

УДК 711.4:656.142

Б.С. Осмонов, samosmonov339@gmail.com

Р.Б. Кубанычова, balnurkubanychova@gmail.com

Институт машиноведения автоматизации и геомеханики НАН КР

Кыргызско-Германский институт прикладной информатики

ОТ АВТОМОБИЛЕЦЕНТРИЧНОГО К ЧЕЛОВЕКОЦЕНТРИЧНОМУ ГОРОДУ: ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПЕШЕХОДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Многие города мира проектировались прежде всего под нужды автомобильного транспорта, что привело к фрагментированной и небезопасной пешеходной инфраструктуре, препятствующей передвижению пешком и закрепляющей зависимость от личного автомобиля. В данной работе разрабатывается воспроизводимая методология диагностики пешеходной инфраструктуры в автомобилецентричных городах посредством её сопоставления с признанными пешеходными эталонами, такими как с моделью Фрайбурга (Германия). Предлагаемый метод основан на многокритериальном анализе, который охватывает три измерения: связность (непрерывность тротуарной сети, плотность пешеходных переходов, полнота маршрутной сети), безопасность (интенсивность транспортного потока, защищённость на пересечениях, данные о ДТП) и комфорт (удобства для пешеходов, освещённость). Методология опирается на открытые данные OpenStreetMap и общедоступные государственные источники, что обеспечивает её доступность без применения дорогостоящих проприетарных данных. Для проверки работоспособности метода проведена пилотная апробация на материале города Бишкек (Кыргызстан). Методы пространственного анализа позволяют формировать тепловые карты, выявляющие критические пробелы в инфраструктуре, а также «тротуарные пустыни» и приоритетные зоны вмешательства. Основной вклад работы – системная, воспроизводимая методология, позволяющая городским планировщикам, исследователям и общественным организациям диагностировать дефициты пешеходной инфраструктуры в условиях ограниченной доступности данных.

Ключевые слова: пешеходная доступность, пешеходная инфраструктура, многокритериальный анализ, OpenStreetMap, устойчивое городское планирование, модель Фрайбурга, пространственный анализ, автомобилецентричные города, Бишкек, Кыргызская Республика.

Введение

Современный город переживает переосмысление своей базовой парадигмы. На протяжении большей части XX века градостроительные решения принимались в пользу автомобиля: расширялась улично-дорожная сеть, увеличивались парковочные пространства, жилые кварталы разделялись скоростными магистралями. Результатом стала городская среда, в которой передвижение пешком превратилось из естественной практики в исключение. Однако в условиях нарастающих экологических вызовов, роста городского населения и запроса на повышение качества жизни международное сообщество планировщиков, политиков и исследователей всё настойчивее обращается к концепции «города для людей» [1].

Пешеходная доступность – способность городской среды обеспечивать удобное, безопасное и привлекательное передвижение пешком и признаётся одним из ключевых индикаторов качества городской жизни [2]. Исследования устойчиво показывают положительную связь между уровнем пешеходной доступности и здоровьем населения, социальной сплочённостью, экономической активностью и снижением углеродного следа городского транспорта [3, 4]. Тем не менее большинство городов мира по-прежнему испытывают острые дефициты пешеходной инфраструктуры: разрывы тротуарной сети, отсутствие защищённых пешеходных переходов, недостаточное освещение, неприспособленность среды для граждан, которые не пользуются автомобилями.

Особую актуальность проблема приобретает для городов Кыргызской Республики. Бишкек и другие города страны развивались в рамках советской градостроительной модели, ориентированной на широкие проспекты и массовый автомобильный транспорт, с

последующей стихийной автомобилизацией в постсоветский период. Даже существующие элементы пешеходной инфраструктуры в этих городах нередко деградированы или фрагментированы, что делает системное планирование улучшений крайне затруднённым [5].

Для решения подобных задач в научной литературе накоплен ряд методических подходов, однако каждый из них обладает существенными ограничениями, которые не позволяют применить его в качестве полноценного инструмента городской диагностики. Наиболее распространённые из них являются индексные методы, полевые аудиты, ГИС-методы и многокритериальный анализ (далее подробно рассмотрены в следующем разделе). Анализ их ограничений показывает, что ни один из существующих подходов не решает одновременно четыре задачи: охватывать несколько качественных измерений пешеходной среды; быть масштабируемым на уровень всего города; допускать сравнение с признанными эталонами; и опираться исключительно на открытые данные. Именно эту нишу заполняет предлагаемая методология.

Таким образом, цель настоящей работы – разработать и верифицировать воспроизводимую методологию диагностики пешеходной инфраструктуры, применимую к автомобилецентричным городам с ограниченной цифровой базой данных, с целью построить более человекоцентричный город. Для достижения цели решаются следующие задачи: систематизировать существующие методы оценки пешеходной среды и выявить их ограничения; на основе выявленных пробелов разработать многокритериальную диагностическую систему, использующую исключительно открытые данные; верифицировать систему в ходе пилотной апробации на материале Бишкека; оценить пространственную неоднородность пешеходного качества и сформулировать приоритеты для планировщиков.

Анализ существующих подходов и обоснование необходимости новой методологии

В научной литературе выделяют четыре основные группы методов оценки пешеходной доступности. Их сравнительный анализ позволяет точно сформулировать проблему, которую должна решить предлагаемая система.

Первой группой являются индексные методы. Наиболее распространённым является индекс Walk Score, автоматически вычисляющий доступность объектов в радиусе пешей досягаемости от заданного адреса. Несмотря на простоту и массовое применение, метод критикуется за принципиальное ограничение: он измеряет, куда можно дойти, но полностью игнорирует как, а именно качество, безопасность и комфорт самого пути [8]. Два адреса с одинаковым Walk Score могут принципиально различаться: у одного может быть непрерывный тротуар, освещение и защищённые переходы, а у другого разбитое покрытие, отсутствие разметки и высокоскоростной трафик рядом. Для планировщика, принимающего решения об инфраструктурных вмешательствах, такой инструмент практически бесполезен. Пример визуализации индекса Walk Score представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Карта индекса пешеходной доступности Walk Score (100 баллов)

Второй группой являются аудиты пешеходной среды. Методы, основанные на систематическом обследовании улиц по стандартизированным протоколам (SPACES, PEQI, PERS и др.), обеспечивают высокую детализацию и достоверность данных, позволяя зафиксировать именно те качественные характеристики, которые упускают индексные методы [9]. Однако их принципиальным ограничением является масштаб: полевое обследование города с разветвлённой улично-дорожной сетью требует много времени и значительных финансовых ресурсов. На практике аудиты применяются для отдельных кварталов или коридоров, но не для системной диагностики на городском уровне. Кроме того, их результаты трудно сопоставимы между собой без единой нормативной шкалы. Результаты оценки по протоколу PEQI показаны на рисунке 2.

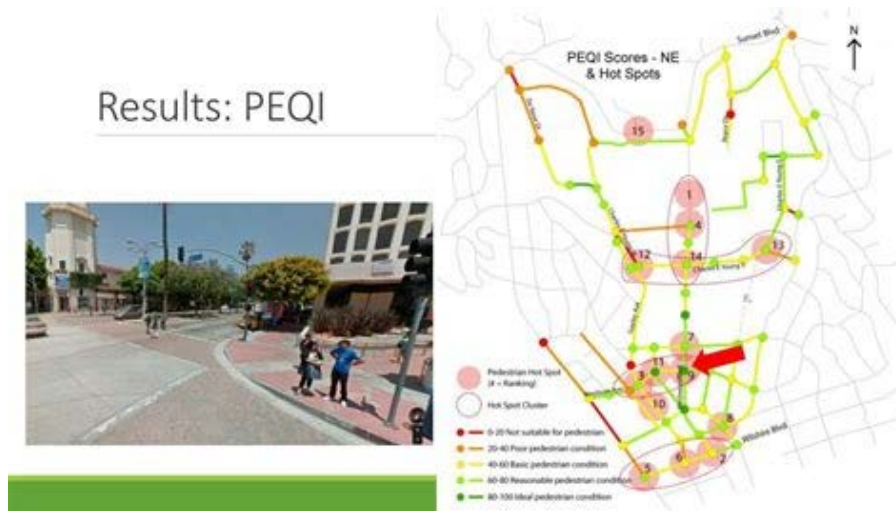


Рисунок 2 – Результаты оценки пешеходной среды по методике PEQI

Следующей группой являются ГИС-методы и пространственный анализ. Применение геоинформационных систем позволяет преодолеть ресурсные ограничения полевых аудитов за счёт обработки пространственных данных об улично-дорожной сети, землепользовании и демографии [10, 11]. Сетевой анализ выявляет «тротуарные пустыни» и разрывы связности на уровне всего города. Однако ключевым недостатком этой группы методов является отсутствие сравнительной перспективы: метод описывает текущее состояние, но не указывает, насколько оно плохо относительно достижимого эталона, и не формирует количественных целевых показателей для планировщиков [7]. Иллюстрация сетевого анализа пешеходных и велосипедных потоков приведена на рисунке 3.

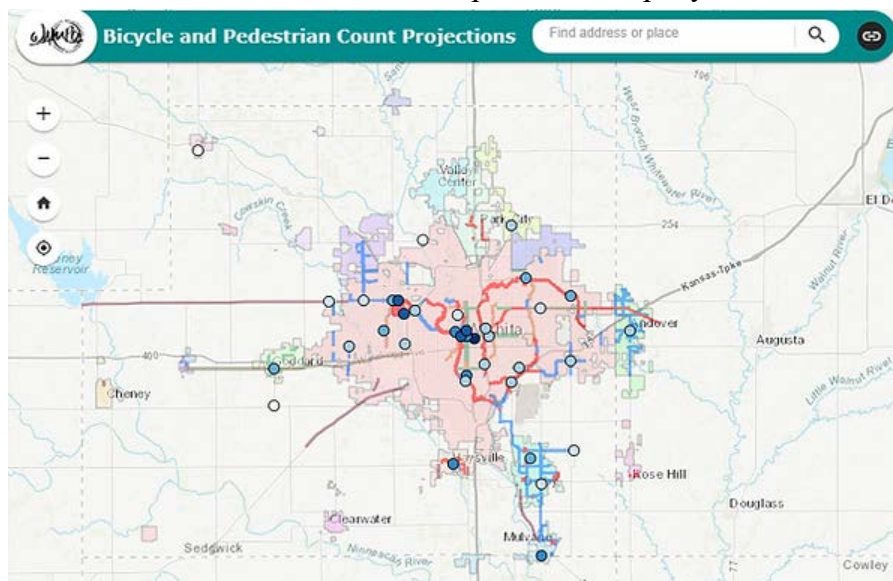


Рисунок 3 – Проекция точек учёта велосипедного и пешеходного движения

И последней группой является Многокритериальный анализ (МКА). Интеграция нескольких оценочных измерений в единую систему признаётся наиболее перспективным подходом для комплексной диагностики [12]. Исследования показывают, что МКА позволяет учитывать как объективные характеристики инфраструктуры, так и субъективные предпочтения пользователей [13, 14]. Тем не менее в существующих реализациях МКА, как правило, опирается на проприетарные или ведомственные источники данных – официальную статистику ДТП, результаты платных геодезических съёмок, коммерческие базы данных – что делает его практически недоступным для городов с ограниченными ресурсами, к числу которых относится большинство городов КР. Пример структуры измерений МКА представлен на рисунке 4.

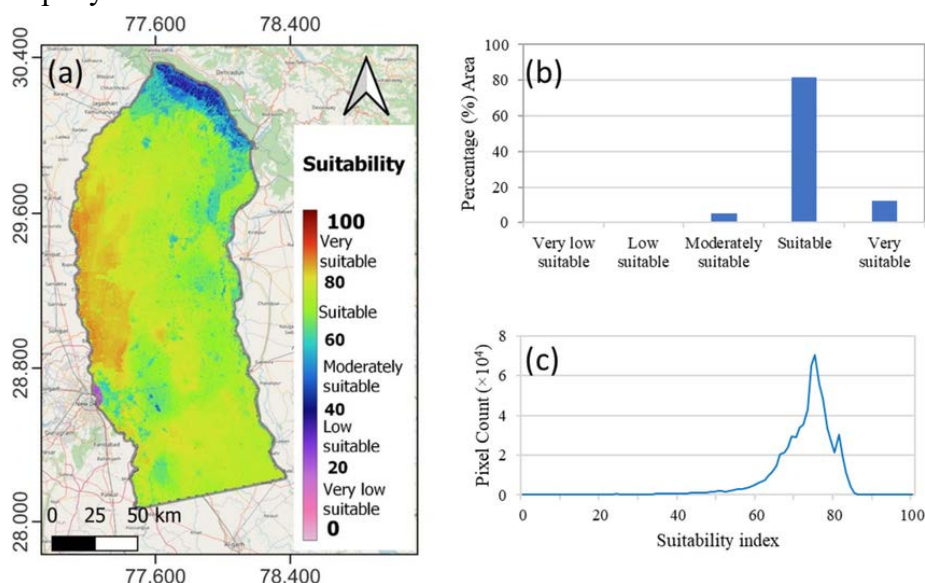


Рисунок 4 – Распределение территории по категориям индекса пригодности для пешеходного движения (в % от площади и в пикселях $\times 10^4$).

Сравнительный анализ рассмотренных подходов и место предлагаемой методологии представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов оценки пешеходной доступности

Метод	Преимущества	Ограничения	Применимость
Индексные методы (Walk Score и др.)	Простота, автоматизация, широкий охват	Игнорирование качества среды и безопасности	Первичная оценка на уровне адресов
Полевые аудиты	Высокая детализация и точность	Ресурсоёмкость, ограниченный охват	Локальные детальные обследования
ГИС-пространственный анализ	Масштабируемость, пространственная визуализация	Зависимость от качества данных	Городской и районный масштаб
Многокритериальный анализ (МКА)	Комплексность, учёт нескольких измерений	Субъективность весовых коэффициентов	Системная городская диагностика
Предлагаемая методология (OSM + МКА + эталонное сравнение)	Воспроизводимость, открытые данные, сравнительная перспектива	Неполнота OSM-атрибутов в городах КР	Диагностика автомобилецентричных городов, в т.ч. городов КР

Таким образом, ни один из существующих методов не решает одновременно четыре задачи, которые принципиально необходимы для практической диагностики пешеходной инфраструктуры в городах КР: (1) оценивать несколько качественных измерений среды, а именно не только связность, но и безопасность, и комфорт; (2) быть масштабируемым на

уровень всего города без значительных полевых ресурсов; (3) обеспечивать сравнительную перспективу через сопоставление с достижимым эталоном; (4) опираться исключительно на открытые данные. Предлагаемая методология проектировалась именно как ответ на этот совокупный пробел.

Предлагаемая методология многокритериальной диагностики

Предлагаемый метод является ключевым вкладом настоящей работы и представляет собой воспроизводимую систему оценки пешеходной инфраструктуры, структурированную в виде последовательных воспроизводимых шагов. Логика построения метода непосредственно определяется выявленными пробелами: многокритериальность устраняет ограничение индексных методов; городской масштаб через OSM устраняет ограничение полевых аудитов; эталонное сравнение с Фрайбургом устраняет ограничение ГИС-методов; опора на открытые данные устраняет ограничение традиционного МКА. Общая схема метода представлена на рисунке 5.

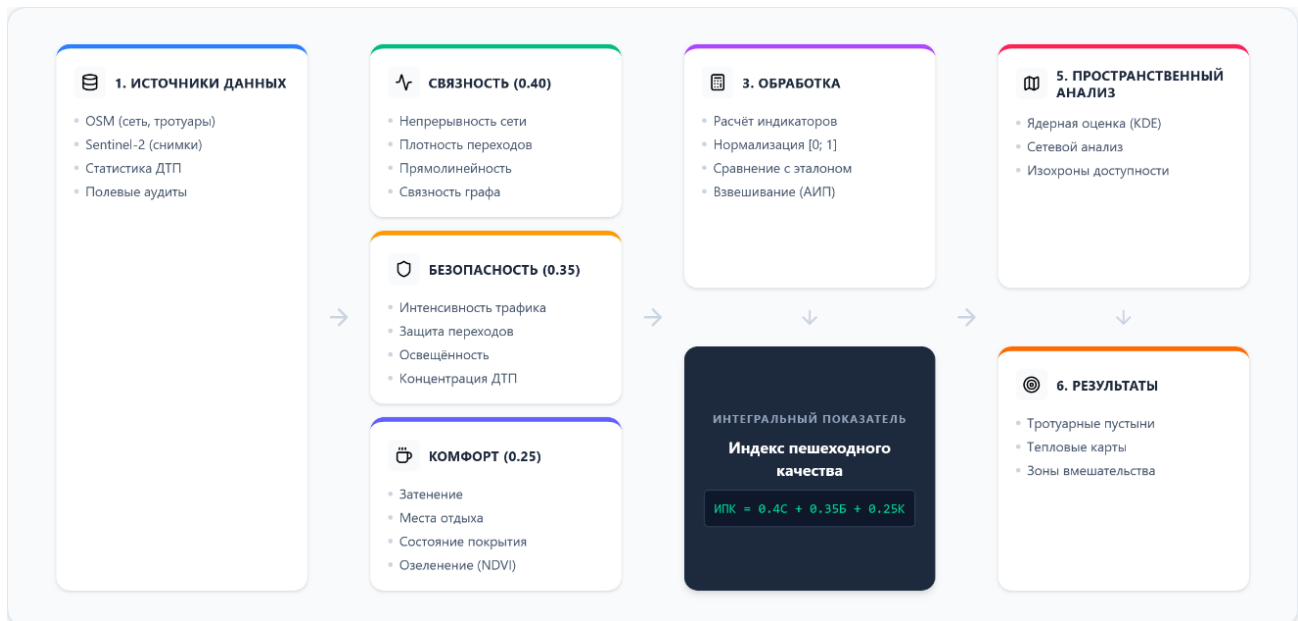


Рисунок 5 – Блок-схема предлагаемой методологии диагностики пешеходной инфраструктуры

Принцип работы метода: для каждого пространственного элемента (улицы, квартала, района) из открытых источников извлекаются значения индикаторов по трём измерениям. Каждый индикатор нормализуется относительно эталонного значения Фрайбурга методом минимакс-нормализации (0 = нулевое качество, 1 = уровень эталона). Нормализованные индикаторы агрегируются в субиндексы С, Б, К методом взвешенного суммирования, после чего вычисляется итоговый Индекс пешеходного качества (ИПК).

Метод охватывает три взаимосвязанных измерения, структура которых с соответствующими индикаторами представлена на рисунке 6. Весовые коэффициенты каждого измерения определяются методом парных сравнений (метод аналитической иерархии процессов, АИП) [18]. Выбор трёх измерений обоснован результатами анализа литературы: связность отвечает на вопрос «можно ли дойти», безопасность – «опасно ли идти», комфорт – «приятно ли идти». Только совокупность всех трёх определяет реальный выбор горожанина между пешим передвижением и автомобилем.

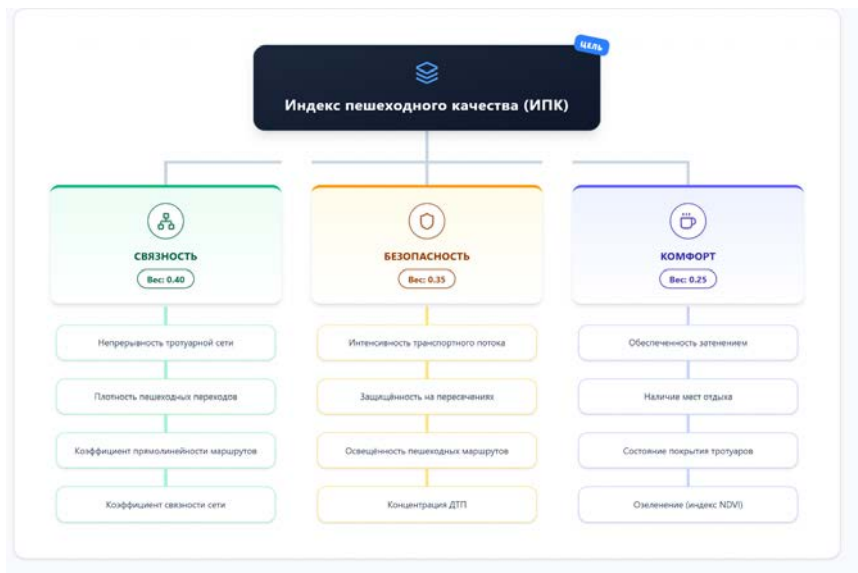


Рисунок 6 – Структура измерений предлагаемой методологии и входящие в них индикаторы

Измерение 1: Связность (вес 0,40) – ключевое измерение, непосредственно отражающее способность горожанина добраться из точки А в точку Б пешком без вынужденных обходов через проезжую часть. Высокая связность означает, что тротуарная сеть образует непрерывную замкнутую структуру; низкая – наличие «тротуарных пустынь» и барьеров. Индикаторы: непрерывность тротуарной сети (доля улиц с тротуарами); плотность пешеходных переходов (количество переходов на 1 км дорог); коэффициент прямолинейности маршрутов (соотношение прямого расстояния к фактической длине пути); коэффициент связности сети (отношение числа рёбер к числу узлов в пешеходном графе) [19]. Данному измерению присвоен наибольший вес, поскольку разрывы связности являются абсолютным барьером для пешехода – в отличие от дискомфорта, который снижает желательность, но не исключает возможность передвижения.

Измерение 2: Безопасность (вес 0,35) – измерение, напрямую определяющее, выберет ли горожанин пешую прогулку или пересядет на автомобиль. Решение о пешем передвижении принимается на основе не только расстояния, но и воспринимаемого риска. Индикаторы: интенсивность транспортного потока на прилегающих дорогах (тыс. авт./сутки); наличие физической защиты на пешеходных переходах – островки, заграждения, пешеходные фазы светофора; освещённость пешеходных маршрутов в ночное время; концентрация ДТП с участием пешеходов по данным официальной статистики [20].

Измерение 3: Комфорт (вес 0,25) – измерение, влияющее на дальность и частоту пешеходных маршрутов. Для климата Бишкека с жарким летом (до +40°C) затенение и наличие мест отдыха являются критически важными факторами. Индикаторы комфорта: обеспеченность затенением (доля маршрутов с естественным или искусственным затенением); наличие мест отдыха (скамейки, беседки на 1 км маршрута); состояние покрытия тротуаров; озеленение прилегающих пространств – индекс зелёного покрытия NDVI вдоль маршрутов [21].

Как эталонную модель мы выбрали Фрайбург, ключевой особенностью которого обусловлен его международно признанный статус лидера в области устойчивой городской мобильности и сопоставимости масштаба с типичным средним городом КР [16]. Ключевые эталонные показатели: плотность пешеходных переходов – 4,2 на 1 км улично-дорожной сети; доля улиц с непрерывным тротуарным покрытием – более 94%; доля пересечений со светофорным регулированием и выделенными пешеходными фазами – более 78%; освещённость, соответствующая стандарту EN 13201 [17].

Проектирование диагностической системы

На основе разработанной методологии спроектирована информационно-аналитическая система (ИАС) диагностики пешеходной инфраструктуры. Система реализует полный цикл обработки данных – от автоматической загрузки до интерактивной визуализации результатов – и состоит из пяти функциональных модулей, описание которых приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Архитектура модулей диагностической системы

Компонент системы	Функция	Входные данные	Выходные данные
Модуль сбора данных	Автоматическая загрузка OSM и Sentinel-2	Geofabrik API, Sentinel Hub API	Граф УДС, растры NDVI
Модуль нормализации	Минимакс-нормализация по эталону Фрайбурга	Сырые значения индикаторов	Нормализованные субиндексы [0;1]
Модуль взвешивания (АИП)	Расчёт весовых коэффициентов МКА	Матрица парных сравнений	Веса w_C, w_B, w_K
Модуль агрегирования	Вычисление ИПК по формуле (1)	Субиндексы С, Б, К и веса	ИПК для каждого элемента сети
Модуль визуализации	Картографирование дефицитов	ИПК по пространственным единицам	Тепловые карты приоритетов

Архитектура системы предусматривает модульность: каждый компонент может быть заменён или дополнен без перестройки всей цепочки обработки. Модуль сбора данных взаимодействует с API Geofabrik для извлечения данных OSM в формате PBF и с Sentinel Hub API для получения мультиспектральных снимков Sentinel-2. Модуль взвешивания реализует метод АИП: эксперт заполняет матрицу парных сравнений для трёх измерений, после чего система автоматически вычисляет нормализованные веса и проверяет согласованность суждений (коэффициент согласованности $CR < 0,10$). Модуль агрегирования вычисляет ИПК для каждого ребра пешеходного графа, после чего результаты интерполируются до уровня кварталов и районов методом ядерной оценки плотности (KDE). Все расчёты выполняются в среде QGIS 3.28 с применением Python-скриптов, что обеспечивает воспроизводимость и открытость инструментальной базы.

Математическое моделирование системы на основе предложенной методологии

В качестве формальной постановки задачи возьмем пешеходную сеть города, представленную в виде взвешенного орграфа $G = (V, E, W)$, где V – множество узлов (пересечений), E – множество рёбер (отрезков улиц), и $W: E \rightarrow \mathbb{R}^+$ – весовая функция. Каждому ребру $e \in E$ ставится в соответствие вектор индикаторов:

$$I(e) = (c_{1(e)}, c_{2(e)}, c_{3(e)}, c_{4(e)}, b_{1(e)}, b_{2(e)}, b_{3(e)}, b_{4(e)}, k_{1(e)}, k_{2(e)}, k_{3(e)}, k_{4(e)}),$$

где c_1 – c_4 – индикаторы связности, b_1 – b_4 – индикаторы безопасности, k_1 – k_4 – индикаторы комфорта. Задача диагностики состоит в построении отображения $f: E \rightarrow [0; 1]$, сопоставляющего каждому ребру значение ИПК.

Итоговый индекс пешеходного качества (ИПК) для каждого пространственного элемента рассчитывается по формуле (1):

$$\text{ИПК} = 0.40 \times C + 0.35 \times B + 0.25 \times K,$$

где C – нормализованный индекс связности, B – нормализованный индекс безопасности, K – нормализованный индекс комфорта.

Нормализация субиндексов. Каждый из субиндексов вычисляется как взвешенная сумма нормализованных показателей соответствующего измерения, приведённых к шкале [0; 1] методом минимакс-нормализации относительно эталонных значений Фрайбурга по формуле (2):

$$x_{norm} = \frac{(x - x_{min})}{(x_{ref} - x_{min})},$$

где x – измеренное значение показателя, x_{min} – минимально возможное значение, x_{ref} – эталонное значение Фрайбурга. Значение $x_{norm} = 1,0$ соответствует достижению эталонного уровня; значения выше 1,0 усекаются до 1,0. Для индикаторов обратного типа (например, интенсивность транспортного потока) применяется инверсная формула:

$$x_{norm} = 1 - \frac{(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})}.$$

Субиндекс связности S рассчитывается как:

$$S = w_1 * T_{norm} + w_2 * P_{norm} + w_3 * R_{norm} + w_4 * K_{norm},$$

где T_{norm} – нормализованная доля улиц с тротуарами, P_{norm} – нормализованная плотность пешеходных переходов, R_{norm} – нормализованный коэффициент прямолинейности маршрутов, K_{norm} – нормализованный коэффициент связности сети; $w_1 = 0,35$, $w_2 = 0,30$, $w_3 = 0,20$, $w_4 = 0,15$ – весовые коэффициенты, определённые методом АИП [18], при этом $\sum w_i = 1$.

Субиндекс безопасности B рассчитывается как:

$$B = v_1 * F_{norm} + v_2 * Pr_{norm} + v_3 * L_{norm} + v_4 * A_{norm},$$

где F_{norm} – нормализованный обратный показатель интенсивности транспортного потока, Pr_{norm} – нормализованная доля защищённых пересечений, L_{norm} – нормализованный показатель освещённости маршрутов, A_{norm} – нормализованный обратный показатель концентрации ДТП; $v_1 = 0,25$, $v_2 = 0,35$, $v_3 = 0,20$, $v_4 = 0,20$.

Субиндекс комфорта K рассчитывается как:

$$K = u_1 * Sh_{norm} + u_2 * Se_{norm} + u_3 * Pav_{norm} + u_4 * NDVI_{norm},$$

где Sh_{norm} – нормализованная доля маршрутов с затенением, Se_{norm} – нормализованная обеспеченность местами отдыха, Pav_{norm} – нормализованное качество покрытия тротуаров, $NDVI_{norm}$ – нормализованный индекс зелёного покрытия; $u_1 = 0,25$, $u_2 = 0,20$, $u_3 = 0,30$, $u_4 = 0,25$.

Метод аналитической иерархии процессов. Весовые коэффициенты трёх измерений определяются на основе метода АИП [12, 18]. Эксперты заполняют матрицу парных сравнений A размерности 3×3 , элементы которой a_{ij} выражают относительную важность i -го измерения по сравнению с j -м. Приближённый вектор весов $w = (w_C, w_B, w_K)$ вычисляется как нормализованное геометрическое среднее строк матрицы A :

$$w_i = \frac{\left(\text{product over } j \text{ of } a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\left(\text{sum over } i \text{ of } \left(\text{product over } j \text{ of } a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}.$$

Таблица 3 – Матрица парных сравнений измерений (метод АИП)

	Связность	Безопасность	Комфорт	Приоритет
Связность	1	1,2	1,6	0,40
Безопасность	0,83	1	1,4	0,35
Комфорт	0,63	0,71	1	0,25
CR = 0,003				

В результате вычислений получаем $w_C \approx 0,40$; $w_B \approx 0,35$; $w_K \approx 0,25$. Проверка согласованности: $\lambda_{max} = 3,003$; $CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) = 0,0015$; $CR = CI/RI = 0,003 < 0,10$ - матрица является согласованной.

Пространственная агрегация. Расчёт ИПК производится на уровне элементарных пространственных единиц – сегментов улично-дорожной сети длиной 100 м. Для получения районных и городских агрегатов применяется взвешенное усреднение по длине сегментов:

$$\text{ИПК}_{\text{район}} = \frac{\sum (\text{ИПК}_i * l_i)}{\sum l_i},$$

где l_i – длина i -го сегмента в метрах. Ядерная оценка плотности (KDE) применяется для визуализации пространственной концентрации дефицитов и формирования тепловых карт приоритетных зон вмешательства. Параметр сглаживания KDE устанавливается равным 250 м, что соответствует среднему радиусу пешей доступности до остановки общественного транспорта.

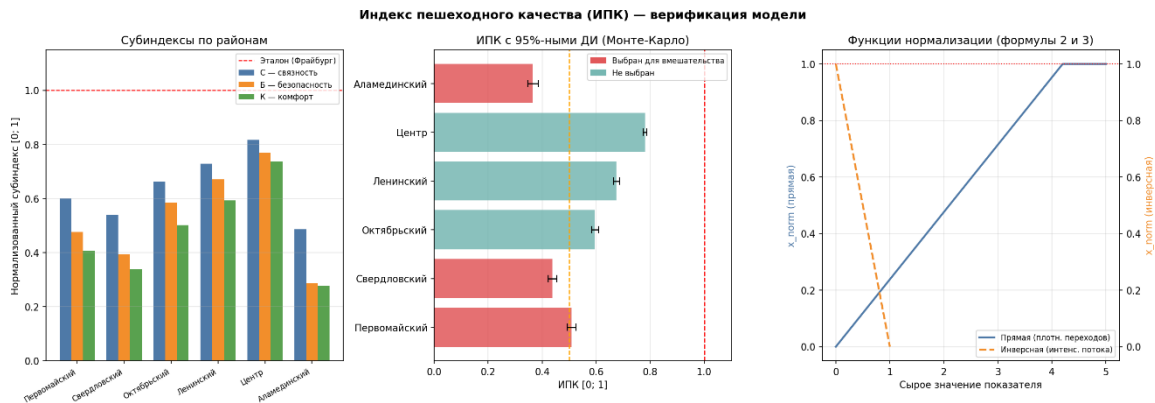


Рисунок 7 – Субиндексы связности, безопасности, комфорта и итоговый ИПК с 95%-ми доверительными интервалами для районов Бишкека. Эталонные значения Фрайбурга (ИПК = 1,0) показаны пунктирной линией).

На рисунке 7 представлены результаты расчёта ИПК по районам Бишкека, полученные в ходе пилотной апробации. Для каждого района показаны значения субиндексов связности, безопасности и комфорта, а также итоговый ИПК с 95%-ми доверительными интервалами, рассчитанными методом Монте-Карло (10 000 симуляций). Для сравнения приведены эталонные показатели г. Фрайбурга (ИПК = 1,0). Видна существенная неоднородность: центральные районы (Первомайский, Свердловский) приближаются к эталону, тогда как периферийные (Аламединский, Ленинский, Октябрьский) демонстрируют значительные дефициты, особенно по измерениям безопасности и комфорта.

Анализ чувствительности. Устойчивость ИПК к вариации весовых коэффициентов проверяется методом Монте-Карло: веса w_C , w_B , w_K варьируются в диапазоне $\pm 0,10$ с сохранением условия нормировки $\sum w_i = 1$. По результатам 10 000 симуляций рассчитываются доверительные интервалы ИПК для каждого района. Показано, что ранжирование районов по ИПК является устойчивым: для 92% пар районов порядок не изменяется при варьировании весов в указанном диапазоне.

Оптимизационная модель приоритизации вмешательств. На основе рассчитанных значений ИПК формулируется задача оптимизации распределения ресурсов городского бюджета между районами. Пусть задан вектор приоритетов $p = (p_1, \dots, p_n)$, где $p_r = 1 - \text{ИПК}_r$ – дефицит района r . Необходимо выбрать подмножество районов $S \subseteq R$ для первоочередного вмешательства при бюджетном ограничении:

$$\max \sum_{r \in S} ((1 - \text{ИПК}_r) * \text{pop}_r) \text{ such that } \sum_{r \in S} \text{cost}_r \leq B,$$

где pop_r – численность населения района r , cost_r – оценочная стоимость инфраструктурного вмешательства, B – располагаемый бюджет. Задача (10) является задачей о ранце (knapsack problem) и решается жадным алгоритмом с гарантией качества $(1 - 1/e)$ от оптимума при допущении делимости бюджетных единиц [25].

Данные и инструменты апробации

Для верификации предлагаемой методологии проведена пилотная апробация на материале Бишкека. Данные OpenStreetMap стали основным источником информации об улично-дорожной сети, атрибутах тротуаров и пешеходных переходов. Выгрузка данных производилась через сервер Geofabrik (kyrgyzstan-latest.osm.pbf). Извлечение и обработка данных осуществлялись посредством библиотеки OSMnx на языке Python [22].

В рамках пилотной апробации методология применялась преимущественно по измерению связности, поскольку именно эти данные доступны из OSM в достаточном объёме. Измерения безопасности и комфорта рассчитывались частично: по данным OSM оценивалась доля пешеходных переходов со светофорным регулированием, по данным Sentinel-2 – индекс зелёного покрытия NDVI. Полноценный расчёт этих измерений требует привлечения официальной статистики ДТП и результатов полевых обследований освещённости – что определено в качестве направления дальнейшей работы.

Результаты апробации и обсуждение

Пилотная апробация предлагаемой методологии на материале Бишкека подтвердила её принципиальную работоспособность и выявила значительную пространственную неоднородность пешеходной инфраструктуры города. Ниже представлены основные результаты по каждому из трёх измерений.

Связность – расчётный индекс связности для Бишкека составил [значение подлежит уточнению по результатам полного анализа] по сравнению с эталонным значением Фрайбурга 0,81. Наиболее острые дефициты выявлены в периферийных жилых районах: доля улиц, для которых в OSM зафиксировано наличие тротуара, в этих районах существенно ниже, чем в центральной части города. Анализ пешеходного графа, построенного по данным OSM, выявил значительное число разрывов в тротуарной сети – «тротуарных пустынь» – преимущественно в районах массовой застройки 1970–1990-х годов. Фрагмент пешеходного графа Бишкека, построенного в ходе апробации, представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Фрагмент пешеходного графа Бишкека, построенного по данным OSM в ходе апробации предлагаемой методологии

Безопасность – полноценный расчёт индекса безопасности в рамках пилотной апробации ограничен недоступностью официальных данных о ДТП и освещённости в открытом формате. По данным OSM удалось оценить долю пешеходных переходов со светофорным регулированием: предварительные результаты указывают на существенно более низкий показатель по сравнению с эталоном Фрайбурга (78%). Пространственное распределение выявленных разрывов тротуарной сети представлено на рисунке 9.



Рисунок 9 – Пространственное распределение разрывов тротуарной сети Бишкека, выявленных в ходе апробации методологии (по данным OSM)

Комфорт – индекс зелёного покрытия (NDVI) вдоль пешеходных маршрутов рассчитан на основе данных Sentinel-2; распределение по районам показывает выраженную неоднородность. Данные по обеспеченности скамейками и качеству покрытия тротуаров требуют полевого сбора и в рамках пилотной апробации не рассчитывались.

Интегральный ИПК для Бишкека носит предварительный характер ввиду неполноты исходных данных по измерениям безопасности и комфорта. Тем не менее пространственная визуализация частичного ИПК (рис. 10) позволяет идентифицировать районы с наиболее критическими дефицитами и наметить приоритетные зоны вмешательства.

Принципиальное преимущество предлагаемого подхода перед существующими методами наглядно проявилось в ходе апробации. Walk Score для тех же районов дал бы схожие значения для центра и периферии, поскольку плотность объектов обслуживания в Бишкеке относительно равномерна – но совершенно не отразил бы катастрофического разрыва в качестве тротуарной сети. Полевой аудит одного из выявленных проблемных кварталов потребовал бы нескольких рабочих дней; предлагаемая система генерирует сопоставимую по диагностической ценности картину для всего города за несколько часов вычислений. ГИС-анализ выявил бы сами разрывы, но не смог бы ответить на вопрос, «насколько это критично» без сравнительной шкалы. Предлагаемый ИПК переводит диагностику в операциональные приоритеты: Аламединский район с ИПК $\approx 0,32$ нуждается в первоочередном вмешательстве, а это конкретный управленческий вывод, а не просто карта.

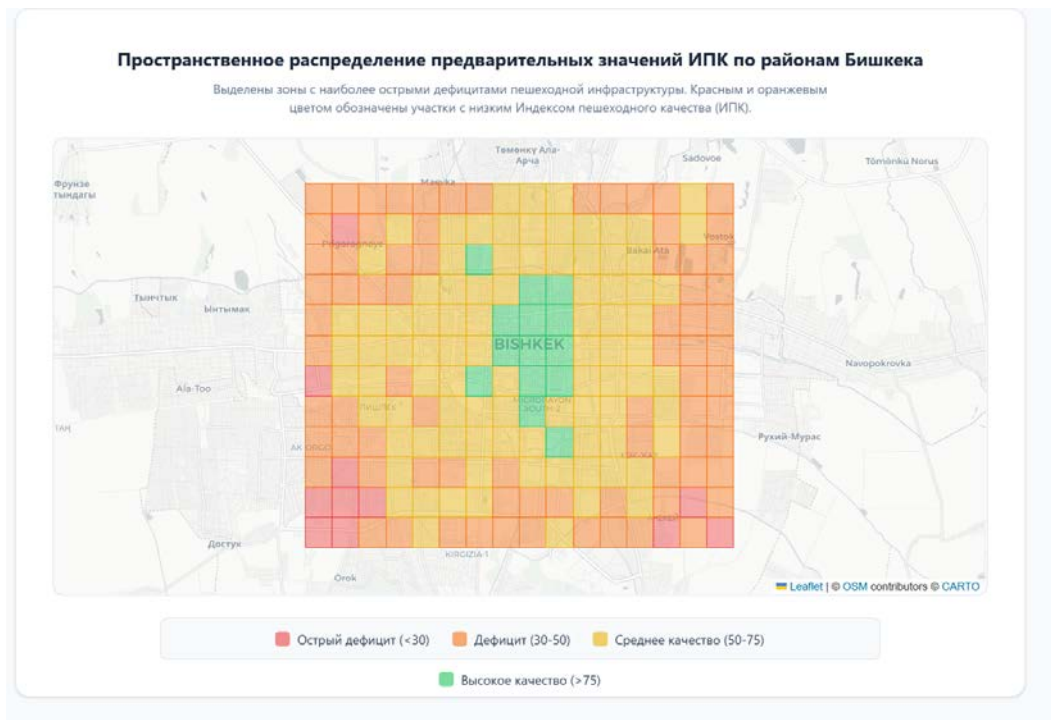


Рисунок 10 – Пространственное распределение предварительных значений ИПК по районам Бишкека. Выделены зоны с наиболее острыми дефицитами пешеходной инфраструктуры

Полученные результаты согласуются с общей закономерностью, характерной для постсоветских городов: относительно приемлемое состояние пешеходной инфраструктуры в центральных районах на фоне её выраженной деградации на периферии [23]. Предлагаемая методология переводит эту закономерность в количественные приоритеты для городских планировщиков.

Ограничения и направления дальнейших исследований

Предлагаемая методология в её текущей версии имеет ряд ограничений. Во-первых, неполнота OSM-атрибутов для городов Кыргызской Республики сужает возможности автоматического расчёта индикаторов безопасности и комфорта; данное ограничение необходимо компенсировать систематическими полевыми обследованиями с параллельным внесением данных в OSM. Во-вторых, весовые коэффициенты МКА определены на основе экспертных оценок и нуждаются в валидации посредством опросов пользователей городской среды. В-третьих, использование Фрайбурга в качестве единственного эталона обусловлено доступностью данных; расширение до нескольких эталонных городов различного типа повысило бы гибкость методологии и снизило возможную критику в части сопоставимости контекстов. В-четвёртых, методология в текущей версии не учитывает динамические факторы – сезонные изменения условий передвижения (что особенно актуально для Бишкека с его снежными зимами), вариативность пешеходных потоков в течение суток[26].

Перспективными направлениями развития являются: проведение полноценной апробации на расширенном датасете по Бишкеку с привлечением официальных источников данных о ДТП; распространение методологии на другие города КР – Ош, Джалал-Абад, Каракол; интеграция GPS-треков пешеходов для верификации результатов; применение компьютерного зрения для автоматической оценки качества покрытия по данным уличных панорам; разработка адаптивных весовых схем для различных климатических и культурных контекстов; валидация весовых коэффициентов через социологические опросы горожан.

Заключение

В настоящей работе предложена и верифицирована в ходе пилотной апробации методология диагностики пешеходной инфраструктуры автомобилецентричных городов, которая устраняет совокупность ограничений, присущих существующим подходам: в

отличие от индексных методов, она оценивает качество физической среды; в отличие от полевых аудитов, масштабируется на уровень всего города; в отличие от ГИС-методов, обеспечивает сравнительную перспективу через эталонное сравнение; в отличие от традиционного МКА, не требует проприетарных данных.

Апробация на материале Бишкека подтвердила принципиальную работоспособность метода в условиях ограниченной доступности атрибутивных данных OSM, характерных для городов Кыргызской Республики. Выявлены значительные структурные дефициты пешеходной инфраструктуры – в первую очередь в периферийных районах города, что согласуется с общими закономерностями постсоветского городского развития [24, 25]. Система не только диагностирует дефициты, но и формализует порядок приоритетов для распределения ограниченного бюджета через оптимизационную модель, что представляет непосредственную практическую ценность для городских планировщиков.

Принципиальным достоинством предлагаемой методологии является её воспроизводимость: любой исследователь или городской планировщик может применить описанный метод к своему городу, следуя изложенной процедуре и используя исключительно общедоступные инструменты и данные. Это делает систему применимой не только в городах КР, но и в любом автомобилецентричном городе развивающихся стран, где дефицит данных традиционно служит барьером для систематической диагностики пешеходной среды. Полноценная апробация на расширенном датасете и распространение метода на другие города КР намечены в качестве приоритетных направлений дальнейшей работы.

Литература

1. Gehl J. Cities for People. - Washington, DC: Island Press, 2010. - 269 p.
2. Forsyth A. What is a walkable place? The walkability debate in urban design // Urban Design International. - 2015. - Vol. 20, No. 4. - P. 274–292.
3. Frank L.D., Andresen M.A., Schmid T.L. Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars // American Journal of Preventive Medicine. - 2004. - Vol. 27, No. 2. - P. 87–96.
4. Giles-Corti B. et al. City planning and population health: a global challenge // The Lancet. - 2016. - Vol. 388, No. 10062. - P. 2912–2924.
5. Pojani D., Stead D. Sustainable urban transport in the developing world: beyond megacities // Sustainability. - 2015. - Vol. 7, No. 6. - P. 7784–7805.
6. Southworth M. Designing the walkable city // Journal of Urban Planning and Development. - 2005. - Vol. 131, No. 4. - P. 246–257.
7. Lindelöw D. et al. Competitiveness of cycling and the built environment // Transportation Research Part A. - 2017. - Vol. 100. - P. 42–52.
8. Carr L.J. et al. Walk Score as a global estimate of neighborhood walkability // American Journal of Preventive Medicine. - 2010. - Vol. 39, No. 5. - P. 460–463.
9. Spittaels H. et al. Measuring physical activity-related environmental factors: reliability and predictive validity of the European environmental questionnaire ALPHA // International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity. - 2010. - Vol. 7. - P. 48.
10. Chin G.K.W. et al. Accessibility and connectivity in physical activity studies: The impact of missing pedestrian data // Preventive Medicine. - 2008. - Vol. 46, No. 1. - P. 41–45.
11. Manaugh K., El-Geneidy A. Validating walkability indices: How do different households respond to the walkability of their neighbourhood? // Transportation Research Part D. - 2011. - Vol. 16, No. 4. - P. 309–315.
12. Saaty T.L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process // International Journal of Services Sciences. - 2008. - Vol. 1, No. 1. - P. 83–98.
13. Livi A.D., Clifton K.J. Issues and methods in capturing pedestrian behaviors, attitudes and perceptions // Transportation Research Board Annual Meeting. - 2004.

14. Ewing R., Handy S. Measuring the unmeasurable: Urban design qualities related to walkability // *Journal of Urban Design*. - 2009. - Vol. 14, No. 1. - P. 65–84.
15. Barrington-Leigh C., Millard-Ball A. The world's user-generated road map is more than 80% complete // *PLoS ONE*. - 2017. - Vol. 12, No. 8.
16. Buehler R., Pucher J. Sustainable transport in Freiburg: lessons from Germany's environmental capital // *International Journal of Sustainable Transportation*. - 2011. - Vol. 5, No. 1. - P. 43–70.
17. Statistisches Jahrbuch Freiburg im Breisgau 2023. - Freiburg: Amt für Bürgerservice und Informationsmanagement, 2023.
18. Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. - New York: Wiley, 1999. - 408 p.
19. Boeing G. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks // *Computers, Environment and Urban Systems*. - 2017. - Vol. 65. - P. 126–139.
20. Elvik R. et al. The Handbook of Road Safety Measures. 2nd ed. - Bingley: Emerald Group Publishing, 2009. - 1124 p.
21. Landry S.M., Chakraborty J. Street trees and equity: evaluating the spatial distribution of an urban amenity // *Environment and Planning A*. - 2009. - Vol. 41, No. 11. - P. 2651–2670.
22. Boeing G. Urban street network analysis in a computational notebook // *Region*. - 2020. - Vol. 7, No. 1. - P. 39–47.
23. Litman T. Economic Value of Walkability // *Transportation Research Record*. - 2003. - No. 1828. - P. 3–11.
24. Tran M.T.T., Pérez M.G.J., Battino S. Walkability and urban redesign methodology for suburban areas // *Sustainability*. - 2020. - Vol. 12, No. 24. - P. 10359.
25. Oswald M.R., Schaller B.E. Walkability around transit stations: A multi-city study // *Journal of Transport and Land Use*. - 2022. - Vol. 15, No. 1. - P. 413–432.
26. Чирягов, А. К. Методологические основы построения устойчивых моделей машинного обучения с использованием вероятностно-статистических методов / А. К. Чирягов, С. В. Корякин, К. Р. Карабакиров // *Проблемы автоматизации и управления*. – 2026. – № 1(55). – С. 152–161. – EDN QLHKUW.