-Demand: Adaptive Routes for Public Transportation. *Urban Studies and Practices*, vol. 4, no 4, pp. 93–125. (in Russian) DOI: <https://doi.org/10.17323/usp44201993-125>

References

- Burgstaller S. et al. (2017) Rethinking mobility. *Equity Research*.
- Ganter R., Berrisford C., Dennean K., Dessloch S. (2017) Longer Term Investments. Smart mobility. *Chief Investment Office Americas, Wealth Management*. UBS.
- Gkiotsalitis K., Stathopoulos A. (2016) Demand-responsive Public Transportation Re-Scheduling for Adjusting to the Joint Leisure Activity Demand. *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 5, no 2, pp. 68–82.
- Guze S. (2014) Graph Theory Approach to Transportation Systems Design and Optimization. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, no 8 (4), pp. 571–578.
- Hazan J.N.L., Wegscheider A.K., Fassenot B. (2019) On-Demand Transit Can Unlock Urban Mobility. *Boston Consulting Group*. Available at: <https://www.bcg.com/en-au/publications/2019/on-demand-transit-can-unlock-urban-mobility.aspx> (accessed 20 March 2021).
- Linares MP., Barceló J., Carmona C., Montero L. (2016) Analysis and Operational Challenges of Dynamic Ride Sharing Demand Responsive Transportation Models. *Transportation Research Procedia*, no 21, pp. 110–129.
- Litman T. (2013) The New Transportation Planning Paradigm. *ITE Journal*, vol. 83, no 6, pp. 20–24, 26, 27.
- Liyanage S., Dia H., Abduljabbar R., Bagloee S.A. (2019) Flexible Mobility On-Demand: An Environmental Scan. *Sustainability*, no 11 (5), p. 1262.
- Liyanage, S.; Dia, H. (2020) An agent-based simulation approach for evaluating the performance of on-demand bus services. *Sustainability*, no 12 (10), p. 4117.
- Mageean J., Nelson J. (2003) The Evaluation of Demand Responsive Transport Services in Europe. *Journal of Transport Geography*, no 11, pp. 255–270.

- McKenna C., Clarke S., Golpayegani F. (2019) Floating Buses: Dynamic Route Planning and Passenger Allocation Based on Real-Time Demand. *IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. p. 2203–2207.
- Rissanen K. (2016) Kutsuplus – Final report. *Helsinki Regional Transport Authority (HSL)*. Available at: https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/8_2016_kutsuplus_finalreport_english.pdf (accessed 20 March 2021).
- Satunin S.V. (2009) Primenenie kombinatornykh auktsionov dlya planirovaniya marshrutov v modelirovanii zadachi «Transport po zaprosu» [Combinatorial Auctions for Route Planning in Modeling the on Demand Transport]. *Biznes-informatika* [Business-Informatics], no 4 (10), pp. 3–9. (in Russian)
- Transdev (2018) First- and Last-mile Solutions. Available at: <https://cdn.transdev.com/wp-content/uploads/2017/03/5bc8f37-3668-POE-LMFM-pour-le-WEB-GB-05-2018.pdf> (accessed 20 March 2021).
- Wang S., Lin W., Yang Y., Xiao X. (2015) Efficient Route Planning on Public Transportation Networks. *Conference: the 2015 ACM SIGMOD International Conference*, pp. 967–982.
- Zhou H., Dorsman J.L., Snelder M., de Romph E., Mandjes M. (2019) GPU-based Parallel Computing for Activity-based Travel Demand Models. *Procedia Computer Science*, vol. 151, pp. 726–732.