DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

ОЦЕНКА МАРШРУТНОЙ СЛОЖНОСТИ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА С УЧЁТОМ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Togaev Golibjon Sharifovich,
E-mail: golibjon.togaev@mail.ru
Ташкентский государственный транспортный университет

Аннотация. *В статье предложен подход к оценке маршрутной сложности городского общественного транспорта на основе фактических характеристик транспортного потока. Исследование выполнено на примере перекрёстка улиц Сайхун и Н. Зокирова города Гулистан. Исходные данные получены посредством натурного наблюдения и видеофиксации движения транспортных средств. Проведён анализ интенсивности, состава и распределения транспортных потоков по направлениям. Для количественной оценки предложено совместно использовать нормированную интенсивность движения и индекс неоднородности состава транспортного потока. Установлено, что высокая интенсивность движения не всегда соответствует высокой структурной сложности потока. Для совместного учёта двух факторов предложен показатель маршрутной сложности, основанный на среднем геометрическом нормированной интенсивности и неоднородности транспортного потока. Наиболее высокое значение получено для направления 4–2. Предложено дальнейшее развитие модели путём учёта структуры манёвров и взаимодействия транспортных траекторий. Результаты исследования могут использоваться для выявления сложных участков маршрутной сети и обоснования мероприятий по совершенствованию организации движения городского общественного транспорта.*

Annotatsiya. *Maqolada transport oqimining haqiqiy tavsiflari asosida shahar jamoat transporti marshrut murakkabligini baholash yondashuvi taklif etilgan. Tadqiqot Guliston shahridagi Sayxun va N. Zokirov ko‘chalari chorrahasi misolida bajarilgan. Dastlabki ma’lumotlar dala kuzatuvi va transport vositalari harakatini videoqayd etish orqali olingan. Transport oqimlarining intensivligi, tarkibi va yo‘nalishlar bo‘yicha taqsimlanishi tahlil qilingan. Miqdoriy baholash uchun normallashtirilgan harakat intensivligi va transport oqimi tarkibining bir jinsli emaslik indeksidan birgalikda foydalanish taklif etilgan. Yuqori harakat intensivligi har doim ham oqimning yuqori tarkibiy murakkabligiga mos kelmasligi aniqlangan. Ikki omilni birgalikda hisobga olish uchun normallashtirilgan intensivlik va oqimning bir jinsli emasligining o‘rtacha geometrigiga asoslangan marshrut murakkabligi ko‘rsatkichi taklif etilgan. Eng yuqori qiymat 4–2 yo‘nalishi uchun olingan. Modelni manyovrlar tuzilmasi va transport trayektoriyalarining o‘zaro ta’sirini hisobga olish orqali rivojlantirish taklif etilgan. Natijalardan marshrut tarmog‘ining murakkab uchastkalarini aniqlash va shahar jamoat transporti harakatini tashkil etishni takomillashtirish choralarini asoslashda foydalanish mumkin.*

Abstract. *This article proposes an approach to assessing the route complexity of urban public transport based on observed traffic flow characteristics. The study focuses on the intersection of Saykhun and N. Zokirov streets in Gulistan. Data were collected through field observations and video recordings of vehicle movements. Traffic volume, composition, and distribution by direction were analysed. For quantitative assessment, the combined use of normalised traffic volume and a traffic composition heterogeneity index is proposed. The findings indicate that high traffic volume does not necessarily correspond to high structural complexity. To account for both factors, a route complexity indicator is proposed, calculated as the geometric mean of normalised traffic volume and traffic flow heterogeneity. The highest value was obtained for direction 4–2. Further development of the model is proposed through the incorporation of manoeuvre patterns and interactions between vehicle trajectories. The findings can be used to*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

identify complex sections of the route network and support measures to improve traffic management for urban public transport.

Ключевые слова: *городской общественный транспорт, маршрутная сложность, транспортный поток, интенсивность движения, неоднородность потока, маршрут, перекрёсток, организация движения.*

Kalit so‘zlar: *shahar jamoat transporti, marshrut murakkabligi, transport oqimi, harakat intensivligi, oqimning bir jinsli emasligi, marshrut, chorraha, harakatni tashkil etish.*

Keywords: *urban public transport, route complexity, traffic flow, traffic volume, traffic flow heterogeneity, route, intersection, traffic management.*

Введение. Развитие городских транспортных систем сопровождается увеличением интенсивности движения и усложнением взаимодействия различных участников транспортного процесса. В этих условиях эффективность городского общественного транспорта определяется не только протяжённостью маршрута, количеством остановок и временем движения, но и фактическими условиями прохождения отдельных элементов улично-дорожной сети.

В исследованиях общественного транспорта значительное внимание уделяется выбору маршрута пассажирами, времени поездки, надёжности движения и конфигурации транспортной сети [1–5]. Развитие GPS, smart-card и других цифровых источников данных расширило возможности исследования транспортных процессов на уровне отдельных поездок, маршрутов и траекторий [6–8]. Современные исследования также показывают, что параметры транспортной сети и неоднородность условий движения оказывают существенное влияние на функционирование общественного транспорта [8, 9].

Вместе с тем большинство существующих подходов рассматривает сложность маршрута преимущественно с позиций пассажирского выбора, продолжительности поездки, надёжности или конфигурации маршрутной сети [10–12]. В меньшей степени исследована сложность прохождения конкретного элемента улично-дорожной сети как результат совместного воздействия интенсивности движения, состава транспортного потока и структуры транспортных манёвров.

В настоящей работе предлагается разграничить понятия транспортной загруженности и маршрутной сложности. Высокая интенсивность характеризует количественную нагрузку на участок, тогда как маршрутная сложность рассматривается как более широкая характеристика условий взаимодействия общественного транспорта с окружающим транспортным потоком.

В качестве объекта исследования выбран перекрёсток улиц Сайхун и Н. Зокирова города Гулистан Сырдарьинской области. На исследуемом участке фиксировались прямое движение, левые и правые повороты и развороты. При обследовании учитывались различные категории легковых автомобилей, микроавтобусов, автобусов и грузовых транспортных средств.

Цель исследования заключается в разработке подхода к оценке маршрутной сложности городского общественного транспорта на основе совместного анализа интенсивности и структуры транспортного потока.

Материалы и методы исследования. Исходные данные получены посредством натурного наблюдения и последующей обработки видеозаписей движения транспортных средств на исследуемом перекрёстке. Наблюдения проводились в период с 16 по 18 марта. Общая продолжительность видеофиксации составила более 48 часов и охватывала как пиковые, так и межпиковые периоды суток. Запись велась непрерывно, с последующей покадровой обработкой видеоматериала.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

Обработка видеозаписей выполнялась путём ручного подсчёта транспортных средств по направлениям движения и категориям. Классификация транспортных средств осуществлялась по следующим критериям: 1) легковые автомобили и малые грузовые (до 3,5 т); 2) двухосные грузовые автомобили и особо малые автобусы; 3) трёхосные грузовые автомобили и малые автобусы; 4) четырёхосные автопоезда и средние автобусы; 5) автобусы большого класса. Интервал агрегирования данных – 1 ч.

Интенсивность движения по *j*-му направлению определяется:

$$q_j = \frac{N_j}{T}, \quad (1)$$

где q_j – интенсивность движения по *j*-му направлению, авт./ч; N_j – количество транспортных средств по *j*-му направлению; T – продолжительность наблюдения, ч.

Для сопоставления направлений используется нормированная интенсивность:

$$I_j = \frac{q_j}{q_{max}}, \quad 0 \le I_j \le 1, \quad (2)$$

где q_{max} – максимальная интенсивность среди исследуемых направлений.

Для оценки состава потока определяется доля транспортных средств *i*-го типа:

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_j}, \quad (3)$$

где N_{ij} – количество транспортных средств *i*-го типа на *j*-м направлении; p_{ij} – доля *i*-го типа в потоке *j*-го направления.

Неоднородность состава транспортного потока определяется выражением:

$$H_j = 1 - \sum_i p_{ij}^2. \quad (4)$$

При преобладании одной категории транспортных средств значение H_j уменьшается. При более разнообразном составе потока показатель возрастает.

Результаты исследования. ***Анализ транспортных потоков.*** По шести исследуемым направлениям зарегистрировано 12 699 прохождений транспортных средств.

Таблица 1

Распределение транспортных потоков по направлениям

Направление	Количество, ед.	Доля, %
1–2	964	7,6
1–5	14	0,1
1–3	817	6,4
4–2	6 464	50,9
4–5	1 353	10,7
4–3	3 087	24,3
Всего	12 699	100,0

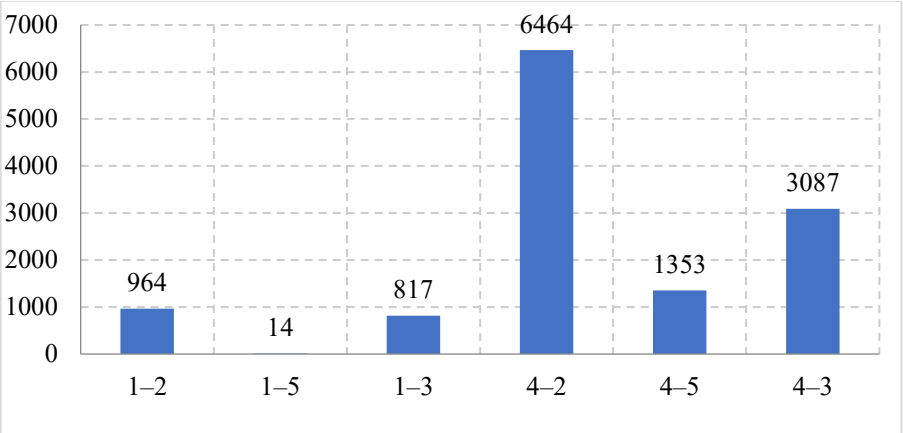

Рис. 1. Распределение транспортного потока по направлениям движения

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

Наибольшее количество транспортных средств зарегистрировано на направлении 4–2. На него приходится 6 464 транспортных средства, или 50,9 % исследуемого потока (табл. 1, рис. 1). На направлении 4–3 зарегистрировано 3 087 транспортных средств (24,3 %), на направлении 4–5-1353 транспортных средства (10,7%). Совокупная доля трёх направлений составляет 50,9 + 24,3 + 10,7 = 85,9 %. Полученные значения показывают выраженную неравномерность распределения движения.

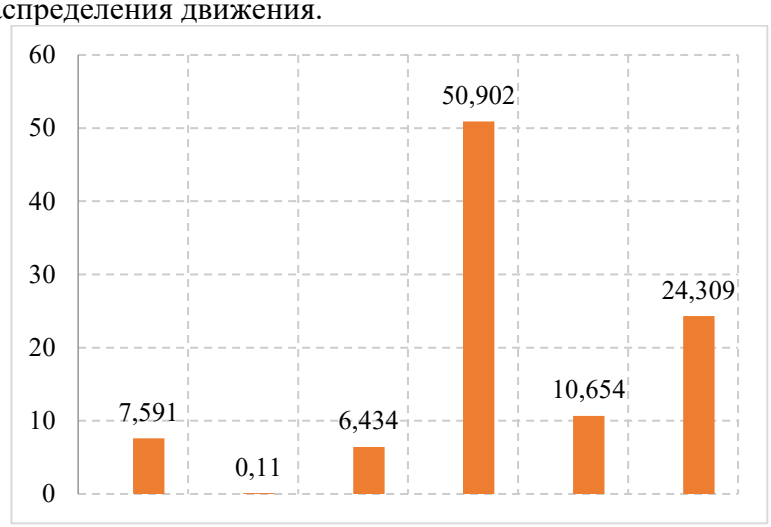

Рис. 2. Доля направлений в общем транспортном потоке

Более половины всего исследуемого потока приходится на одно направление 4–2. Вместе с направлением 4–3 два основных потока формируют 75,2 % общего движения. Следовательно, общая интенсивность перекрёстка не отражает фактическую нагрузку на отдельные направления.

Анализ состава транспортного потока. В составе исследуемого потока представлены различные категории транспортных средств. Их различия по габаритам и динамическим характеристикам влияют на условия движения автобусов. В транспортном потоке преобладают легковые автомобили и транспортные средства первой категории. При этом соотношение категорий по отдельным направлениям различается. Поэтому одинаковое количество транспортных средств не означает одинаковые условия движения.

Для отражения данного различия используется показатель H_j. Чем больше значение H_j, тем менее однороден состав транспортного потока.

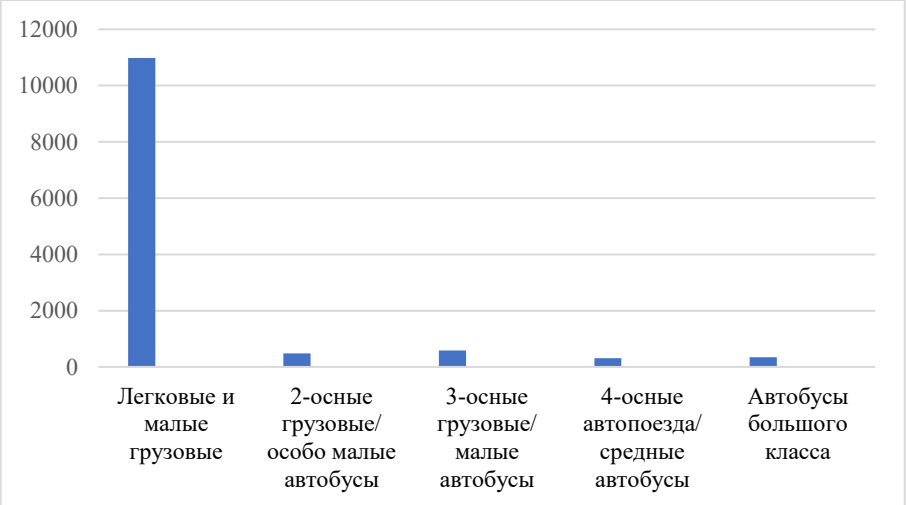

Рис. 3. Структура транспортного потока по категориям транспортных средств

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

Интенсивность движения изменяется в течение периода наблюдения. Поэтому маршрутная сложность зависит не только от места прохождения автобуса, но и от времени движения.

Анализ почасовой динамики (рис. 3) позволяет выделить следующие характерные периоды:

– пиковые интервалы: 17.03 с 06:36 (1 188 авт.), 13:36 (1 112 авт.), а также вечерние часы 21:36–23:36 (1 203–1 333 авт.);

– периоды минимальной нагрузки: ночные часы 17.03 01:36–05:36 и отдельные дневные интервалы с нулевыми значениями (отсутствие движения или паузы в записи);

– средний уровень интенсивности в межпиковые периоды составляет порядка 400–800 авт./ч.

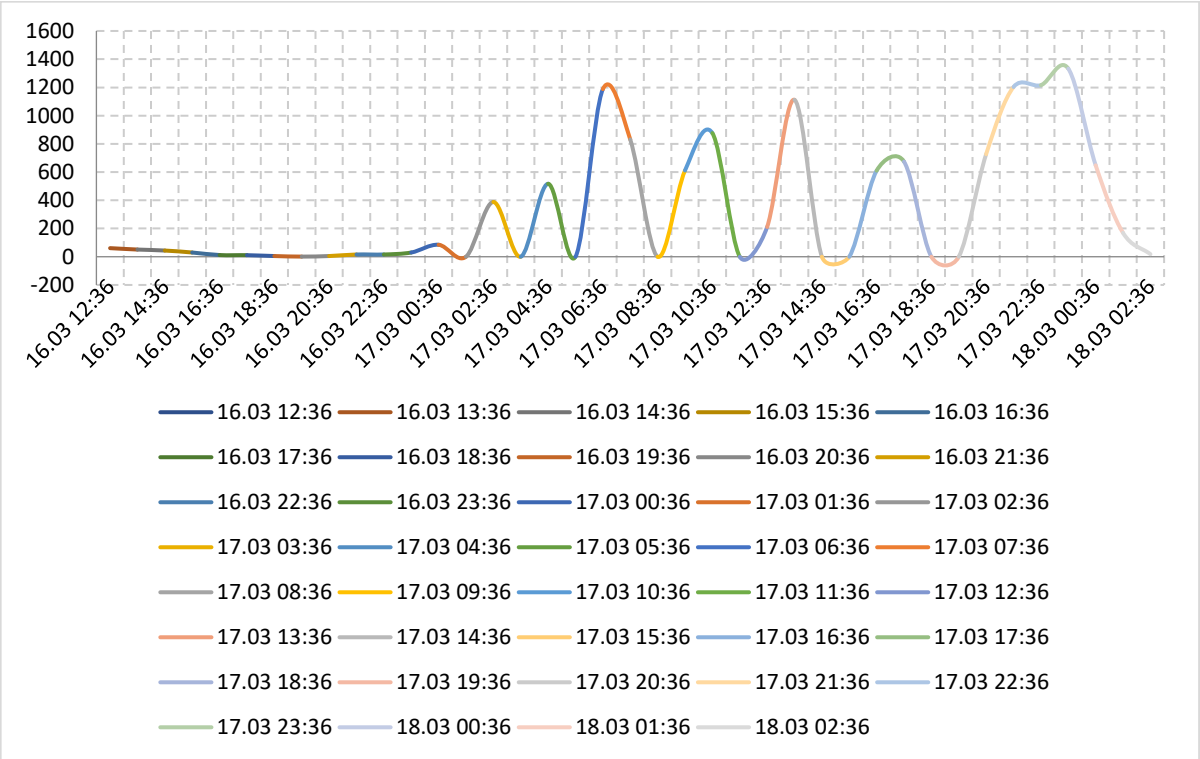

Рис. 4. Почасовая динамика транспортного потока

График показывает существенные колебания количества транспортных средств между отдельными временными интервалами. Один и тот же участок при неизменных геометрических параметрах может создавать различные условия движения в зависимости от текущей транспортной нагрузки. Следовательно, маршрутная сложность имеет пространственный и временной характер.

Расчёт нормированной интенсивности и неоднородности состава потока представлен в таблице 2.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

Таблица 2

Показатели транспортного потока по направлениям

Направление	**Нормированная интенсивность I_j**	**Неоднородность H_j**
1–2	0,149	0,253
1–5	0,002	0,000
1–3	0,126	0,255
4–2	1,000	0,307
4–5	0,209	0,278
4–3	0,478	0,090

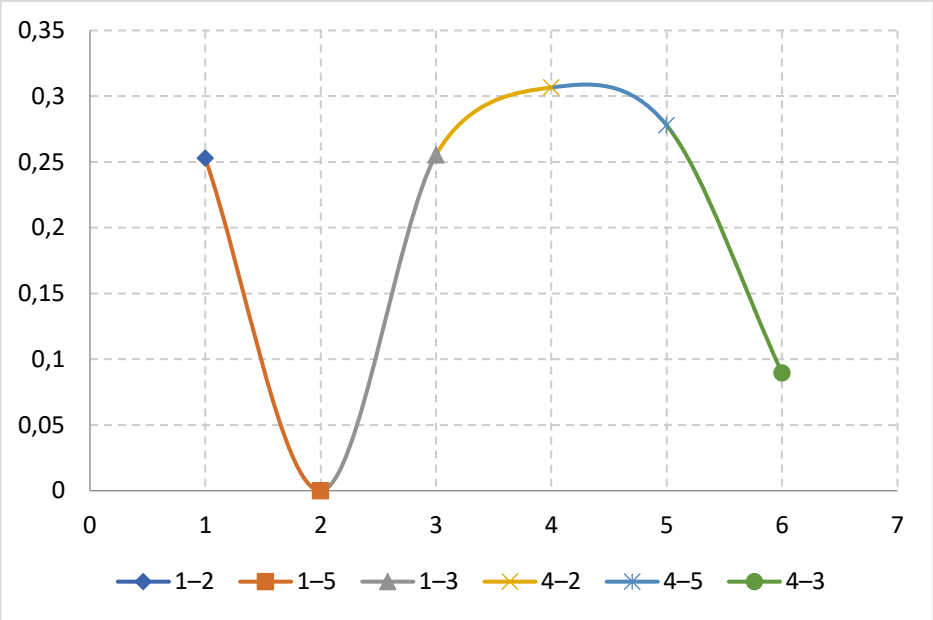

Рис. 5. Соотношение интенсивности и неоднородности транспортного потока

Направление 4–2 характеризуется одновременно максимальной интенсивностью $I_{4–2}$=1,000 и максимальным значением неоднородности $H_{4–2}$=0,307. На направлении 4–3 получено $I_{4–3}$=0,478 и $H_{4–3}$=0,090. Интенсивность направления 4–3 остаётся высокой, однако состав транспортного потока значительно более однороден. Для направления 4–5 получено $I_{4–5}$=0,209 и $H_{4–5}$=0,278. Направление 4–5 значительно уступает направлению 4–3 по интенсивности, но превосходит его по неоднородности состава потока. Полученный результат показывает необходимость совместного анализа двух характеристик.

Оценка маршрутной сложности. Для объединения нормированной интенсивности и неоднородности транспортного потока предлагается двухфакторный показатель:

$$C_{2j} = \sqrt{I_j \cdot H_j}, \quad (5)$$

где C_{2j} – двухфакторный показатель маршрутной сложности; I_j – нормированная интенсивность; H_j – неоднородность транспортного потока.

Среднее геометрическое позволяет объединить два безразмерных показателя без назначения весовых коэффициентов.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

Таблица 3

Расчёт двухфакторного показателя маршрутной сложности

Направление	I_j	H_j	C_{2j}
1–2	0,149	0,253	0,194
1–5	0,002	0,000	0,000
1–3	0,126	0,255	0,179
4–2	1,000	0,307	0,554
4–5	0,209	0,278	0,241
4–3	0,478	0,090	0,207

Максимальное значение получено для направления 4–2: $C_{2,4–2}$=0,554. На втором месте находится направление 4–5: $C_{2,4–5}$=0,241. Для направления 4–3 получено $C_{2,4–3}$=0,207.

Сравнение направлений 4–3 и 4–5 имеет принципиальное значение. По интенсивности выполняется условие $I_{4–3}>I_{4–5}$. При совместном учёте интенсивности и состава потока получено обратное соотношение $C_{2,4–5}>C_{2,4–3}$. Направление 4–3 имеет более чем в два раза высокую нормированную интенсивность по сравнению с 4–5, однако после учёта неоднородности состава направление 4–5 получает более высокую оценку.

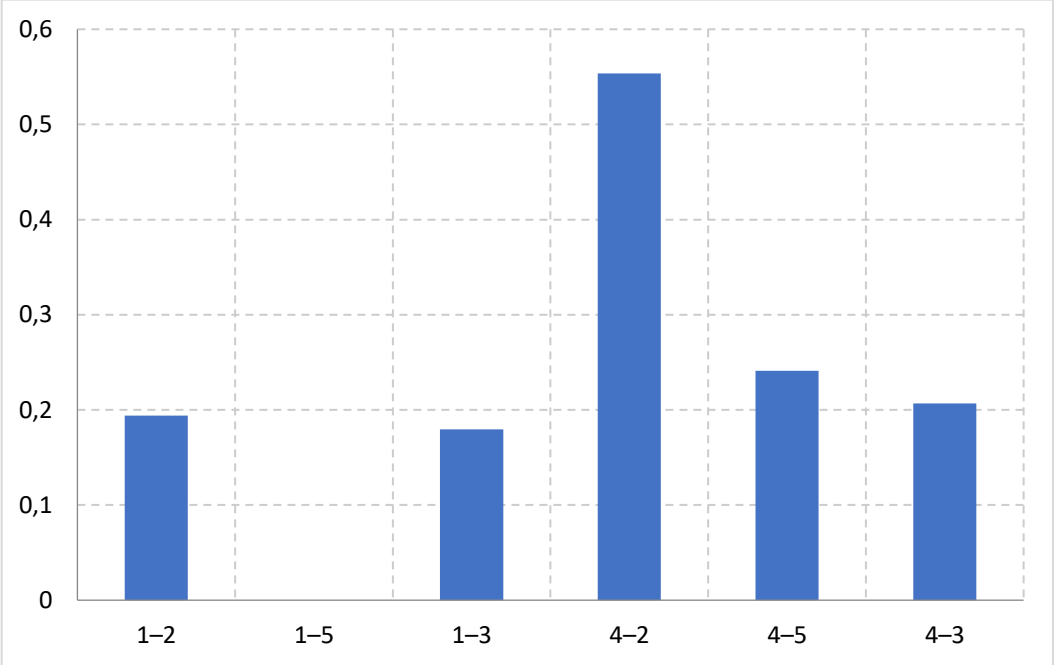

Рис. 6. Двухфакторная оценка маршрутной сложности по направлениям движения

Для проверки устойчивости полученного результата выполнен краткий анализ чувствительности. При увеличении неоднородности направления 4–3 на 20 % ($H_{4–3}$=0,108) значение $C_{2,4–3}$ возрастает до 0,227, что по-прежнему ниже показателя направления 4–5 (0,241). Даже при увеличении $H_{4–3}$ на 50 % (до 0,135) $C_{2,4–3}$ достигает 0,254, лишь незначительно превышая значение для 4–5. Это подтверждает, что вывод о более высокой маршрутной сложности направления 4–5 относительно устойчив к умеренным изменениям исходных данных: пороговое значение, при котором $C_{2,4–3}$ сравнивается с $C_{2,4–5}$, составляет $H_{4–3} \approx 0{,}122$, т. е. неоднородность направления 4–3 должна возрасти примерно на 35 %.

Следовательно, транспортная загруженность и маршрутная сложность характеризуют разные стороны транспортного процесса.

Развитие показателя маршрутной сложности. Двухфакторный показатель учитывает интенсивность и состав потока. Для более полной оценки необходимо

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

дополнительно учитывать выполняемые манёвры. В материалах обследования выделены прямое движение, левый поворот, правый поворот и разворот.

Доля отдельного манёвра определяется выражением:

$$r_{\text{kj}} = \frac{N_{\text{kj}}}{N_{\text{j}}}, \quad (6)$$

где N_{kj} – количество транспортных средств, выполняющих k-й манёвр на j-м направлении.

Для оценки разнообразия манёвров предлагается использовать:

$$M_{\text{j}} = 1 - \sum_k r_{\text{kj}}^2, \quad (7)$$

где M_{j} характеризует распределение транспортных средств между различными манёврами.

Наряду со структурой манёвров необходимо учитывать взаимодействие транспортных траекторий. Пересечение, слияние и разделение потоков создают различные условия прохождения автобуса через перекрёсток.

Полное представление маршрутной сложности принимает вид:

$$C_{\text{j}} = f(I_{\text{j}}, H_{\text{j}}, M_{\text{j}}, K_{\text{j}}), \quad (8)$$

где C_{j} – маршрутная сложность; I_{j} – интенсивность движения; H_{j} – неоднородность состава потока; M_{j} – структура манёвров; K_{j} – взаимодействие транспортных траекторий.

Последовательность формирования маршрутной сложности имеет следующий вид:

$$C_{\text{j}} \leftarrow I_{\text{j}} \rightarrow H_{\text{j}} \rightarrow M_{\text{j}} \rightarrow K_{\text{j}}. \quad (9)$$

Такое представление позволяет постепенно расширять оценку по мере появления дополнительных данных.

Обсуждение. Проведённый анализ показал значительные различия между исследуемыми направлениями. Направление 4–2 является наиболее нагруженным и одновременно характеризуется наиболее высокой неоднородностью состава транспортного потока. Значение двухфакторного показателя составляет 0,554.

Направления 4–3 и 4–5 показывают другой результат. Направление 4–3 имеет существенно большую интенсивность, однако более однородный состав потока. После совместного учёта двух факторов направление 4–5 получает более высокое значение маршрутной сложности.

Полученный результат подтверждает необходимость разделения понятий транспортной нагрузки и маршрутной сложности. Транспортная нагрузка отражает количество транспортных средств, проходящих по участку. Маршрутная сложность характеризует условия, в которых общественный транспорт взаимодействует с данным потоком. Поэтому высокая интенсивность является важным, но не единственным фактором сложности.

Следует отметить, что предложенный двухфакторный показатель $C_{2\text{j}}$ в настоящей работе носит индикативный характер. Для повышения научной обоснованности в дальнейших исследованиях целесообразно провести его валидацию путём сопоставления с фактическими показателями работы общественного транспорта – временем проезда перекрёстка автобусами, величиной задержек, средней скоростью движения на участке и отклонениями от расписания. Такая проверка позволит установить количественную связь между расчётной маршрутной сложностью и реальными условиями эксплуатации.

Практическое применение предложенного подхода связано с выявлением участков, где движение общественного транспорта осложняется сочетанием нескольких факторов. При высокой интенсивности могут применяться меры по регулированию пропускной способности. При высокой неоднородности потока необходимо учитывать взаимодействие автобусов с грузовыми и легковыми транспортными средствами. При сложной структуре манёвров основное внимание может уделяться организации поворотных потоков и светофорному регулированию.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

Заключение. Исследование транспортных потоков на перекрёстке улиц Сайхун и Н. Зокирова города Гулистан показало выраженную неравномерность движения. Из 12 699 зарегистрированных прохождений транспортных средств 50,9 % приходится на направление 4–2. Совокупная доля направлений 4–2, 4–3 и 4–5 составляет 85,9 %.

Для оценки условий движения использованы нормированная интенсивность I_j и индекс неоднородности транспортного потока H_j. Предложен двухфакторный показатель (5) – среднее геометрическое этих величин. Максимальное значение получено для направления 4–2 и составляет 0,554.

Сравнение направлений 4–3 и 4–5 показало изменение их положения после включения неоднородности состава потока. Несмотря на значительно большую интенсивность направления 4–3, значение двухфакторного показателя для направления 4–5 оказалось выше. Анализ чувствительности показал, что вывод сохраняется при увеличении неоднородности направления 4–3 до 35 %.

Полученный результат подтверждает необходимость оценки маршрутной сложности не только по интенсивности движения. Дальнейшее развитие подхода предусматривает включение структуры манёвров M_j и взаимодействия транспортных траекторий K_j. Полная модель представлена зависимостью $C_j=f(I_j, H_j, M_j, K_j)$.

Предложенный подход может применяться для сравнительной оценки участков автобусных маршрутов и выбора мероприятий по организации движения городского общественного транспорта.

Список использованной литературы

1. Jansson K., Ridderstolpe B. A Method for the Route-Choice Problem in Public Transport Systems // Transportation Science. 1992. Vol. 26. No. 3. P. 246–251. DOI: 10.1287/trsc.26.3.246.

2. Trozzi V., Kaparias I., Bell M.G.H., Gentile G. A dynamic route choice model for public transport networks with boarding queues // Transportation Planning and Technology. 2013. Vol. 36. No. 1. P. 44–61. DOI: 10.1080/03081060.2012.745720.

3. Schöbel A., Scholl S. Line planning with user-optimal route choice // European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 259. No. 2. P. 424–436. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.10.034.

4. Chepuri A., Ramakrishnan J., Arkatkar S., Joshi G., Pulugurtha S.S. Examining Travel Time Reliability-Based Performance Indicators for Bus Routes Using GPS-Based Bus Trajectory Data in India // Journal of Transportation Engineering, Part A. 2018. Vol. 144. No. 5. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000109.

5. Downward A., Chowdhury S., Jayalath C. An investigation of route-choice in integrated public transport networks by risk-averse users // Public Transport. 2019. Vol. 11. P. 89–110. DOI: 10.1007/s12469-019-00194-0.

6. Shelat S., Cats O., van Oort N., van Lint H. Calibrating Route Choice Sets for an Urban Public Transport Network using Smart Card Data // 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems. 2019. DOI: 10.1109/MTITS.2019.8883366.

7. Oyama Y., Hato E. A strategy-based recursive path choice model for public transit smart card data // Transportation Research Part B. 2019. Vol. 126. P. 528–548. DOI: 10.1016/j.trb.2018.01.002.

8. Arriagada J., Munizaga M.A., Guevara C.A., Prato C. Unveiling route choice strategy heterogeneity from smart card data in a large-scale public transport network // Transportation Research Part C. 2022. Vol. 134. 103467. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103467.

9. Koch T., Knapen L., Dugundji E. Path complexity and bicyclist route choice set quality assessment // Personal and Ubiquitous Computing. 2021. Vol. 25. No. 1. P. 63–75. DOI: 10.1007/s00779-019-01350-w.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.123

10. Kodirov T., Togaev G., Kenjaeva B. Evaluation of complexity of urban bus routes // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 365. 05005. DOI: 10.1051/e3sconf/202336505005.

11. Leich G., Nagel K. Improving speed and realism of an evolutionary minibus network design process // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 151. P. 834–839. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.114.

12. Jang J., Cho Y., Park J. Bus Route Sketching: A Multimetric Analysis from the User's and Operator's Perspectives // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 16. 7172. DOI: 10.3390/su16167172.