

УДК 656.11

© А. Ю. Михайлов, д-р техн. наук, профессор
(Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
Иркутск, Россия)

E-mail: 89148701840@mail.ru

© И. И. Тараховский, генеральный директор
(ООО «Квант Инжиниринг»,
Иркутск, Россия)

E-mail: ti777@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-5-98-110

© A. Yu. Mikhailov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Irkutsk National Research
Technical University,
Irkutsk, Russia)

E-mail: 89148701840@mail.ru

© I. I. Tarakhovskii, General Director
(JSC Quant Engineering,
Irkutsk, Russia)

E-mail: ti777@yandex.ru

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА В СВОБОДНЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПОСТУПАЮЩИХ ОТ СТАЦИОНАРНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

ESTIMATION OF TRAFFIC FLOW SPEED IN FREE CONDITIONS BASED ON THE DATA FROM A STATIONARY RADAR DETECTOR

В настоящее время методическими документами Министерства транспорта РФ предусматривается оценка уровня обслуживания дорожного движения, представляющего собой отношение средней скорости движения потока транспортных средств к его скорости в свободных условиях. В статье теоретически обосновывается и экспериментально подтверждается возможность оценки скорости в свободных условиях на основе данных радиолокационных детекторов. Значение скорости в свободных условиях оценивается как коэффициент линейной регрессионной модели «интенсивность–плотность», получаемой для низких значений интенсивности движения.

Ключевые слова: уровень обслуживания, скорость в условиях свободного движения, диаграмма транспортного потока, радиолокационный детектор.

Currently the Russian Ministry of Transport manuals require assessing the level of service of traffic flow, which is the ratio of the average traffic speed to its speed under free-flowing conditions. This article theoretically substantiates and experimentally validates the feasibility of estimating traffic free flow speed in free conditions using radar detector data. The free flow speed value is estimated as the coefficient of the intensity-density linear regression model obtained for low traffic intensities.

Keywords: level of service, free flow speed, traffic flow diagram, radar detector.

Введение

Министерством транспорта Российской Федерации утверждены «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения»¹, предлагающие оце-

нивать уровень обслуживания дорожного движения относительными характеристиками: коэффициентом загрузки, коэффициентом скорости и коэффициентом насыщения (табл. 1).

Цитируемый документ предусматривает мониторинг дорожного движения с использованием ГЛОНАСС- и GPS-треков, а также

¹ Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения, утвержденные распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-Р.

Таблица 1

Характеристика уровней обслуживания линейных объектов транспортной инфраструктуры

Уровень обслуживания	Коэффициент загрузки	Коэффициент скорости движения	Коэффициент насыщения движением
A	< 0,2	> 0,9	< 0,1
B	0,2–0,45	0,7–0,9	0,1–0,3
C	0,45–0,7	0,55–0,7	0,3–0,7
D	0,7–0,9	0,4–0,55	0,7–1
E	0,9–1,0	< 0,4	1
F	> 1,0	0,3	1

детекторов транспорта, позволяющих определять скорость транспортного потока в режиме реального времени, что предполагает использование коэффициента скорости. Коэффициент скорости рассматривается как отношение средней скорости транспортного потока к его средней скорости в свободных условиях, определяемой при низкой интенсивности движения, при которой отсутствует взаимное влияние транспортных средств. Вместе с тем в методических рекомендациях подробно изложена только методика определения пространственной скорости по данным, поступающим от контрольных транспортных средств (т. е. с применением треков).

Возможность получения массовых данных о скорости и интенсивности движения в режиме реального времени является преимуществом стационарных транспортных детекторов. Вместе с тем опыт применения детекторов для оценки характеристик макроскопической диаграммы транспортного потока, включая скорость движения в свободных условиях, не систематизирован и не представлен в отечественной научно-технической литературе. Исключением является диссертационная работа В. В. Морозова [1], в которой изучалась зависимость «интенсивность–занятость полосы», построенная на данных, получаемых с использованием видеодетекторов Traficam.

Для широко распространенных индукционных детекторов (Англия, Голландия,

США) решена задача оценки средней пространственной скорости [2–5], используемой в табл. 1. Петлевые детекторы позволяют непосредственно измерять интенсивность и относительную продолжительность регистрации транспортных средств детектором (relative occupancy), которая рассматривается как аналог плотности транспортного потока. На основе этих параметров оцениваются плотность транспортного потока и его средняя пространственная скорость [2–5].

Особенностью радиолокационных детекторов (радаров) является использование эффекта Доплера, позволяющего осуществлять фиксацию количества транспортных средств и их скорости. Зарубежные публикации о транспортных радаров встречаются редко, но в них отмечается низкая стоимость применения таких детекторов [6].

Для случая использования стационарных радиолокационных детекторов предлагается оценивать уровень обслуживания отношением значения средней временной скорости потока, измеренной за текущий период времени, к базовому значению средней временной скорости потока в свободных условиях, предварительно установленному для рассматриваемого участка дороги. В этой связи необходимо теоретически обосновать и экспериментально подтвердить возможность корректного применения значений средней временной скорости \bar{v}_t вместо средней пространственной скорости \bar{v}_s , используемой

как базовый параметр оценки уровня обслуживания (см. табл. 1). Цель данного исследования — разработка теоретически обоснованной методики определения значений скорости потока в свободных условиях на основе данных, поступающих со стационарного радиолокационного детектора.

На начальном этапе исследования необходимо решить две задачи:

- обосновать методы оценки средней временной скорости свободного потока на основе данных, поступающих с радиолокационных детекторов;
- на основе полученных данных экспериментально выявить метод оценки значений средней временной скорости потока \bar{v}_t , максимально приближенных к значениям средней пространственной скорости \bar{v}_s .

Средняя временная скорость и средняя пространственная скорость

Основная диаграмма транспортного потока описывается общеизвестным уравнением

$$q = k\bar{v}_s, \quad (1)$$

где q — интенсивность транспортного потока, авт./ч; k — плотность транспортного потока, авт./км; \bar{v}_s — средняя пространственная скорость транспортного потока.

Стационарный радиолокационный детектор позволяет определять за каждый период агрегации данных среднюю временную скорость \bar{v}_t :

$$\bar{v}_t = \sum_{i=1}^{i=n} v_i / n, \quad (2)$$

где v_i — скорость транспортного средства i , км/ч; n — количество транспортных средств, зарегистрированных детектором за период мониторинга.

В 1952 г. Д. Уордроп (J. Wardrop) [7] установил зависимость, связывающую среднюю временную \bar{v}_t и среднюю пространственную \bar{v}_s скорости:

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s + \sigma_s^2 / \bar{v}_s, \quad (3)$$

где σ_s^2 — дисперсия средней пространственной скорости \bar{v}_s .

В соответствии с формулой (3) значения средней временной скорости \bar{v}_t всегда превы-

шают значения средней пространственной \bar{v}_s , и по результатам работы Д. Уордропа [7] разница между \bar{v}_t и \bar{v}_s составляла в среднем 5,2 км/ч (т. е. 11 %).

Позднее целый ряд авторов — В. Coifman, D. Lyddy и А. Skabardonis [8], Н. Rakha и W. Zhang [9] — предложили аппроксимирующую зависимость

$$\bar{v}_s \approx \bar{v}_t - \sigma_t^2 / \bar{v}_t, \quad (4)$$

где σ_t^2 — дисперсия средней временной скорости \bar{v}_t .

Кроме того, на основе зависимости (4) в руководстве по оценке пропускной способности Малайзии² было предложено приближение

$$\bar{v}_s \approx 1,021\bar{v}_t - 3,045. \quad (5)$$

В целом по результатам применения зависимости (4) различия средних пространственной и временной скоростей составляют 1–5 % [8, 9].

Агрегированные данные стационарного радиолокационного детектора (т. е. средние значения скорости за периоды агрегации) не позволяют определять точные значения дисперсии средней временной скорости σ_t^2 и, соответственно, использовать зависимость (4). Поэтому в случае применения радиолокационных детекторов можно использовать квазиплотность транспортного потока, предложенную авторами R. Kucharski и А. Drabicki [10], указывающими, что «в большинстве практических случаев доступны только стационарные измерения, и плотность может быть аппроксимирована только на основе мгновенных значений скорости и интенсивности движения». Соответственно, квазиплотность транспортного потока k оценивается как отношение [10]

$$k = q / v. \quad (6)$$

Использование квазиплотности позволяет включить в рассмотрение зависимости «скорость–плотность» и «интенсивность–плотность». В случае диаграммы «интенсив-

² Malaysian Highway Capacity Manual 2011. URL: <https://www.studocu.com/my/document/universiti-teknologi-mara/highway-and-traffic-engineering/malaysian-highway-capacity-manual/18854804>

ность–плотность» (рис. 1) средняя скорость потока в сводных условиях v_f является тангенсом касательной, исходящей из начала координат ($k_0 = 0$ и $v_0 = 0$)³.

Сравнение диаграмм транспортного потока, построенных с использованием средней временной и средней пространственной скоростей, показало, что с увеличением продолжительности периода агрегации данных расхождения между диаграммами снижаются [11]. Этим же исследованием установлено, что минимальные ошибки, вызванные применением средней временной скорости, наблюдаются в области низких значений плотности транспортного потока.

Методы исследования

На территории Иркутской агломерации радиолокационные детекторы размещены на подходах к Иркутску (дороги II технической категории) и на многополосных магистральных улицах регулируемого движения. Транспортные потоки в случае непрерывного (нерегулируемого) движения и в случае движения, регулируемого светофорными объектами, существенно отличаются своими параметрами. Поэтому каждый из этих

³ Fundamental relations of traffic flow. Lecture notes in Transportation Systems Engineering. URL: https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/1100_LnTse/502_LnTse/plain/plain.htm

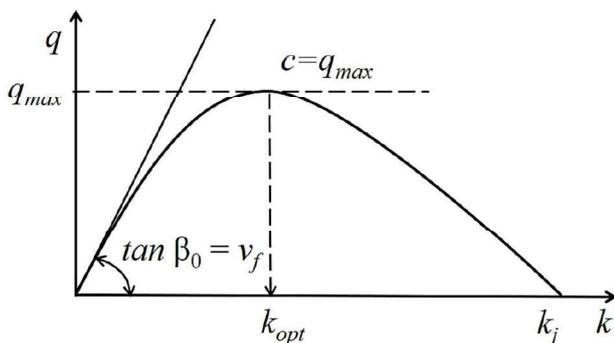


Рис. 1. Оценка скорости потока в свободных условиях с использованием диаграммы «интенсивность–плотность»:

q — интенсивность движения, авт./км;
 q_{max} — максимальная интенсивность движения (пропускная способность), авт./км; k — плотность потока, авт./км; k_j — плотность потока в условиях затора, авт./км;
 v_f — скорость потока в свободных условиях, км/ч

случаев требует проведения отдельного изучения.

В выполняемом исследовании рассматривается случай непрерывного движения: дорога II технической категории с отсутствием светофорных объектов. По результатам анализа литературы, рассматривающей двухполосные дороги [12–21], выбраны два варианта оценки скорости транспортного потока в свободных условиях, основанных на использовании:

- значений средней скорости при интенсивностях движения менее 100 авт./ч на полосу, что предлагается рядом авторов [16, 17, 19] и в отчете NCHRP 255 [20];
- значений скорости потока 85 % обеспеченности, измеренных в суточном цикле [21].

Скорость потока в свободных условиях v_f является параметром фундаментальной диаграммы транспортного потока [22]. Это позволяет в случае исследования эмпирической макроскопической диаграммы использовать статистические методы для оценки рассматриваемого параметра. В соответствии с этим будут рассмотрены следующие экспериментально определяемые значения скорости транспортного потока в свободных условиях v_f :

- среднее значение скорости при низкой интенсивности движения;
- значение 85 % обеспеченности за суточный период;
- свободный член регрессионной зависимости «скорость–интенсивность», которая может иметь как линейную, так и различные нелинейные формы [23];
- свободный член регрессионной зависимости «скорость–плотность», которая может иметь как линейную, так и различные нелинейные формы;
- коэффициент b_1 линейной аппроксимации $y = b_0 + b_1 x$ данных начального участка диаграммы «интенсивность–плотность» (см. рис. 1).



Рис. 2. Участок 6 км+900 дороги II технической категории Иркутск – Усть-Ордынский

С учетом систематического превышения средней временной скорости \bar{v}_t над средней пространственной скоростью \bar{v}_s [7–9] необходимо экспериментально установить способ оценки скорости в свободных условиях v_f дающий ее наименьшие значения.

В исследовании оценка скорости в свободных условиях выполнена на примере данных, поступающих с детектора UMRR-11 Туре 45, установленного на участке 6 км+900 дороги II технической категории Иркутск – Усть-Ордынский (рис. 2). Участок имеет три полосы движения: встречная полоса на спуск и две полосы на подъем. Шаг агрегации значений интенсивности движения и средней скорости принят равным 5 мин (рис. 3).

Результаты анализа данных интенсивности и скорости движения

Результаты оценки скорости движения в свободных условиях v_f при интенсивно-

сти движения на каждой из полос 50, 100 и 200 авт./ч представлены в табл. 2.

Повышение объема выборки (рассмотрение интенсивности до 200 авт./ч на полосу) несколько снижает значение средней скорости. Следует отметить, что количество значений случаев интенсивности движения менее 100 авт./ч превышает минимальный объем выборки, требуемый документом Минтранса⁴.

Результаты обработки данных скорости потока за суточный цикл и определения ее значений 85 % обеспеченности представлены в табл. 3. Соответственно получены значения скорости потока: встречная полоса — 84,51 км/ч; левая полоса — 90,00 км/ч; правая полоса — 74,60 км/ч.

Далее для каждой полосы движения рассмотрены диаграммы «скорость–интенсивность» (рис. 4).

У полосы встречного движения стабильное состояние потока наблюдается при интенсивности до 1000–1200 авт./ч, при этом влияние интенсивности на скорость аппроксимируется линейной зависимостью. У левой полосы движения наблюдается появление случаев низкой скорости при значениях интенсивности 400–600 авт./ч, а у правой —

⁴ Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения, утвержденные распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-Р.

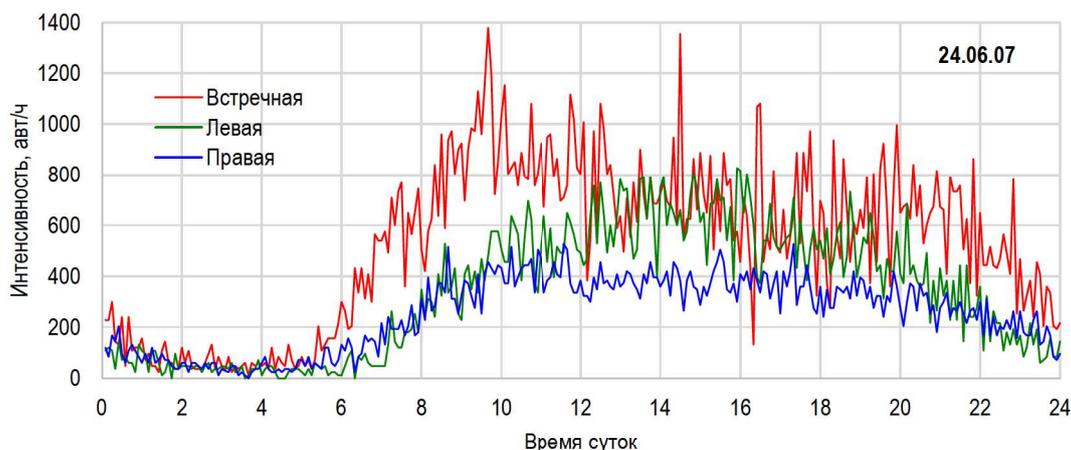


Рис. 3. Данные суточного мониторинга интенсивности движения (07.06.2024): период агрегации 5 мин

Таблица 2

Оценка свободной скорости движения v_f как среднего значения при низких значениях интенсивности движения (данные за сутки 07.06.2024)

Интенсивность движения, авт./ч	Объем выборки*	Скорость, км/ч			Стандартное отклонение	Ошибка оценки среднего	Коэффициент вариации
		средняя	min	max			
Встречная полоса движения							
≤50	27	86,17	69,84	101,40	8,68	1,67	0,10
≤100	46	86,87	69,84	101,40	7,12	1,05	0,08
≤200	67	86,09	69,84	101,40	7,03	0,86	0,08
Левая полоса движения							
≤50	53	89,94	72,00	116,82	9,27	1,27	0,10
≤100	76	89,35	72,00	116,82	8,13	0,93	0,09
≤200	107	88,48	72,00	116,82	7,31	0,71	0,08
Правая полоса движения							
≤50	34	85,67	72,54	103,32	7,34	1,26	0,09
≤100	67	84,70	72,54	103,32	6,11	0,75	0,07
≤200	104	83,46	72,54	103,32	5,76	0,56	0,07

* Количество периодов агрегации за сутки, в которые была зарегистрирована интенсивность движения, не превышающая указанную.

Таблица 3

Оценка свободной скорости движения v_f как значений 85 % обеспеченности (данные за сутки 07.06.2024)

Полоса	Интенсивность движения, авт./сутки	Объем выборки*	Скорость, км/ч		
			min	max	85 % обеспеченности
Встречная	12514	288	47,19	101,40	84,51
Левая	8023	282	32,11	116,82	90,00
Правая	6080	287	33,01	103,32	84,60

* Количество периодов агрегации за сутки, в которые была зарегистрирована интенсивность движения > 0.

в диапазоне значений более 300 авт./ч. Это позволяет предполагать, что на левой и правой полосах движения на подъем возникает «срыв потока» (flow breakdown [24]). В рассматриваемом случае применение нелинейной регрессии не дало повышения качества аппроксимации зависимостей «скорость–интенсивность».

Результаты анализа зависимостей, основанных на квазиплотности

Полученные на основе данных суточного мониторинга диаграммы «скорость–плотность» представлены на рис. 5.

Зависимость «скорость–плотность» полосы встречного движения аппроксимируется линейной зависимостью ($R^2 = 0,65$).

Коэффициенты детерминации линейных зависимостей для левой и правой полосы значительно ниже. Появление низких значений скорости (40 км/ч и менее) наблюдается на правой полосе при плотности потока более 5 авт./км и на левой полосе при плотности более 8 авт./км, что также можно рассматривать как случаи «срыва потока». Как и в случае зависимостей «скорость–плотность», использование нелинейных регрессионных моделей не улучшило качество аппроксимации.

Диаграммы «интенсивность–плотность» и линейные уравнения регрессии, построенные для начальных участков этих диаграмм, представлены на рис. 6.

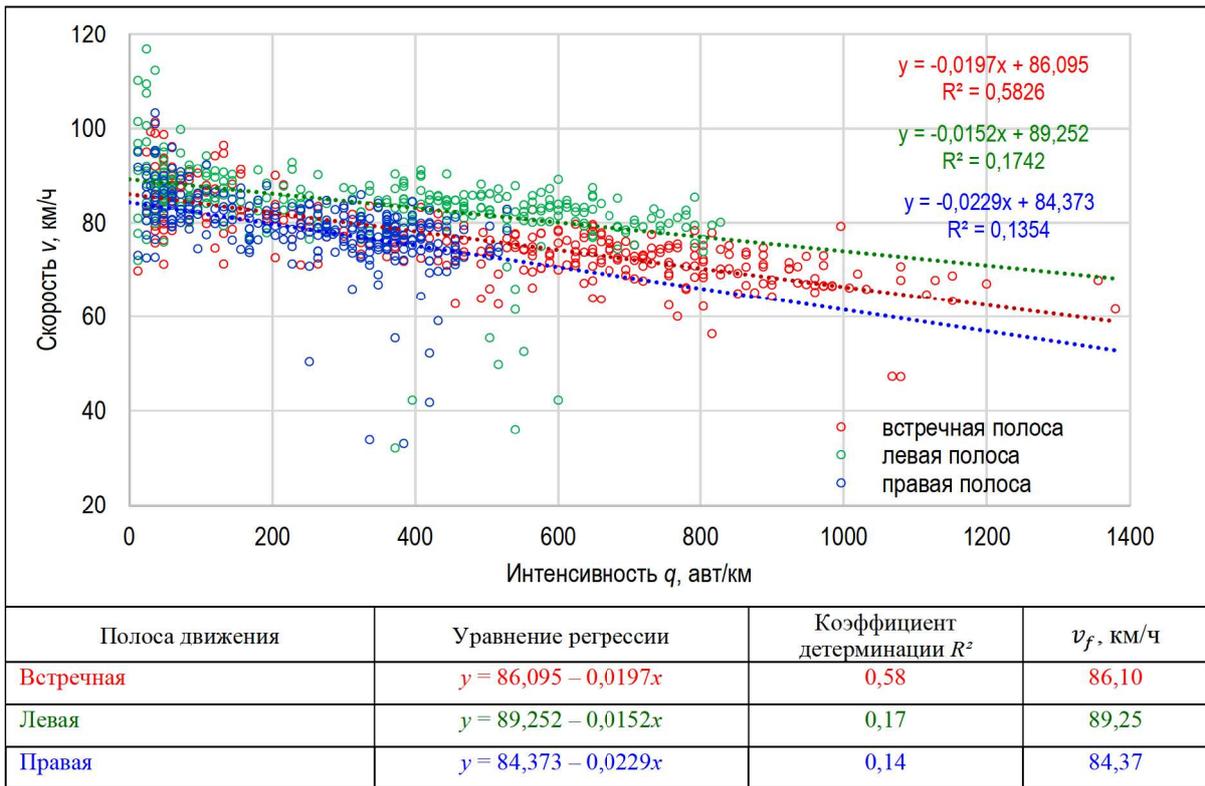


Рис. 4. Оценка свободной скорости движения v_f с использованием зависимостей «скорость–интенсивность» (данные за сутки 07.06.2024)

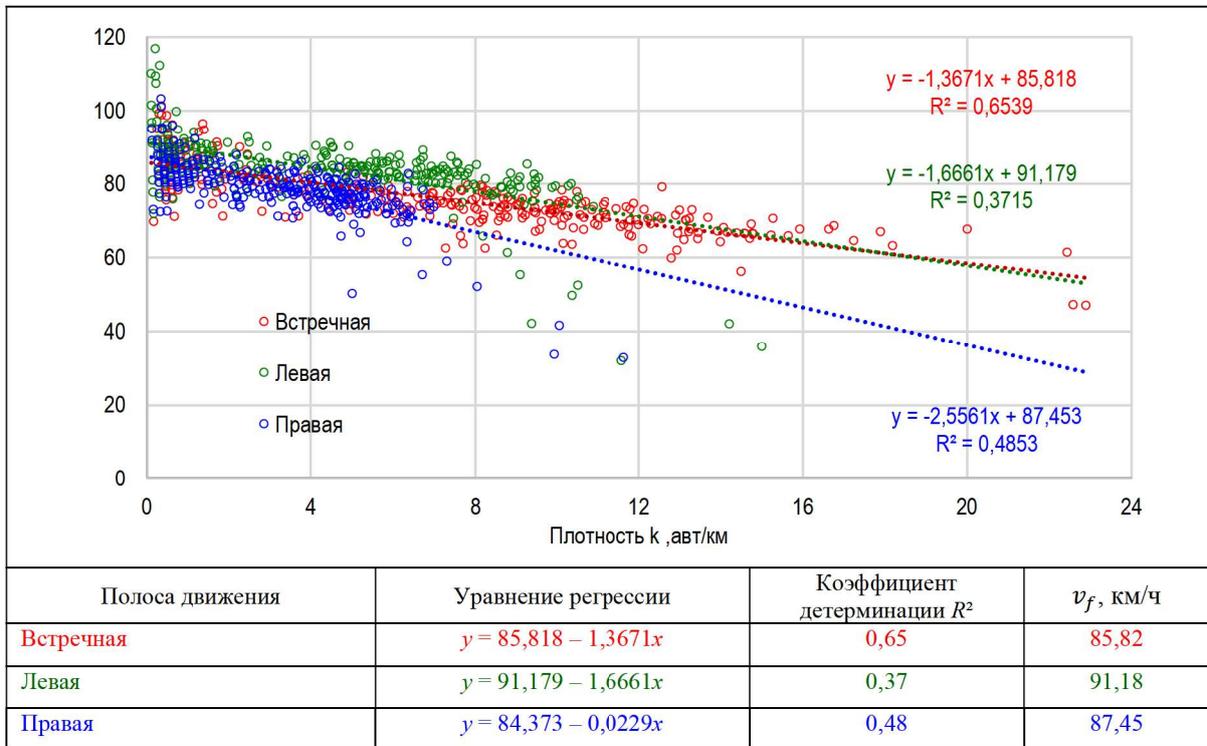


Рис. 5. Линейные зависимости «скорость–плотность» (данные за сутки 07.06.2024)

Установленные регрессионные зависимости имеют высокие значения коэффициентов детерминации R^2 и в соответствии с полученными значениями критерия Фишера статистически значимы. Следует

особо отметить высокие значения критерия Стьюдента коэффициентов b_1 линейной регрессии $y = b_0 + b_1x$, что свидетельствует о статистической надежности выполненной оценки скорости потока в свободных условиях.

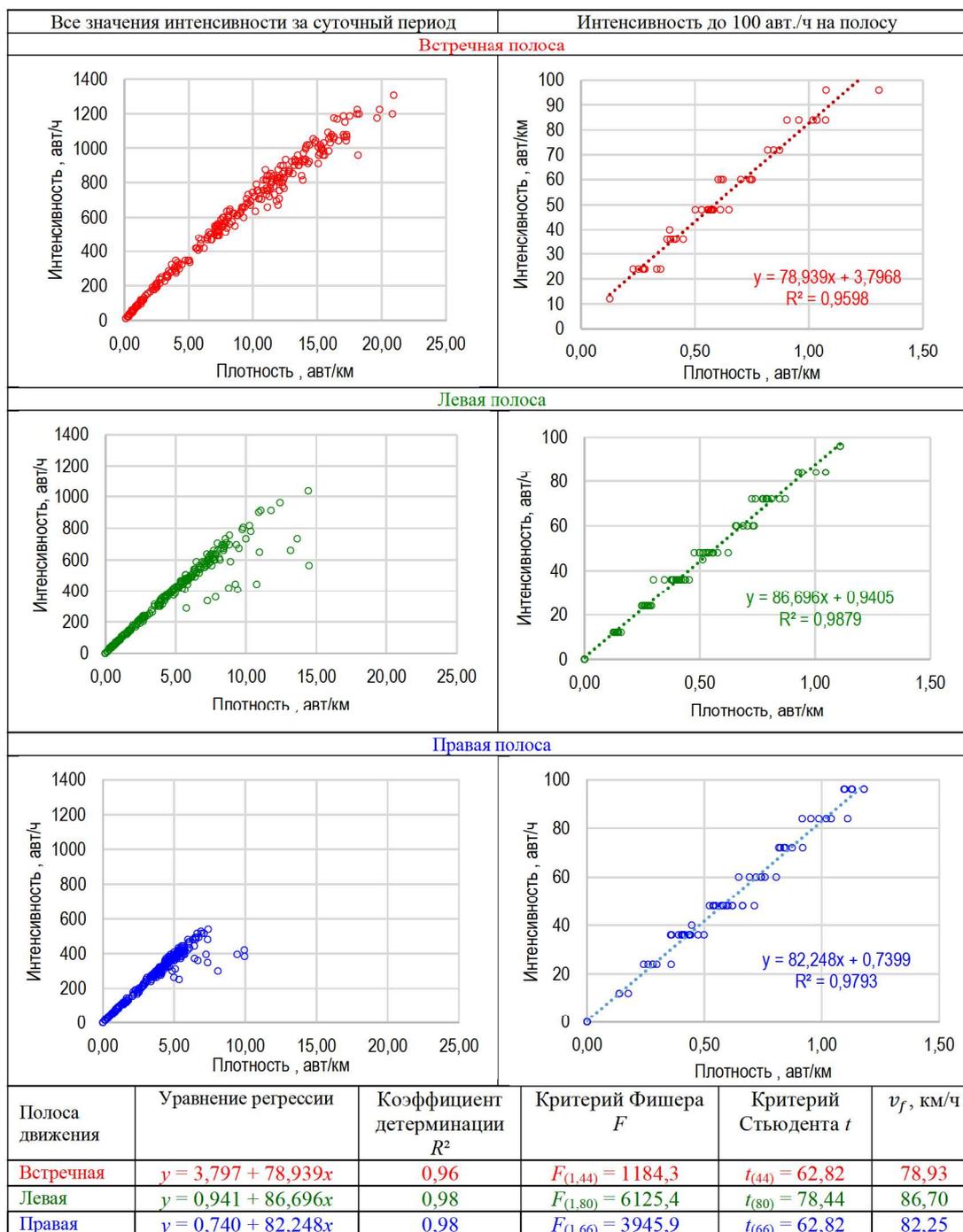


Рис. 6. Результаты оценки свободной скорости потока с использованием диаграмм «интенсивность–плотность» (данные за сутки 07.06.2024)

Обсуждение

Значения скорости потока в свободных условиях v_p установленные пятью способами, сведены в табл. 4. Необходимо отметить, что способ оценки с использованием линейной регрессии данных диаграммы «интенсивность–плотность» дает наименьшие значения средней временной скорости в свободных условиях. На этом основании именно этот метод выбирается для дальнейших исследований.

Представляется интересным рассмотреть влияние объема выборки, т. е. сравнить качество аппроксимации при рассмотрении данных, полученных за месячный и суточный периоды. Диаграммы «интенсивность–плотность» и уравнения регрессии, полученные по данным за февраль 2025 г., представлены на рис. 7.

В конкретном случае увеличенный объем выборки (см. рис. 7) дает некоторое увеличение значения коэффициента детерминации по сравнению со случаем рассмотрения данных за суточный период (см. рис. 6). Вместе с тем при обработке данных от детекторов, расположенных на соседнем двухполосном участке дороги Иркутск–Усть-Ордынский (январь 2025 г.), получены регрессионные уравнения с гораздо более низкими значениями коэффициента детерминации: $R^2 = 0,5-0,6$. Поэтому изучение выборок за недельный или месячный период целесообразно осуществлять для решения другой задачи — выявления фазовых состояний транспортного потока [25], которые, напри-

мер, ярко проявляются на рассматриваемом участке у левой и правой полос движения на подъем (см. рис. 7).

Выводы

По результатам выполненного исследования представляется возможным сделать следующие выводы:

- в режиме реального времени текущее значение уровня обслуживания оценивается отношением средней временной скорости к базовому значению средней временной скорости потока в свободных условиях;
- для оценки скорости потока в свободных условиях рекомендуется применять линейную регрессию данных диаграммы «интенсивность–плотность» с использованием значений интенсивности до 100 авт./ч на полосу;
- предлагается анализировать суточные периоды, что позволит накапливать и систематизировать данные о влиянии дорожных условий (осадков в виде дождя и снега, видимости по метеорологическим условиям и т. д.) на скорость потока в свободных условиях.

В соответствии с приведенными выводами на нескольких участках размещения радиолокационных детекторов будет выполняться исследование суточных выборок данных с целью определения:

- рекомендуемого количества изучаемых суточных периодов для установления базового значения скорости свободного потока на участке размещения детектора;
- степени влияния дорожных условий на значения скорости потока в свободных условиях.

Таблица 4

Значения скорости потока в свободных условиях v_f (данные за сутки 07.06.2024)

Полоса	Способ оценки скорости в свободных условиях и полученные значения v_p , км/ч				
	Средняя при интенсивности менее 100 авт./ч	Скорость 85 % обеспеченности за суточный период	Зависимость «скорость–интенсивность»	Зависимость «скорость–плотность»	Зависимость «интенсивность–плотность»
Встречная	86,87	84,51	86,10	85,82	78,94
Левая	89,35	90,00	89,25	91,18	86,70
Правая	84,70	84,60	84,37	86,35	82,25

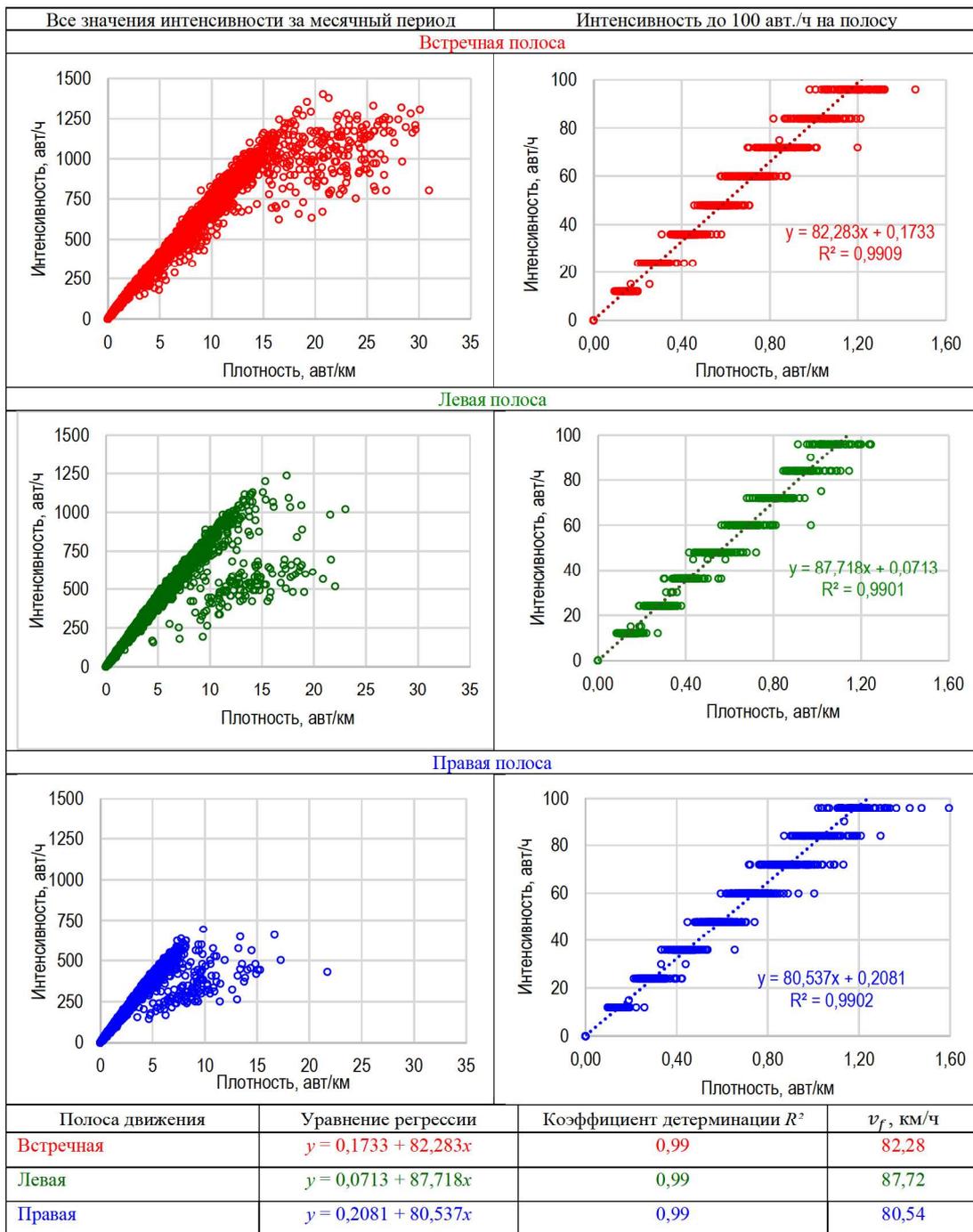


Рис. 7. Результаты оценки свободной скорости потока с использованием диаграмм «интенсивность–плотность» (данные за период 01.02.2025–28.02.2025)

На последующих стадиях исследования планируется на основе рассмотрения выборок, полученных за недельные и месячные периоды на нескольких участках дорожной сети иркутской агломерации,

установить значения параметров макроскопической диаграммы транспортного потока:

- оптимальную скорость и плотность транспортного потока, соответствующие

максимальной интенсивности движения (т. е. пропускной способности);

- сочетания значений скорости и плотности транспортного потока в случаях его срыва (т. е. перехода в нестабильное состояние).

Выполнение таких исследований позволит разработать научно обоснованную и экспериментально подтвержденную методику оценки характеристик транспортного потока на двухполосных автомобильных дорогах общего пользования, включая участки устройства дополнительных полос.

Библиографический список

1. Морозов В. В. Влияние концентрации транспортного потока на интенсивность движения автомобилей в городах (на примере г. Тюмени): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2020. 18 с.
2. Han J., Polak J. W., Barria J., Krishnan R. On the estimation of space-mean-speed from inductive loop detector data // *Transportation Planning and Technology*. 2010. Vol. 33 (1). Pp. 91–104. DOI 10.1080/03081060903429421.
3. Dailey D. J. A Statistical Algorithm for Estimating Speed from Single Loop Volume and Occupancy Measurements // *Transportation Research*. Part B. 1999. Vol. 33 (5). Pp. 313–322.
4. Wang Y., Nihan N. L. Freeway Traffic Speed Estimation with Single Loop Outputs // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2000. Vol. 1727. Pp. 120–126.
5. Coifman B. Improved Velocity Estimation Using Single Loop Detectors // *Transportation Research*. Part A: Policy and Practice. 2001. Vol. 35 (10). Pp. 863–880.
6. Paing S. M., Mon S. S. Y., Tun H. M. Design and Analysis of Doppler Radar-Based Vehicle Speed Detection // *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2016. Vol. 5 (6). Pp. 145–148.
7. Wardrop J. G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research // *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*. 1952. Part II. Vol. 1. Pp. 325–378.
8. Coifman B., Lyddy D., Skabardonis A. The Berkeley Highway Laboratory — Building on the I-880 Field Experiment // *Proc. IEEE ITS Council Annual Meeting*. 2000. Pp. 5–10.
9. Rakha H., Zhang W. Estimating traffic stream space mean speed and reliability from dual- and single-loop detectors // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2005. Vol. 1925 (1). Pp. 38–47.
10. Kucharski R., Drabicki A. Estimating Macroscopic Volume Delay Functions with the Traffic Density Derived from Measured Speeds and Flows // *Journal of Advanced Transportation*. 2017. 4629792. DOI 10.1155/2017/4629792.
11. Knoop V., Hoogendoorn S., van Zuylen H. Empirical differences between time mean speed and space mean speed // *Conference proceedings: Traffic and Granular Flow*. 2007. Pp. 351–356.
12. Harwood D. W., May A. D., Anderson I. B., Leiman L., Archilla A. R. Capacity and Quality of Service of Two-Lane Highways. NCHRP Final Report 3-55(3). 1999. 219 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/239447189_Capacity_and_Quality_of_Service_of_Two-Lane_Highways (дата обращения: 17.01.2025).
13. Morrall J. F., Werner A. Measuring Level of Service of Two-Lane Highways by Overtakings // *Transportation Research Record*. 1988. 1287. Pp. 62–69.
14. Polus A., Craus J., Livneh M. Flow and Capacity Characteristics on Two-Lane Rural Highways // *Transportation Research Record*. 1991. 1320. Pp. 128–134.
15. Booraa A., Ghosh I. Performance Indicator for Two-Lane Intercity Highways under Heterogeneous Traffic Condition // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 22. Pp. 459–468.
16. Sekhar C. R., Nataraju J., Velmurugan S., Kumar P., Sitaramanjaneyulu K. Free Flow Speed Analysis of Two Lane Inter Urban Highways // *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 17. Pp. 664–673.
17. Lobo A., Rodrigues C., do Couto A. F. Free-Flow Speed Model Based on Portuguese Roadway Design Features for Two-Lane Highways // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2013. 2348. Pp. 12–18.
18. Stepanović N., Tubić V., Zdravković S. Determining Free-Flow Speed on Different Classes of Rural Two-Lane Highways // *Promet-Traffic & Transportation*. 2023. Vol. 35 (3). Pp. 315–330.
19. García-Jiménez M. E., Pérez-Zuriaga A., Llopis-Castelló D., Camacho-Torregrosa F. J. Examination of the Free-Flow Speed Distribution on Two-Lane Rural Roads // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2016. 2556. Pp. 86–97.
20. Washburn S. S., Watson D., Bian Z., Al-Kaisy A., Jafari A., Luttinen T., Dowling R., Elias A. NCHRP Web-Only Document 255: Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance. 2018. 670 p. URL: <http://nar.edu/25179> (дата обращения: 17.04.2025).
21. Bekhor S., Lotan T., Gitelman V., Morik S. Free-Flow Travel Speed Analysis and Monitoring at the National Level Using Global Positioning System

Measurements // *Journal of Transportation Engineering*. 2013. Vol. 139 (12). Pp. 1235–1243.

22. Bramich D. M., Menéndez M., Ambühl L. Fitting empirical fundamental diagrams of road traffic: A comprehensive review and comparison of models using an extensive data set // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23 (9). Pp. 14104–14127.

23. Gaddam H. K., Rao K. R. Speed–density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation // *Journal of Modern Transportation*. 2019. Vol. 27 (1). Pp. 61–74.

24. Wada K., Seo T., Shiomi Y. Flow Breakdown // R. Vickerman, R. B. Noland, D. Ettema (eds.). *International Encyclopedia for Transportation*. Elsevier Science, 2020. URL: <https://toruseo.jp/paper/Wada2020breakdown.pdf> (дата обращения: 17.04.2025).

25. Kerner B. S., Konhäuser P. Structure and Parameters of Clusters in Traffic Flow // *Physical Review E*. 1994. Vol. 50. Pp. 54–83.

References

1. Morozov V. V. *Vliyanie kontsentratsii transportnogo potoka na intensivnost' dvizheniya avtomobiley v gorodakh (na primere g. Tyumeni)*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Influence of traffic concentration on traffic intensity in cities (on the example of Tyumen). Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Orenburg, 2020, 18 p.

2. Han J., Polak J. W., Barria J., Krishnan R. On the estimation of space-mean-speed from inductive loop detector data. *Transportation Planning and Technology*, 2010, vol. 33 (1), pp. 91–104. DOI 10.1080/03081060903429421.

3. Dailey D. J. A Statistical algorithm for estimating speed from single loop volume and occupancy measurements. *Transportation Research Part B*, 1999, vol. 33 (5), pp. 313–322.

4. Wang Y., Nihan N. L. Freeway Traffic Speed Estimation with Single Loop Outputs. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2000, vol. 1727, pp. 120–126.

5. Coifman B. Improved velocity estimation using single loop detectors. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, vol. 35 (10), pp. 863–880.

6. Paing S. M., Mon S. S. Y., Tun H. M. Design and Analysis of Doppler Radar-Based Vehicle Speed Detection. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2016, vol. 5 (6), pp. 145–148.

7. Wardrop J. G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 1952, Part II, vol. 1, pp. 325–378.

8. Coifman B., Lyddy D., Skabardonis A. The Berkeley Highway Laboratory—Building on the I-880 Field

Experiment. *Proc. IEEE ITS Council Annual Meeting*, 2000, pp. 5–10.

9. Rakha H., Zhang W. Estimating traffic stream spacemean speed and reliability from dual- and single-loop detectors. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2005, vol. 1925 (1), pp. 38–47.

10. Kucharski R., Drabicki A. Estimating Macroscopic Volume Delay Functions with the Traffic Density Derived from Measured Speeds and Flows. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, 4629792. DOI 10.1155/2017/4629792.

11. Knoop V., Hoogendoorn S., van Zuylen H. Empirical differences between time mean speed and space mean speed. *Conference proceedings: Traffic and Granular Flow*, 2007, pp. 351–356.

12. Harwood D. W., May A. D., Anderson I. B., Leiman L., Archilla A. R. Capacity and quality of service of two-lane highways. *NCHRP Final Report*, 3-55(3), 1999. 219 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/239447189_Capacity_and_Quality_of_Service_of_Two-Lane_Highways (accessed: 17.01.2025).

13. Morrall J. F., Werner A. Measuring Level of Service of Two-Lane Highways by Overtakings. *Transportation Research Record*, 1988, 1287, pp. 62–69.

14. Polus A., Craus J., Livneh M. Flow and Capacity Characteristics on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record*, 1991, 1320, pp. 128–134.

15. Booraa A., Ghosh I. Performance Indicator for Two-Lane Intercity Highways under Heterogeneous Traffic Condition. *Transportation Research Procedia*, 2017, vol. 22, pp. 459–468.

16. Sekhar C. R., Nataraju J., Velmurugan S., Kumar P., Sitaramanjaneyulu K. Free Flow Speed Analysis of Two Lane Inter Urban Highways. *Transportation Research Procedia*, 2016, vol. 17, pp. 664–673.

17. Lobo A., Rodrigues C., do Couto A. F. Free-Flow Speed Model Based on Portuguese Roadway Design Features for Two-Lane Highways. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2013, 2348, pp. 12–18.

18. Степановиќ N., Тубиќ V., Здравковиќ S. Determining Free-Flow Speed on Different Classes of Rural Two-Lane Highways. *Promet-Traffic & Transportation*, 2023, vol. 35 (3), pp. 315–330.

19. Гарсна-Џимњез M. E., Пјез-Зуриага A., Ллопис-Кастелло D., Камачо-Торрегроса F. J. Examination of the Free-Flow Speed Distribution on Two-Lane Rural Roads. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2556, pp. 86–97.

20. Washburn S. S., Watson D., Bian Z., Al-Kaisy A., Jafari A., Luttinen T., Dowling R., Elias A. NCHRP Web-Only Document 255: Improved Analysis of Two-

Lane Highway Capacity and Operational Performance. 2018, 670 p. Available at: <http://nap.edu/25179> (accessed: 17.04.2025).

21. Bekhor S., Lotan T., Gitelman V., Morik S. Free-Flow Travel Speed Analysis and Monitoring at the National Level Using Global Positioning System Measurements. *Journal of Transportation Engineering*, 2013, vol. 139 (12), pp. 1235–1243.

22. Bramich D. M., Menéndez M., Ambühl L. Fitting empirical fundamental diagrams of road traffic: A comprehensive review and comparison of models using an extensive data set. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23 (9), pp. 14104–14127.

23. Gaddam H. K., Rao K. R. Speed–density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation. *Journal of Modern Transportation*, 2019, vol. 27 (1), pp. 61–74.

24. Wada K., Seo T., Shiomi Y. Flow Breakdown. R. Vickerman, R. B. Noland, D. Ettema (eds.). *International Encyclopedia for Transportation*. Elsevier Science, 2020. Available at: <https://toruseo.jp/paper/Wada2020breakdown.pdf> (accessed: 17.04.2025).

25. Kerner B. S., Konhäuser P. Structure and Parameters of Clusters in Traffic Flow. *Physical Review E*, 1994, vol. 50, pp. 54–83.