



21st Transport Sector Coordinating Committee Meeting

22–23 April 2024 • Almaty, Kazakhstan

21-е заседание Координационного комитета по транспортному сектору

22–23 апреля 2024 года • Алматы, Казахстан



Моделирование транспортных сетей с использованием больших данных

Доктор С. Трэвис Уоллер

Генеральный директор
Mobility Thinking Pty Ltd



Автоматизированное моделирование дорожного движения для быстрого планирования

Традиционное моделирование стратегических транспортных сетей может занимать многие **месяцы или годы**

Сбор данных, проверка свойств сети, калибровка и проверка

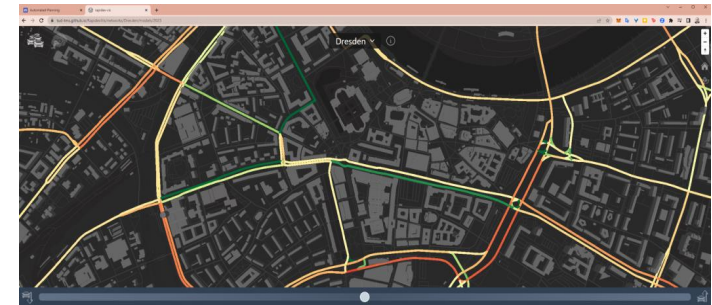
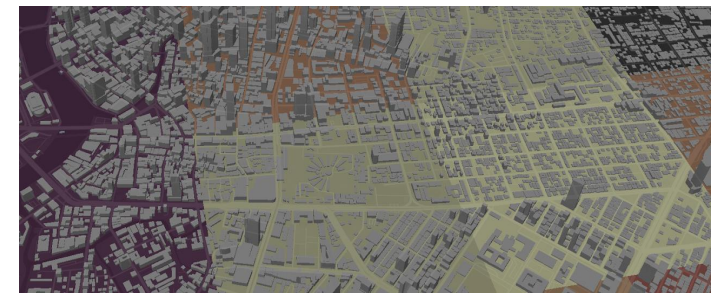
Появились «большие данные», которые могут радикально сократить затраты и время
Модель может быть построена за несколько недель

Однако данные не являются моделями

Даже анализ данных не является моделью

Мы внедрили новые методы для автоматического создания моделей по принципу «а что, если», способных осуществлять гипотетическое планирование

Результат: автоматизировать, а не заменять традиционные модели



* С.Т. Уоллер, С. Чанд, А. Злохутро, Д. Наир, К. Нью, Дж. Ван, Х. Чжан и В. В. Диксит (2021) «Rapidex: новый инструмент для оценки поездок из пункта отправления в пункт назначения с использованием распространенных данных о дорожном движении» Устойчивое развитие (Швейцария), том 13, стр. 11171-11171. <https://doi.org/10.3390/su132011171>

Д. Эшмор, С. Т. Уоллер, К. Виджаяратна и А. Тесслер (2022 г.) «Автоматизированное планирование стратегического управления транспортными системами в развивающихся странах». Материалы Австралийского форума транспортных исследований, 28-30 сентября, Аделаида, Австралия. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4191661

С. Чанд, С. Т. Уоллер и Д. Эшмор (2022 г.) «Создание и сравнительный анализ справедливых инфраструктурных систем на фоне быстрой урбанизации». Аналитическая записка для Целевой группы 8: Инклюзивные, устойчивые и более экологичные инвестиции и финансирование в инфраструктуру, Саммит Т20, Индонезия. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4203715

* С.Т. Уоллер, М. Кураши, А. Сотникова, Л. Карва, С. Чанд (2023) «Анализ и моделирование сетевых моделей передвижения во время вторжения в Украину с использованием краудсорсинговых данных о повсеместном трафике» Transportation Research Record, том 2677, вып. 10, <https://doi.org/10.1177/03611981231161622>

Р. Амрутсаманвар, С. Чанд, М. Кураши и С. Т. Уоллер (2023) «Быстрое планирование: возможности с обширными данными для устойчивой мобильности», Симпозиум IEEE «Умные города», Прага

Предыдущие научно-исследовательские и опытно-конструкторские группы

2003-2011 гг. (Техасский университет в Остине)

2011-2022 гг. (UNSW, Сидней)



Методы разрабатывались на протяжении многих лет и в нескольких университетах

Более 100 исследователей, докторов наук и студентов

Более 40 партнеров по финансированию и сотрудничеству, в том числе:

NVIDIA, Национальный научный фонд США, Исследовательский совет Австралии, Федеральное управление шоссейных дорог США, Министерство транспорта США, TfNSW, Mitsubishi Heavy Industries, Advisian, GoGet Carshare, а также многие другие государственные учреждения, компании-разработчики программного обеспечения, инфраструктурные фирмы, консультационные фирмы, банки, страховые компании, стартапы и т.д.

Mobility Thinking Pty Ltd (MOTH)



Профессор С. Трэвис Уоллер
(гендиректор)



Виктор Прадос-Валерио
(креативный партнер)



Доктор Мелисса Дуэлл
(заместитель креативного
директора)



Доктор Дэвид Эшмор
(креативный партнер –
MOTH Europe)



Доктор Сесилия
да Роха
(креативный директор)



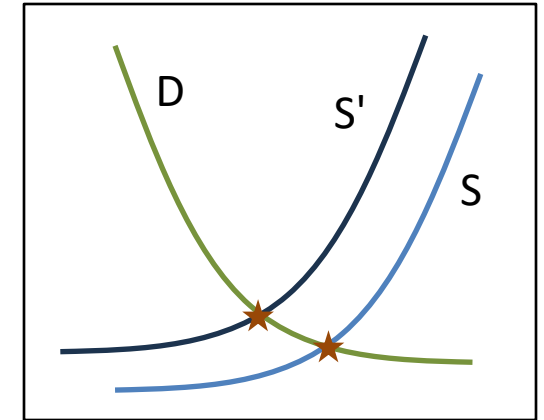
Доктор Касун Виджаяратна
(креативный партнер)

- Методы, перекочевавшие из университета для коммерциализации
- MOTH основана в 2018 году в Австралии

Необходимость моделей планирования

- **Поведение транспортной системы**

- Нелинейно реагирует на изменения
- Является ли совокупная реакция тысяч и миллионов людей, принимающих собственные самооптимизирующиеся решения?
- Поэтому ее традиционно представляют как равновесную систему
- Модели используют объяснения динамики рынка



- **В результате**

- Базовая математическая модель, основанная на равновесии, традиционно была необходима для планирования перевозок и бизнес-кейсов
- Глобальный универсальный подход с 1950-х годов представляет собой «четырёхэтапный процесс» транспортного моделирования

Четырёхэтапная модель поездки – это повсеместная основа для определения транспортных прогнозов, восходящая к 1950-м годам. Это была одна из первых моделей спроса на поездки, которая стремилась связать землепользование и поведение людей для планирования транспорта. (МакНелли, 2000 г.)

Традиционная четырехэтапная модель транспортного планирования

Подход настолько распространен, что каждому этапу посвящена страница Википедии

- https://en.wikipedia.org/wiki/Trip_generation
- https://en.wikipedia.org/wiki/Trip_distribution
- https://en.wikipedia.org/wiki/Mode_choice (используется, когда доступно несколько режимов)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Route_assignment
- На практике этот процесс часто включает в себя
 - Начальный этап: обследование поездок граждан (домохозяйств)
 - Мониторинг физической сети (подсчет проезжей части и т.д.)
 - Постоянное сетевое кодирование и архивирование информации об инфраструктуре
 - Постоянная калибровка модели
- На последнем этапе назначения трафика модель оценивает или прогнозирует
 - Показатели трафика (объемы, скорости, время в пути)
- В связи с необходимостью обследования и постоянного наблюдения
 - Общий традиционный процесс может занять месяцы или даже годы



Вашингтона.
<https://www.mwcog.org/transportation/data-and-tools/modeling/four-step-model/> (по состоянию на апрель 2024 г.)

Также
https://www.transitwiki.org/TransitWiki/index.php/Four-step_travel_model (поддерживается Калифорнийским университетом в Лос-Анджелесе и Caltrans)

Ключевые инновации в представленной методологии моделирования

- На основе всеобъемлющих данных: мы начинаем с 4-го шага – с показателей трафика, затем используем машинное обучение/ИИ для оценки спроса на поездки
- Соответствующие шаги выполняются в обратном порядке (без необходимости опросов или постоянного мониторинга сети)
- Критично: мы поддерживаем распределение трафика и этапы моделирования поездок
 - Ключевое отличие от сугубо аналитических или статистических подходов, которые вообще не используют пошаговые модели!

Быстрое транспортное планирование: методологическая основа

Уоллер и др. (2021 г.)

- Используйте краудсорсинговые и всеобъемлющие данные
- Инструменты сетевого вывода для автоматического создания сети планирования на основе OSM и исторических данных о транспортных мощностях.
- Эволюционный алгоритм машинного обучения, реализованный для получения совокупного прогноза спроса на поездки из пункта отправления в пункт назначения на основе наблюдаемых данных.



Более 20 лет опыта работы с эволюционными алгоритмами (машинное обучение)

Выборка публикаций в рецензируемых научных журналах

Оптимизация сигналов светофора

Сан Д; Бенекотал РФ; Уоллер С.Т. (2003) «**Многоцелевая оптимизация синхронизации сигналов светофора с использованием генетического алгоритма сортировки без доминирования II**», Конспекты лекций по информатике, том. 2724, стр. 2420–2421, http://dx.doi.org/10.1007/3-540-45110-2_143.

Сан Д; Бенекотал РФ; Уоллер С.Т. (2006) «**Формулирование двухуровневого программирования и эвристический подход к решению для динамической оптимизации сигналов светофора**», «Компьютерное проектирование гражданского и инфраструктурного строительства», том. 21, стр. 321–333, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8667.2006.00439.x>

Проектирование транспортной сети

Чон, К., Дж. С. Ли, С. Уккусур и С. Т. Уоллер (2009) «**Новый подход к снижению вычислительной сложности задачи проектирования дискретной сети с использованием селекторокомбинативного генетического алгоритма**», Журнал Совета по транспортным исследованиям, том 1964, выпуск 1, стр. 91-103, 2006. <https://doi.org/10.1177/0361198106196400111>.

Лин Д.Ю.; Унникришнан А; Уоллер С.Т. (2009) «**Генетический алгоритм для решения задачи проектирования динамической сети двухуровневого линейного программирования**», Transportation Letters, том 1, стр. 281-294, <http://dx.doi.org/10.3328/TL.2009.01.04.281-294>.

Лин Д.Ю.; Уоллер С.Т. (2009) «**Квантовый генетический алгоритм для решения задачи проектирования динамических непрерывных сетей**», Transportation Letters, том 1, стр. 81-93, <http://dx.doi.org/10.3328/TL.2009.01.01.81-93>.

Быстрое моделирование транспорта (включая оценку сети и поездок)

Уоллер С.Т.; Чанд С; Злоютро А; Наир Д; Нью С; Ван Дж; Чжан Х; Диксит В.В. (2021) «**Rapidex: новый инструмент для оценки поездок из пункта отправления в пункт назначения с использованием распространенных данных о дорожном движении**», Sustainability (Швейцария), том 13, стр. 11171-11171, <http://dx.doi.org/10.3390/su132011171>

Уоллер, Трэвис и Кураши, Мойид и Сотникова, Анна и Карва, Лавина и Чанд, Сай (2023) «**Анализ и моделирование сетевых моделей передвижения во время вторжения в Украину с использованием краудсорсинговых данных о повсеместном трафике**», Отчеты транспортных исследований: Журнал транспортных исследований Board, том 2677, выпуск 10, стр. 491-507, 2023 г. <https://doi.org/10.1177/03611981231161622>

Распределение товаров в торговых автоматах

Гжибовска Х; Керферд Б; Греттон С; Трэвис Уоллер С. (2020) «**Подход с использованием генетических алгоритмов моделирования и оптимизации к распределению продуктов в системах торговых автоматов**», Expert Systems with Applications, том 145, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113110>

Доставка товарного бетона

Магриби М., Периарадж В., Уоллер С.Т. и Саммут К. (2014) «**Решение проблем доставки товарной бетонной смеси: эволюционное сравнение генерации столбцов и надежного генетического алгоритма**» в публикации Р. Исса (ред.), ASCE - Компьютерные технологии в гражданском строительстве. Орландо, США, 23-25 июня 2014 г. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.176>

Магриби М; Уоллер С.Т.; Саммут С. (2014) «**Последовательный метаэвристический подход к решению крупномасштабных задач по транспортировке товарного бетона**», Journal of Computing in Civil Engineering, том 30, стр. 04014117-04014117, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000453](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000453)

Быстрое планирование: введение методологии

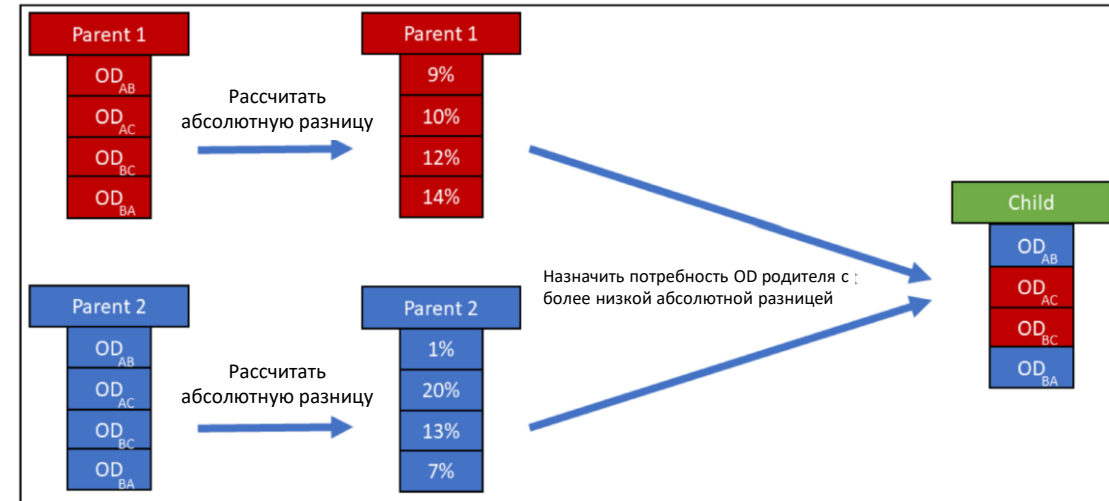
Уоллер и др. (2021)

Функции приспособленности

Acronym	Method Name	Governing Equation	Notation
MAPE-ODTT	Mean absolute percentage error of OD travel times.	$E = \sum_{rs} d_{rs} \cdot \frac{ TT_{rs}^{est} - TT_{rs}^{obs} }{TT_{rs}^{obs}}$	<ul style="list-style-type: none"> E—Error value. TT_{rs}^{est}—Estimated (from a solution) travel time between OD pair r and s. TT_{rs}^{obs}—Observed (from any pervasive platform) travel time between OD pair r and s. N_{OD}—Number of OD pairs.
RMSE-ODTT	Root mean square error of OD travel times.	$E = \sqrt{\frac{\sum_{rs} (TT_{rs}^{est} - TT_{rs}^{obs})^2}{N_{OD}}}$	<ul style="list-style-type: none"> f_{ij}^{est}—Estimated (from a solution) flow between link i and j. f_{ij}^{obs}—Observed (from loop detector or other sources) flow between link i and j. N_f—Number of links in the network where flow values are known.
MAPE-LF	Mean absolute percentage error of link flows.	$E = \sum_{ij} \frac{ f_{ij}^{est} - f_{ij}^{obs} }{f_{ij}^{obs}}$	<ul style="list-style-type: none"> t_{ij}^{est}—Estimated (from a solution) travel time between link i and j. t_{ij}^{obs}—Observed (from any pervasive traffic platform) travel time between link i and j. N_t—Number of links in the network where travel time values are known.
RMSE-LF	Root mean square error of link flows.	$E = \sqrt{\frac{\sum_{ij} (f_{ij}^{est} - f_{ij}^{obs})^2}{N_f}}$	<ul style="list-style-type: none"> R_i^{est}—Estimated (from a solution) travel time along a user defined route/corridor i. R_i^{obs}—Observed (from any pervasive platform) travel time along a user defined corridor i. N_R—Number of user-defined corridors.
RMSE-LTT	Root mean square error of link travel times.	$E = \sqrt{\frac{\sum_{ij} (t_{ij}^{est} - t_{ij}^{obs})^2}{N_t}}$	
MAPE-LTT	Mean absolute percentage error of link travel time.	$E = \sum_{ij} \frac{ t_{ij}^{est} - t_{ij}^{obs} }{t_{ij}^{obs}}$	
MAPE-C	Mean absolute percentage error of corridor travel times.	$E = \sum_i \frac{ R_i^{est} - R_i^{obs} }{R_i^{obs}}$	

Начальные решения

Acronym	Method Name	Governing Equation	Notation
TFM	Travel time—free flow travel time model.	$d_{rs} = \frac{TT_{rs}^{obs}}{\sum_{rs} \frac{TT_{rs}^{obs}}{TT_{rs}^{obs}}} \cdot D$	<ul style="list-style-type: none"> TT_{rs}^{obs}—Observed (from any pervasive platform) travel time between OD pair r and s. TT_{rs}^f—Observed free-flow travel time between OD pair r and s.
FDM	Free flow travel time—distance model.	$d_{rs} = \frac{TT_{rs}^f}{\sum_{rs} \frac{TT_{rs}^f}{k_{rs}^2}} \cdot D$	<ul style="list-style-type: none"> k_{rs}—Average shortest distance between the OD pair r and s when the network is empty.
TDM	Travel time distance model.	$d_{rs} = \frac{TT_{rs}^{obs}}{\sum_{rs} \frac{TT_{rs}^{obs}}{k_{rs}^2}} \cdot D$	<ul style="list-style-type: none"> G_r—user-defined proportion value of zone r, where $\sum G_r = 1$. A_s—user-defined proportion value of zone s, where $\sum A_s = 1$.
CGM	Custom gravity model.	$d_{rs} = \frac{G_r A_s}{\sum_{rs} \frac{G_r A_s}{k_{rs}^2}} \cdot D$	



Быстрое планирование: сравнение с устоявшимися моделями и исследованиями

Уоллер и др. (2021)

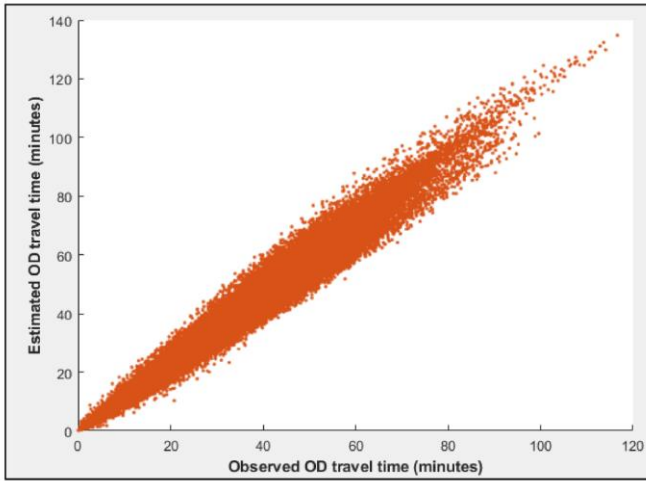


Figure 4. Observed vs. estimated OD travel times.

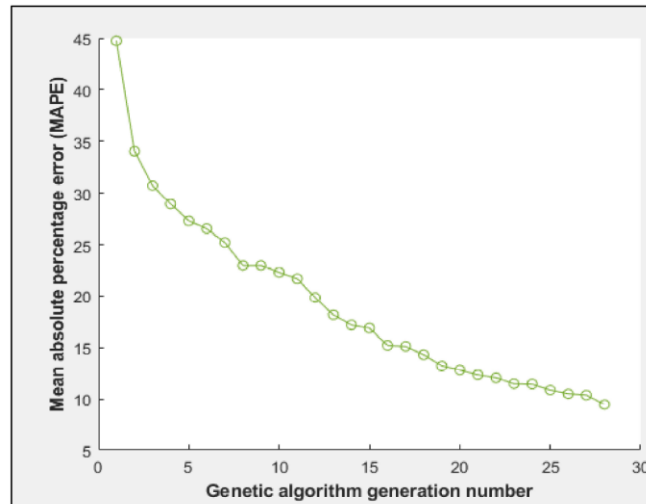
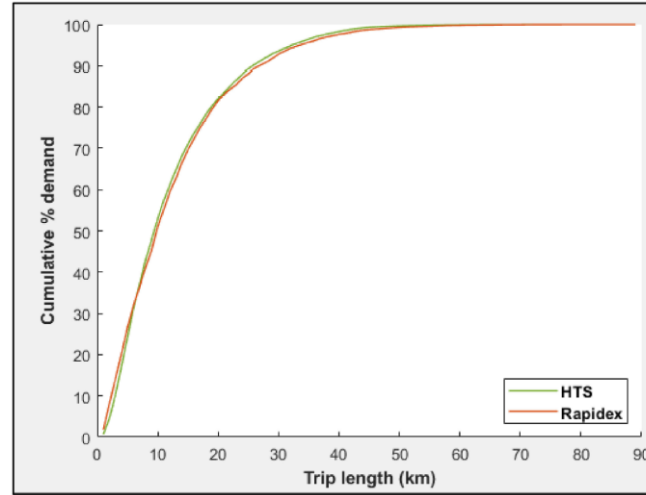
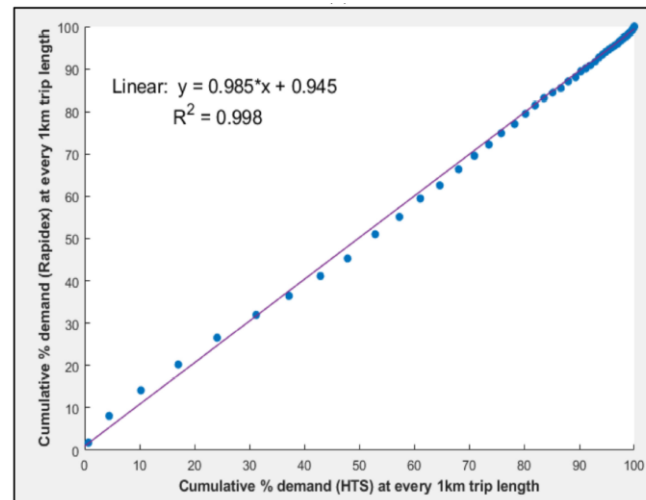


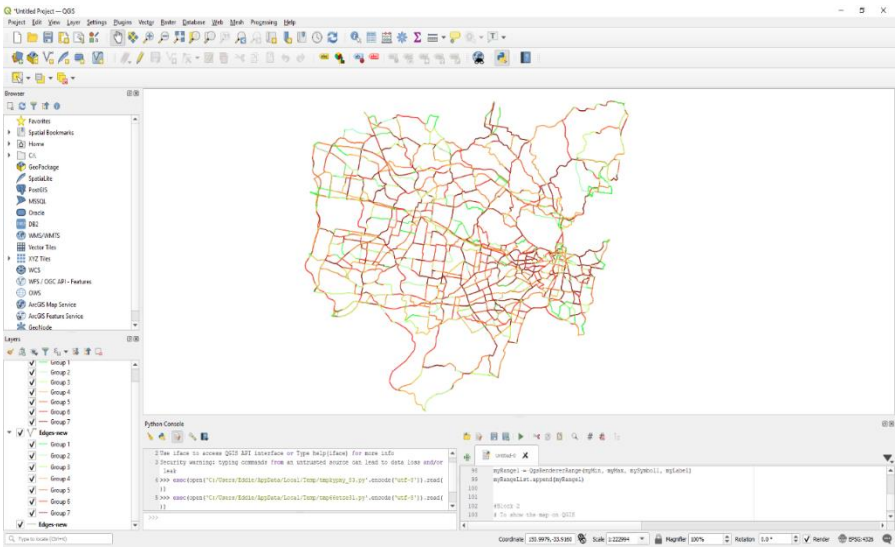
Figure 5. Convergence of the genetic algorithm solution.



Сравнение с:

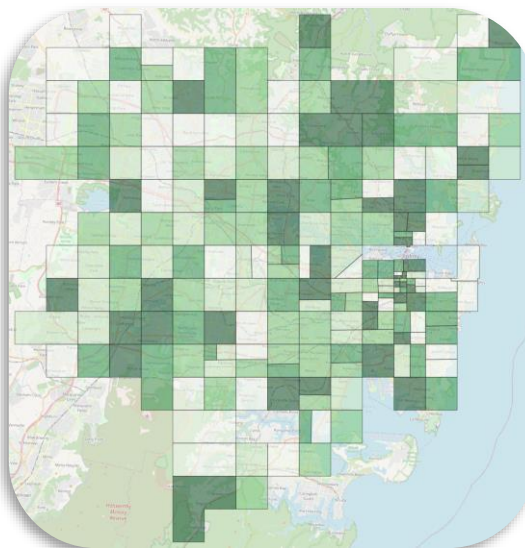
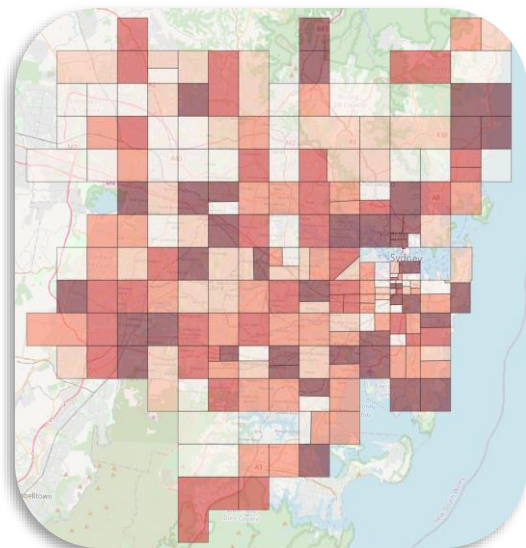
- Наблюдаемыми данными
- Обследованием поездок домохозяйств
- Более уточненной (трудоемкой) моделью стратегического планирования

Пример из практики №1: Сиднейский регион



Поколения

Достопримечательности

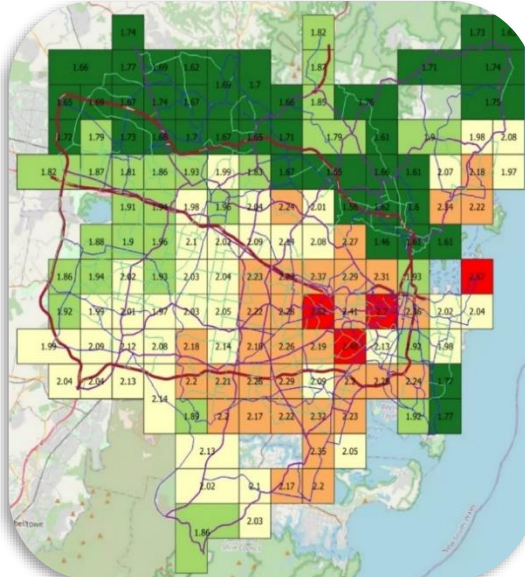
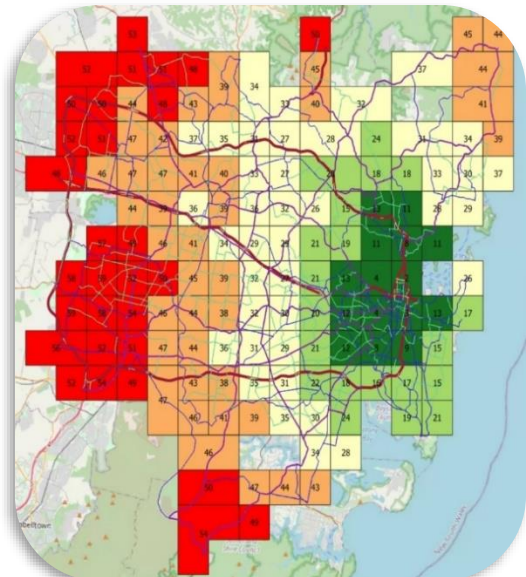
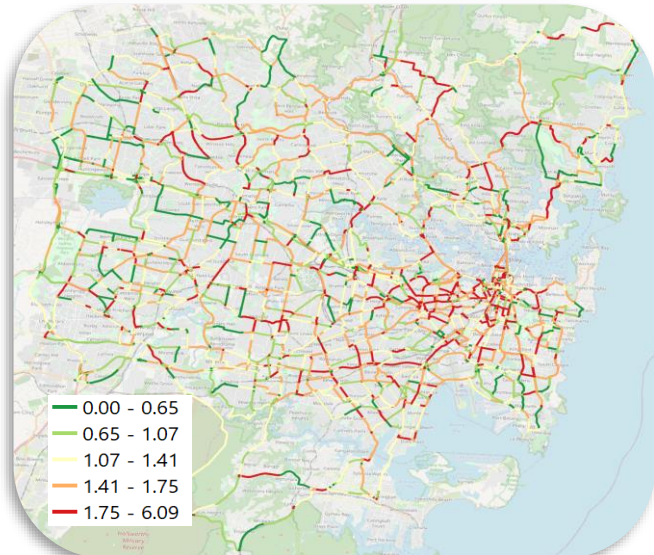
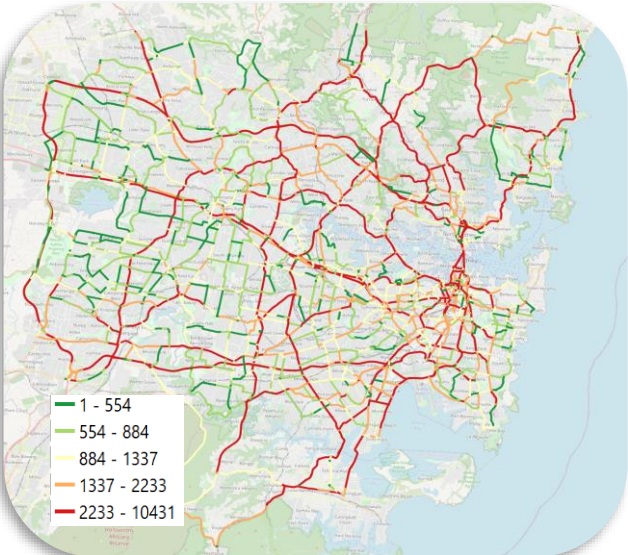


Объем

Отношение объема транспортного потока к пропускной способности дороги

Время в пути до центрального делового района

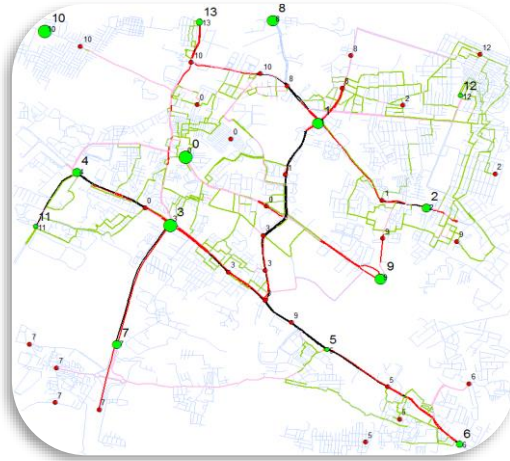
Индекс заторов в центральном деловом районе



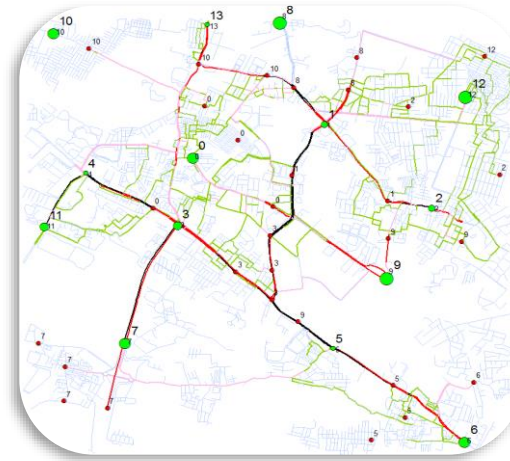
Пример из практики №2: HiTech City, Хайдарабад (Индия)

Проект: необходимо создать модель без данных от агентства для оценки изменений в функционировании дорожного движения в связи со строительством нового метро

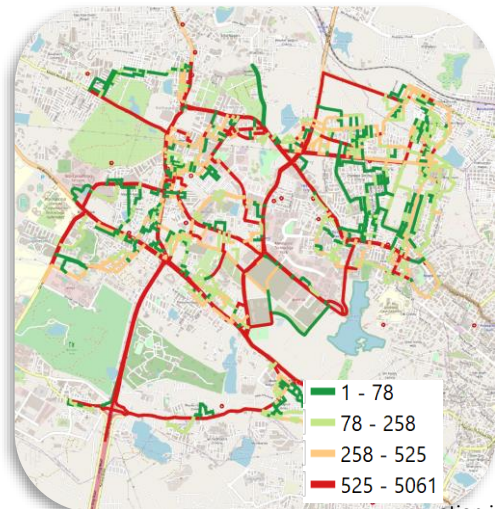
Поколения поездок



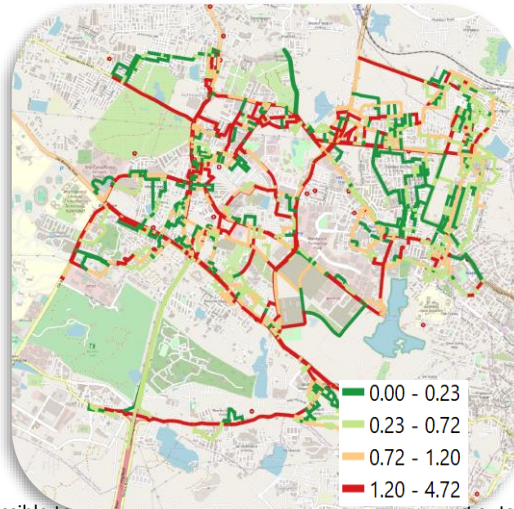
Достопримечательности поездки



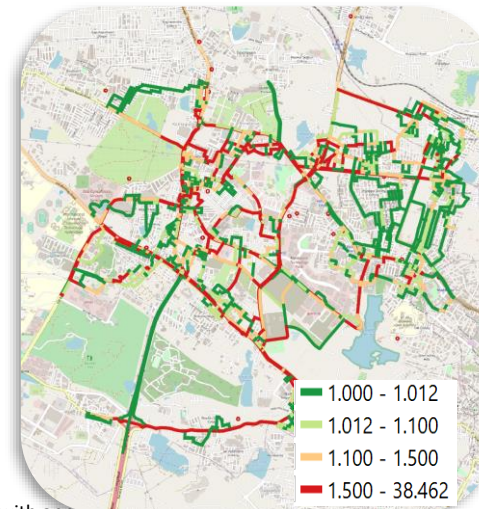
Объем



Отношение объема транспортного потока к пропускной способности дороги



Индекс заторов



Модели в Украине

Уоллер и др. (2023)

Анализ за период с 26 февраля 2022 года по 12 апреля 2022 года

Сосредоточение внимания на коэффициенте вариации (стандартное/среднее)

Первая известная статья о поведении в поездках во время конфликтов между людьми

Ориентирована на тех, кто остается на месте, нежели на эвакуации/перемещении беженцев

В число исследуемых приложений входят:

Быстрая оценка потребностей в реконструкции

Проектирование городов, более устойчивых к человеческим конфликтам

Киев

— Соединения: 4069

— Узлы: 2224

Харьков

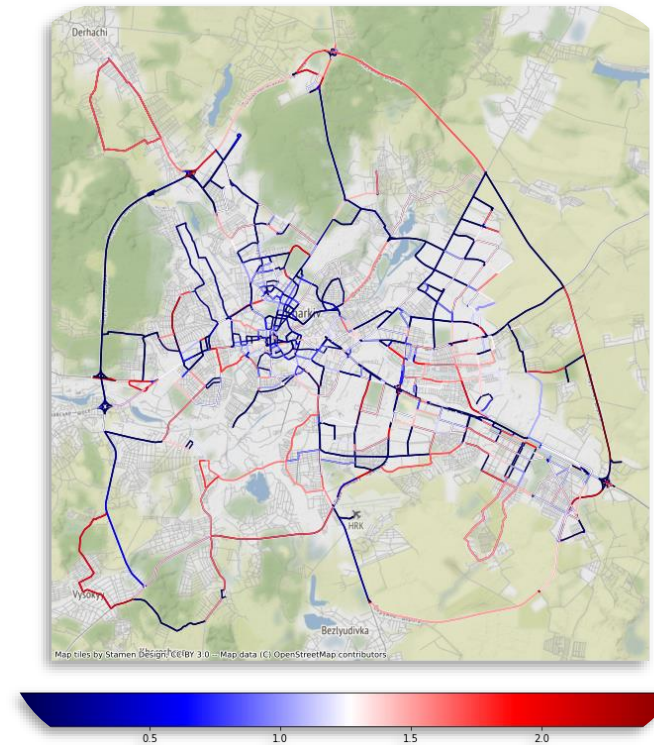
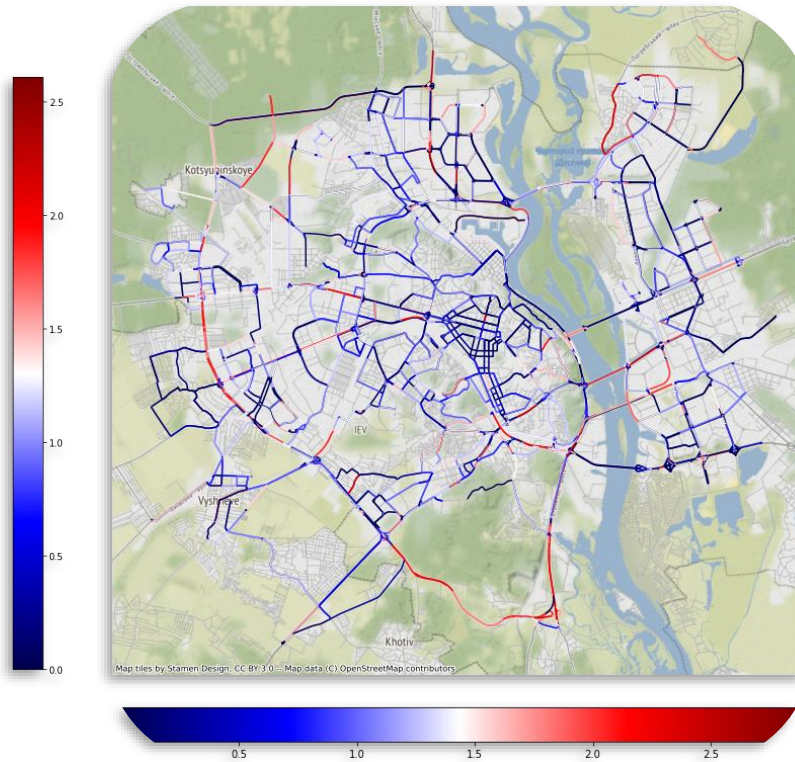
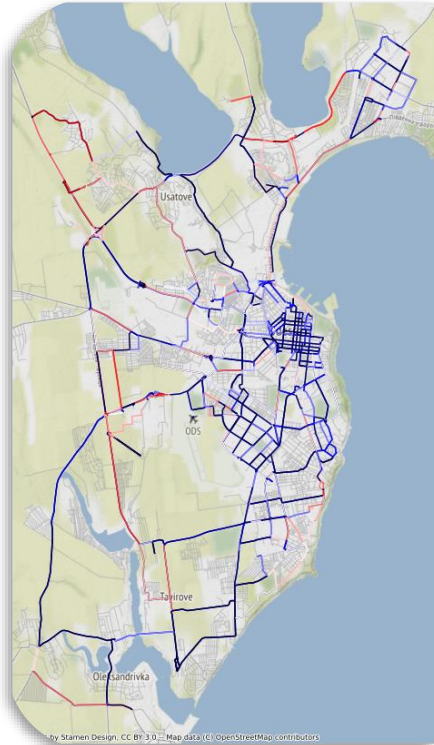
— Соединения: 2453

— Узлы: 1017

Одесса

— Соединения: 1765

— Узлы: 800



Уоллер, Трэвис и Кураши, Мойид и Сотникова, Анна и Карва, Лавина и Чанд, Сай (2023) «Анализ и моделирование сетевых моделей передвижения во время вторжения в Украину с использованием краудсорсинговых данных о повсеместном трафике», Отчеты транспортных исследований: Журнал транспортных исследований Board, том 2677, выпуск 10, стр. 491-507, 2023 г.

INTERNAL: This information is accessible to ADB Management and staff. It may be shared outside ADB with appropriate permission.

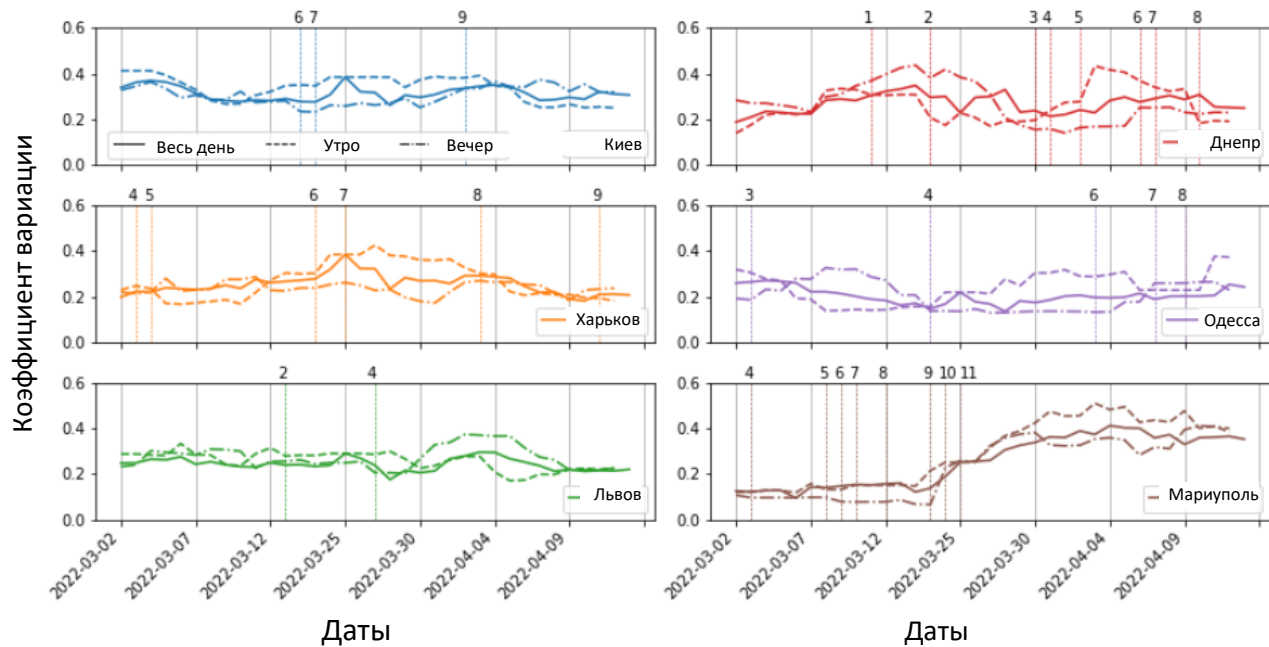


Рисунок 3. Усредненный по сети коэффициент вариации для времени в пути (7-дневный переезд)

Таблица 2. Ключевые статистические данные анализа оценки OD

Город	Дата	% изменения средней продолжительности поездки по сравнению с базовым сценарием	% изменения среднего времени в пути по сравнению с базовым вариантом	% изменения общего спроса по сравнению с базовым сценарием
Киев	28 февраля 2022 г.	-	-	-
	16 марта 2022 г.	-5,52	-0,28	+3,90
	12 апреля 2022 г.	+2,74	+1,92	+0,11
Харьков	28 февраля 2022 г.	-	-	-
	31 марта 2022 г.	-3,14	+1,55	+6,05
	12 апреля 2022 г.	+3,40	+11,79	+2,63
Мариуполь	28 февраля 2022 г.	-	-	-
	16 марта 2022 г.	+13,11	+28,44	-2,50
	12 апреля 2022 г.	-6,76	-11,66	+0,58

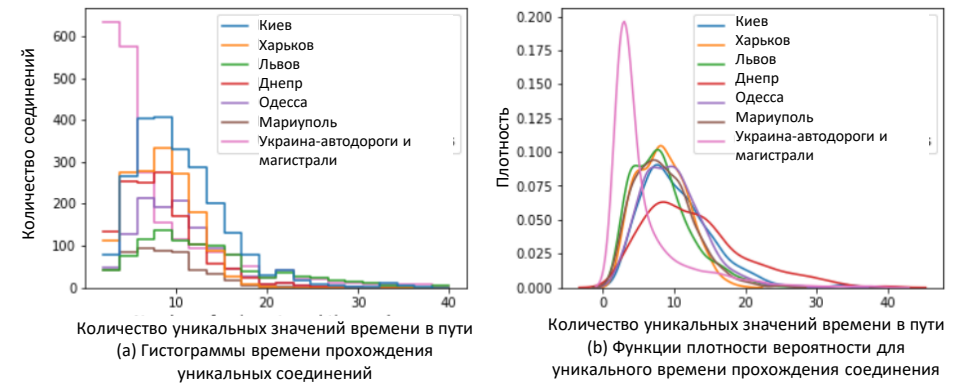


Рисунок 1. Графики надежности данных TomTom

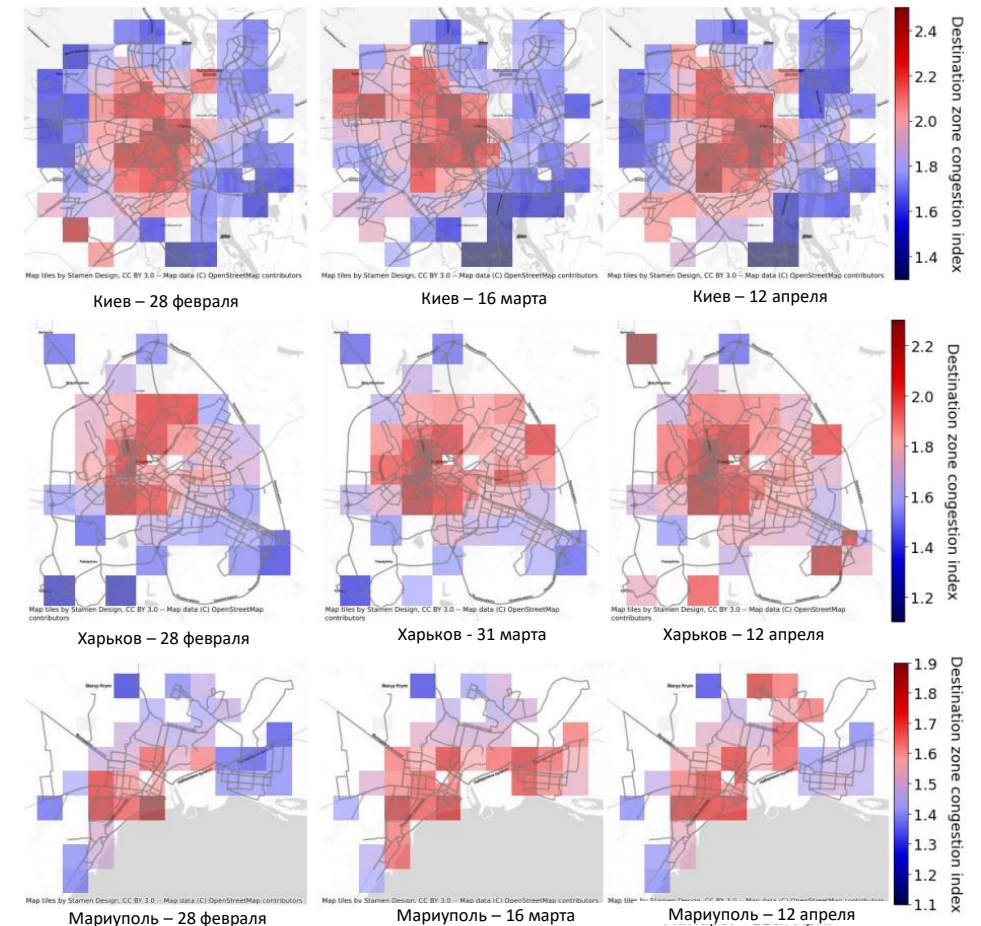


Рисунок 5. Карты оттонов среднего индекса загруженности зон в качестве пункта назначения

Модель быстрого планирования: Армения

Соединения: 3677

Узлы: 1962

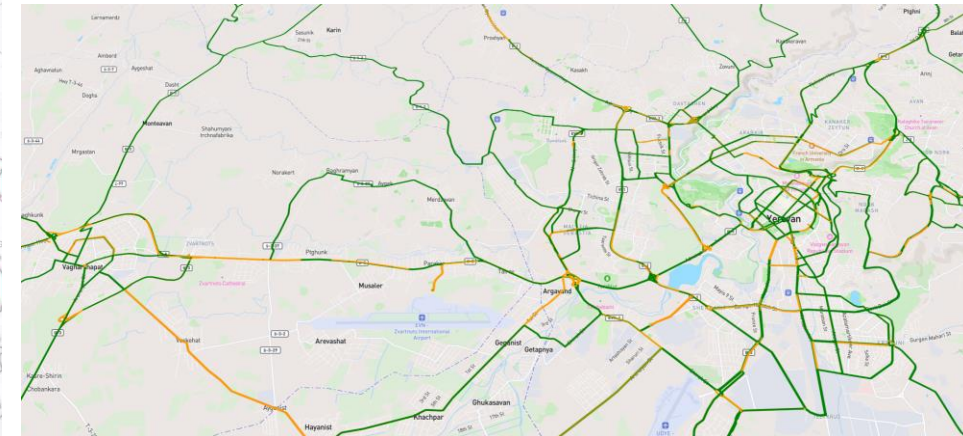
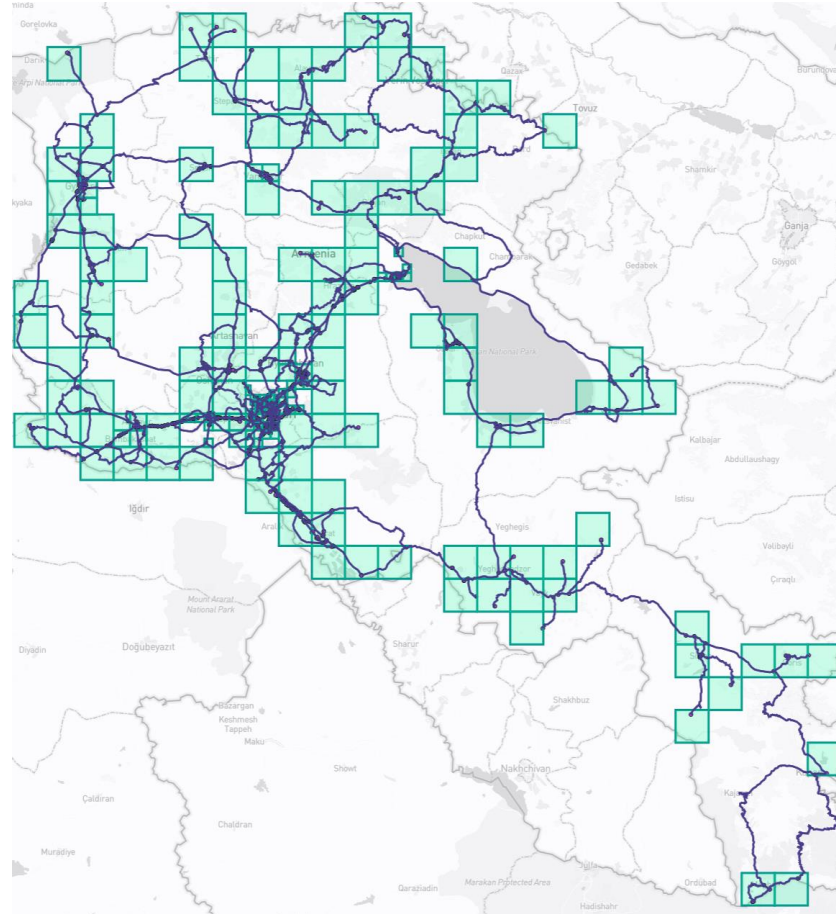
Зоны: 175

Среднее время в пути: 37 мин.

Среднее расстояние: 30,57 км

Смоделировано:

- Назначение маршрута движения
- Объем/вместимость
- Время в пути
- Скорость
- Скопление

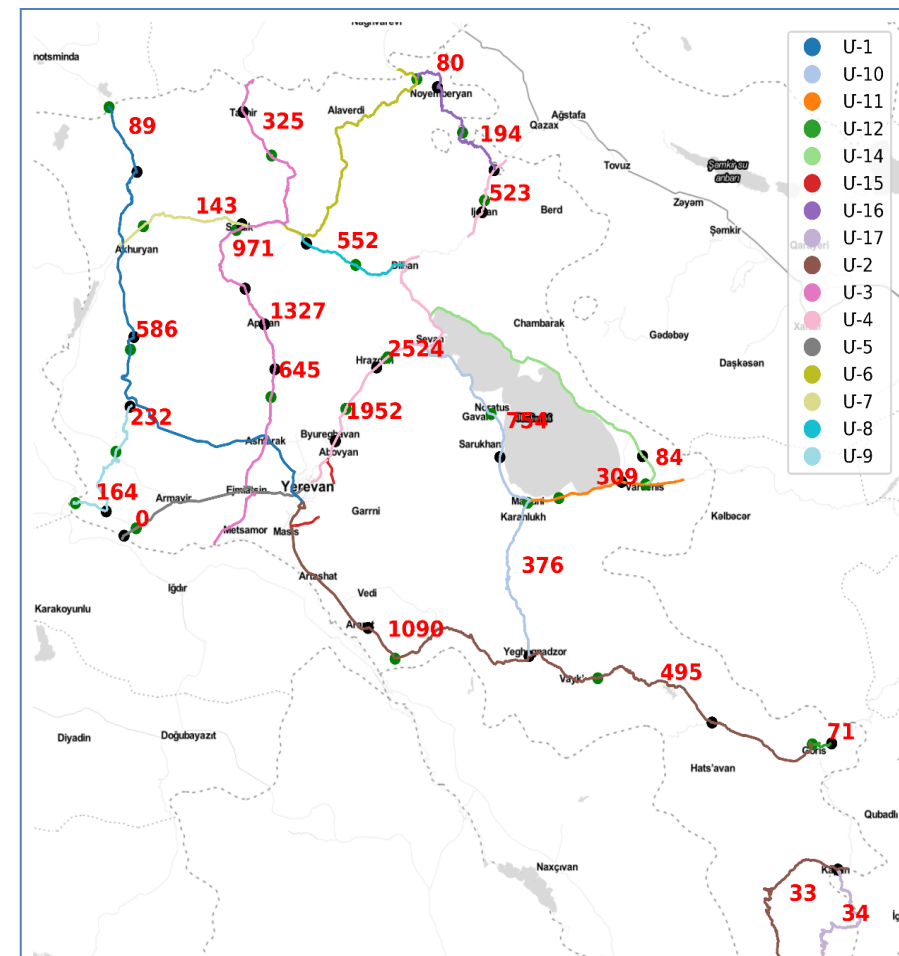


Сравнение модели быстрого планирования с сообщенными суточными расходами

* Сообщенные данные относятся к 2019 году, если не указано иное из-за отсутствия данных в отчете

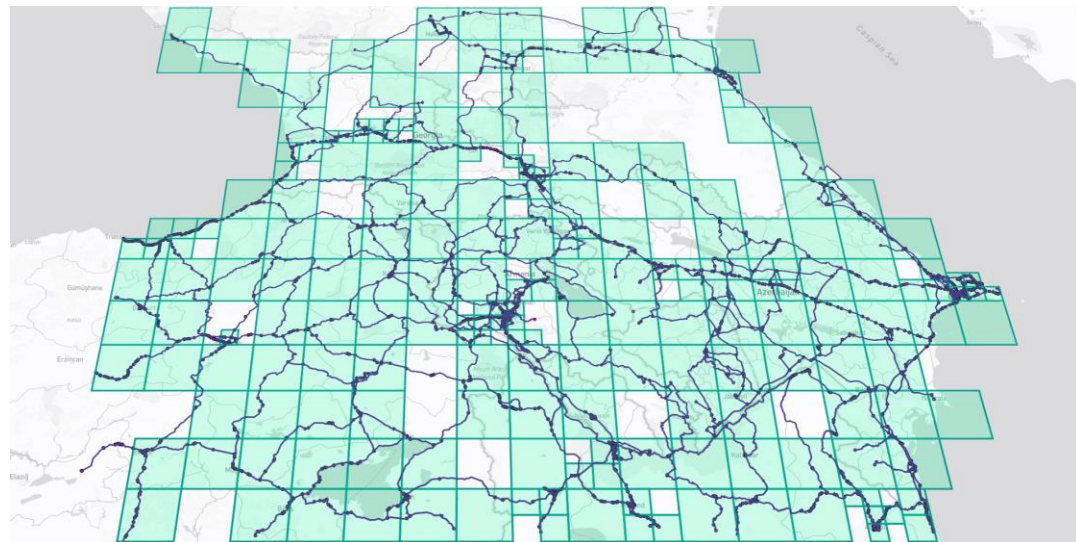
Тип дороги	Расчетное значение AADT в RPModel	Сообщенное значение AADT	Длина в RPModel	Заявленные значения длины
Автоматострали между штатами	3612 ед./сут.	3600 ед./сут.	1798 км	1724 км
Республиканец	1107 ед./сут.	1078 ед./сут.	1452 км	1968 км

Дорога №	Имя	По данным AADT 2019 г. Среднее значение (ед./сут.)	Значения AADT, смоделированные в рамках быстрого планирования
			Понедельник (12.12.2022, срез в 9-10 утра) Пропускной поток по проезжей части (значение AADT, ед./сут.)
М-1	Ереван-Гюмри-граница с Грузией	24 551	23 484
М-3:	Маргара-Ванадзор-Ташир -Граница с Грузией	6 294	8 226
М-4:	Ереван-Сан-Ижан-Адр	19 512	25 932
М-5:	Ереван-Армавир-Граница с Турцией	20 390	22 292
М-8:	Ванадзор-Дилижан	1 415 (2018)	3 423
М-10:	Сен-Мартуни-Гетап	5 117	5 756



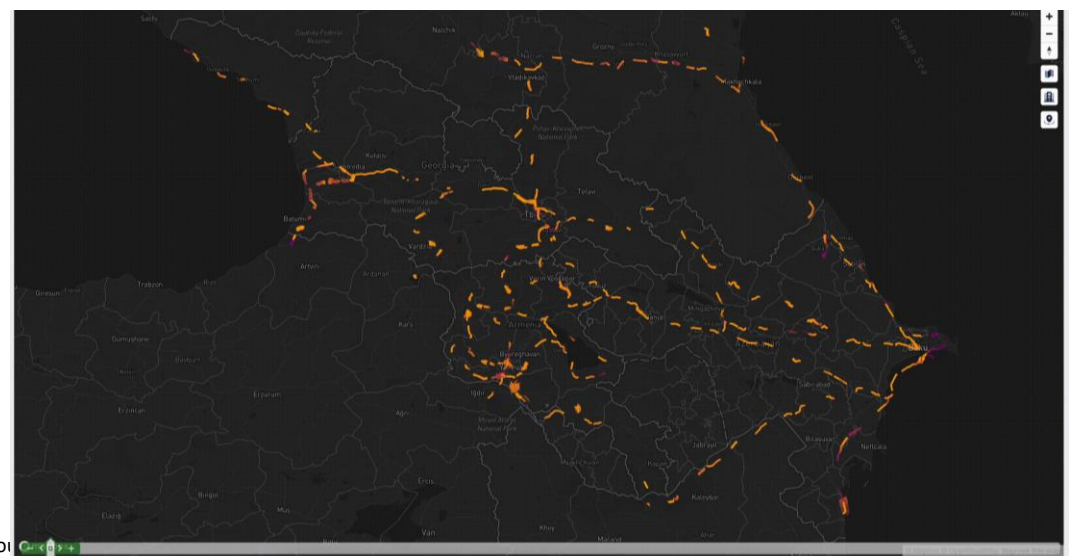
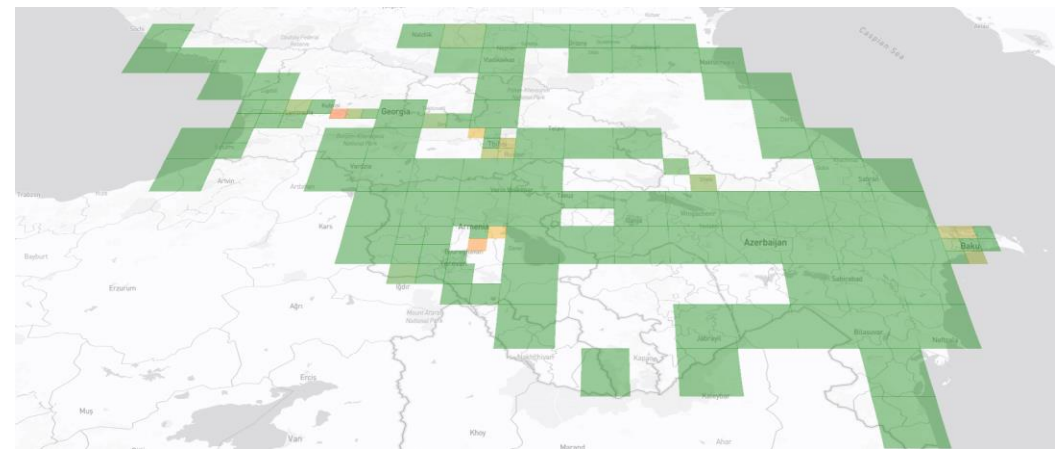
Модель Южного Кавказа

- Охват, включая следующие страны:
 - Армения, Азербайджан и Грузия
 - с частями Ирана, Турции и России
- Были смоделированы две версии сети:
 - Первая сеть
 - 20 274 соединения
 - Общая протяженность: 39 392 км
 - 221 зона анализа трафика
 - Вторая оптимизированная сеть
 - 6 839 соединений
 - Общая длина 12 542 км
 - 119 зон анализа трафика



Модель Южного Кавказа

- Базовый вариант
 - Общий пробег автомобиля: 63 357 589 километров (пробег транспортного средства в километрах, VKT)
- Сравнение
 - Время в пути собрано по **всем** соединениям
 - Среднеквадратическая погрешность: 16,19 секунд
 - Также было предоставлено 76 конкретных соединений для поддержки прямого сравнения командой в более широком составе
- Под всеми границами полностью задействован сценарий «а что, если?»
 - 62 621 005 VKT
 - 736 586 (1,16%) – снижение
 - Обратите внимание, что объем работ не включает вызванный будущий спрос



Резюме

Через большие данные и машинное обучение

Новые источники данных становятся все более доступными

Моделирование можно значительно ускорить

Но для планирования модели должны сохранять важные свойства

Аналитика отличается от планирования

Всегда рад любым дополнительным вопросам

travis@mobilitythinking.com

