

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-254-265>
EDN: KHGPFE



ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАКРОСКОПИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

И.И. Тараховский¹, А.Ю. Михайлов² ✉

¹ООО «КВАНТ ИНЖИНИРИНГ»,
г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

✉ ответственный автор
89148701840@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Действующие в Российской Федерации методические рекомендации по выполнению мониторинга дорожного движения не содержат детальные рекомендации по использованию детекторов транспорта, хотя предусматривают их применение. Эффективному применению детекторов транспорта препятствует недостаток знаний о возможностях эмпирической оценки параметров макроскопических моделей транспортного потока. В статье рассматриваются методы определения моделей макроскопической фундаментальной диаграммы и значений ее параметров на основе данных, поступающих от стационарных радиолокационных детекторов.

Цель исследования. Автоматизация оценки уровня обслуживания транспортных потоков в режиме реального времени и разработка практических рекомендаций по обработке данных, поступающих от радиолокационных детекторов.

Объект исследования. Процесс мониторинга дорожного движения.

Предмет исследования. Модели макроскопической диаграммы и их параметры, определяемые на основе данных, поступающих от радиолокационных детекторов.

Методика исследования. Исследованы режимы непрерывного движения на автомобильных дорогах II технической категории – подходах к г. Иркутску. Мониторинг выполнялся с применением стационарных радиолокационных детекторов. Интенсивность движения и средняя временная скорость определялись с периодом агрегации 5 мин. Плотность транспортного потока оценивалась как отношение интенсивности к скорости.

Результаты. Экспериментально установлена необходимость применения макроскопических моделей первого и второго порядков при обработке данных, поступающих от детекторов, что является важнейшим результатом начального этапа исследований. Получены данные, характеризующие зависимости скорость-плотность и интенсивность-плотность для полос движения, размещенных на горизонтальных участках, для полос движения на спуск, полос движения на подъем. Сформулированы задачи дальнейших исследований по разработке методики обработки данных радиолокационных детекторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стационарные радиолокационные детекторы, макроскопическая диаграмма транспортного потока, зависимость скорость-плотность, одно- и многорежимные модели

Статья поступила в редакцию 20.01.2026; одобрена после рецензирования 05.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Тараховский И.И., Михайлов А.Ю. Обоснование выбора макроскопических моделей транспортного потока для мониторинга дорожного движения // *Вестник СибАДИ*. 2026. Т. 23, № 2. С. 254-265. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-254-265>

© Тараховский И.И., Михайлов А.Ю., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-254-265>
EDN: KHGPF

ON THE CHOICE OF MACROSCOPIC TRAFFIC FLOW MODELS FOR TRAFFIC MONITORING

Igor I. Tarakhovsky¹, Alexander Yu. Mikhailov² ✉

¹Kvantex LLC,
Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia

✉ corresponding author
89148701840@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Current guidelines for road traffic monitoring in the Russian Federation do not contain detailed recommendations for the use of traffic detectors, although the rules do stipulate their use. Effective application of traffic detectors is hampered by a lack of knowledge about the empirical evaluation of macroscopic traffic flow model parameters. This article discusses methods for determining macroscopic fundamental diagram models and their parameter values based on data from stationary radar detectors.

The aim of the study. Is related to automation of real-time traffic flow service level assessment and development of practical recommendations for processing data from radar detectors. The research has been focused on road traffic monitoring, in particular, macroscopic diagram models and their parameters determined from the data of radar detectors.

Research Methodology. Uninterrupted traffic conditions on roads of category II approaching Irkutsk have been studied. Stationary radar detectors have been used during monitoring. Traffic volumes and average time speed were determined with a 5-minute aggregation period. Traffic density was estimated as the ratio of traffic volume to speed.

Results. The need for first- and second-order macroscopic models in processing data from detectors has been experimentally proved, which is a key result of the initial research stage. Data characterizing the speed-density and intensity-density relationships for traffic lanes located on horizontal sections, for downhill traffic lanes, and for uphill traffic lanes have been obtained. Objectives for further research to develop a method for processing radar detector data have been specified.

KEYWORDS: traffic monitoring, radar detectors, macroscopic traffic flow diagram, speed-density relationship, single- and multi-mode macroscopic models

The article was submitted: January 20, 2025; **approved after reviewing:** March 19, 2026; **accepted for publication:** April 17, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Tarakhovsky I.I., Mikhailov A.Yu. On the choice of macroscopic traffic flow models for traffic monitoring. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 254-265. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-254-265>

© Tarakhovsky Igor I., Mikhailov Alexander Yu., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения»¹ формулируются требования к мониторингу дорожного движения, при этом предусматривается использование ГЛОНАСС и GPS треков и детекторов транспорта. В документе подробно изложена методика оценки основных параметров транспортных потоков с применением треков, но не содержатся детальные указания по использованию данных, поступающих от детекторов транспорта. Вместе с тем количество используемых в РФ детекторов транспорта разных типов непрерывно растет. Так, в 2025 г. на территории Иркутской агломерации уже функционирует 40 детекторов транспорта.

Важным достоинством транспортных детекторов является возможность непрерывного получения в режиме реального времени данных о состоянии транспортных потоков. Важно, что поступающие в процессе мониторинга данные позволяют формировать и анализировать статистически репрезентативные выборки данных. Такие данные после математической обработки могут использоваться:

- для определения скорости потока в свободных условиях;
- определения критических значений скорости и плотности потока, при которых наблюдается максимальная интенсивность движения (т.е. пропускная способность);
- оценки уровня обслуживания транспортного потока в режиме реального времени как отношения текущего значения скорости потока к скорости потока в свободных условиях или как отношения интенсивности движения к пропускной способности (т.е. автоматизации оценки качества дорожного движения).

Для определения значений перечисленных выше характеристик необходимо устанавливать тип уравнения макроскопической диаграммы и оценивать значения параметров, входящих в состав уравнения. В нашей стра-

не публиковались работы, рассматривающие свойства фундаментальной макроскопической диаграммы транспортного потока [1,2], а также рассматривающие отдельные задачи практического ее применения [3]. Вместе с тем отмечаются единичные случаи публикаций по определению макроскопической диаграммы на основе данных, поступающих от детекторов². В этой связи ООО «КВАНТ ИНЖИНИРИНГ» (г. Иркутск) и Иркутский национальный исследовательский технический университет приступили к совместным исследованиям, целью которых являются [4,5]:

- автоматизация оценки уровня обслуживания транспортных потоков в режиме реального времени;
- разработка практических рекомендаций по обработке данных, поступающих с радиолокационных детекторов.

Цели исследования требуют последовательно решения целого ряда теоретических и экспериментальных задач. В рамках впервые выполняемого исследования предстоит определить условия, при которых следует применять модели первого порядка³ (first order models или single regime models) и модели второго порядка (second order models или multi regime models). Основанием для применения мультирежимных моделей является наличие в потоке кластеров, характеризующих разные режимы движения [6, 7, 8].

Особенностью стационарных радиолокационных детекторов является то, что они измеряют интенсивность движения и скорость движения в сечении потока, т.е. определяется средняя временная скорость \bar{v}_t , которая является смещенной оценкой средней пространственной скорости \bar{v}_s . Wardrop J.⁴ в 1952 г. установил зависимость, связывающую среднюю временную и среднюю пространственную \bar{v}_s скорости

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s + \sigma_s^2 / \bar{v}_s, \quad (1)$$

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

¹ «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения» утверждены распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/489281> (дата обращения: 28.10.2025).

² Морозов В.В. Влияние концентрации транспортного потока на интенсивность движения автомобилей в городах (на примере г. Тюмени): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Морозов Вячеслав Валерьевич. Оренбург, 2020, 18 с.

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

⁴ Wardrop J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1952. Part II. 1. pp. 325–378.

Позднее ряд авторов Coifman B., Lyddy D. и Skabardonis A.⁵, Rakha H. и Zhang W.⁶ предложили более удобную для практического применения зависимость

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

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

В работах указанных выше авторов и ряде других статей [9, 10, 11] рассматривалось применение петлевых (индукционных) детекторов. Поэтому в настоящем исследовании еще предстоит установить зависимость влияния интенсивности движения на дисперсию средней временной скорости для разных дорожных условий.

Результаты ранее выполненных исследований [12, 13, 14, 15] показывают, что в силу разнообразия режимов движения транспортных потоков при определении уравнения макроскопической диаграммы и ее характеристик отдельно рассматриваются случаи:

- непрерывного движения на двухполосных дорогах;
- непрерывного движения на многополосных магистральных дорогах;
- прерываемое движение на городских

улицах и дорогах (воздействие светофорных объектов).

Учитывая это, принято решение – на начальном этапе многостадийного исследования рассмотреть случай непрерывного движения на двухполосных автомобильных дорогах общего пользования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнено исследование режимов непрерывного движения на трех участках дорог II технической категории – Култукский тракт и «Иркутск – Усть-Ордынский», на которых в пиковые часы наблюдается суммарная интенсивность в обоих направлениях – 2400–3000 авт/ч. Выбранные участки, расположенные на подходах к г. Иркутску, отличаются геометрическими параметрами и позволяют рассматривать максимально широкий диапазон значений интенсивности движения, наблюдающийся на дорогах II технической категории. Мониторинг дорожного движения выполнялся с применением стационарных радиолокационных детекторов. Интенсивность движения (авт/ч) и средняя временная скорость (км/ч) определялись с периодом агрегации 5 мин в отдельности для каждой полосы (рисунок 1).

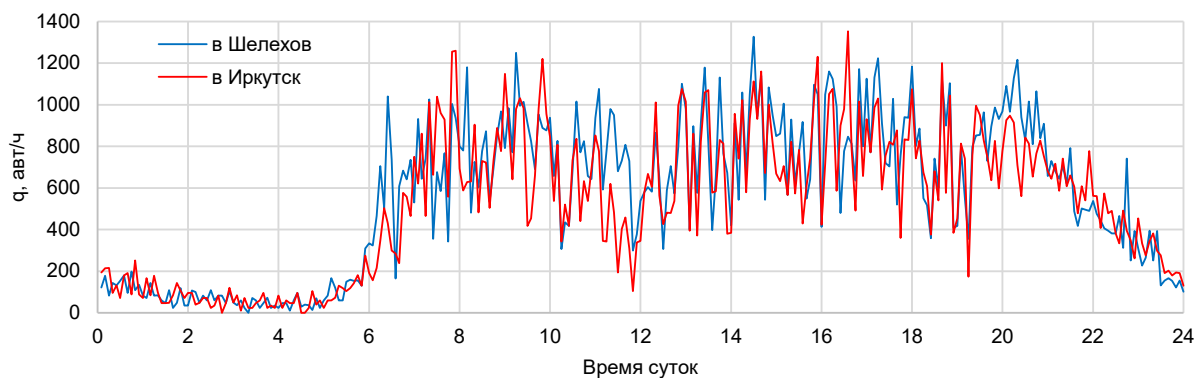


Рисунок 1 – Суточные данные мониторинга интенсивности движения: Култукский тракт, ост. Луговое 24.05.14
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Daily traffic monitoring data: Kultuisky tract, Lugovoe bus stop, May 24, 2014
Source: compiled by the authors.

⁵Coifman 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.

⁶Rakha H., Zhang W. Estimating traffic stream space-mean speed and reliability from dual and single loop detectors. Transportation Research Record. 2005. No. 1925. pp. 38–47.

Плотность транспортного потока k в каждый период агрегации оценивалась как отношение интенсивности q к скорости v_t

$$k = q/v_t. \quad (3)$$

Представленный вариант оценки плотности потока (3) предусматривается указаниями по выполнению мониторинга нашей страны⁷ и США⁸.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты следует рассматривать как предварительные, поскольку на их основе будут формулироваться задачи последующих этапов исследования. Зависимости скорость-плотность и интенсивность-скорость, полученные по данным трех рассмотренных участков, представлены в таблице 1. При этом на участке а/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 отдельно рассмотрены зависимости для левой и правой полосы движения на подъеме.

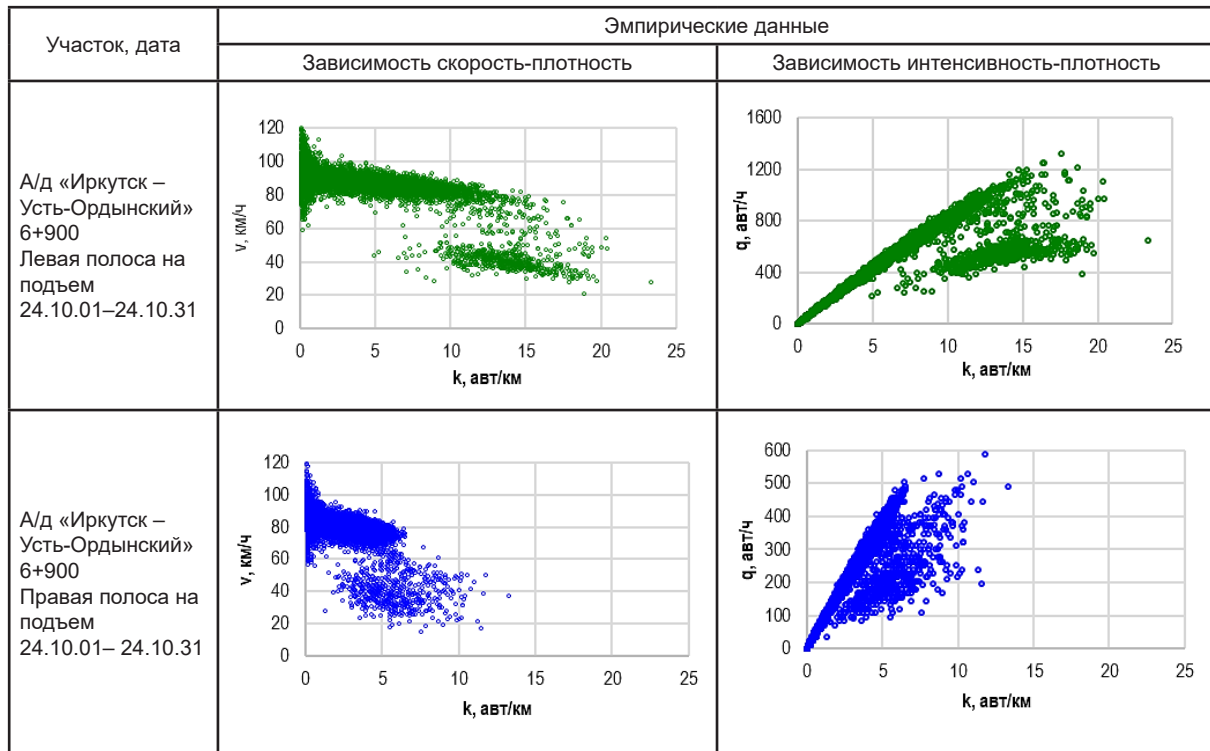
Таблица 1
Примеры данных мониторинга
Источник: составлено авторами.

Table 1
Monitoring data
Source: compiled by the authors.

Участок, дата	Эмпирические данные	
	Зависимость скорость-плотность	Зависимость интенсивность-плотность
Култукский тракт ост. Луговое горизонтальный участок 24.05.13 –24.05.20		
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» Примыкание СНТ Мечта Горизонтальный участок 24.10.01– 24.10.31		
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 Полоса на спуск, отделенная сплошной разметкой 24.10.01– 24.10.31		

⁷ «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения» утверждены распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/489281> (дата обращения: 28.10.2025)

⁸ Density Calculation from Detector Data. URL: <https://data.dot.state.mn.us/datatools/Density.html> (дата обращения: 28.10.2025)



Представленные в таблице 1 данные убедительно иллюстрируют различия характеристик транспортных потоков на рассмотренных участках. Отличаются как диаграммы скорость-плотность, так и интенсивность-скорость, что указывает на уникальность характеристик транспортного потока в каждом рассматриваемом случае. Поскольку для определения аналитического уравнения ма-

кроскопической диаграммы используется зависимость скорости от плотности [16, 17, 18, 19, 20, 21], для этих зависимостей был выполнен регрессионный анализ. Только для трех случаев из пяти, представленных в таблице 1, были получены регрессионные зависимости с коэффициентом детерминации более 0,5 (таблица 2).

Таблица 2
Уравнения регрессии зависимости скорость-плотность
Источник: составлено авторами.

Table 2
Regression equations for the velocity-density relationship
Source: compiled by the authors.

Участок, дата	Уравнение регрессии	R ²	Зависимость/предполагаемая модель
Култукский тракт ост. Луговое Горизонтальный участок 24.05.13 – 24.05.20	$v = 62,648 - 0,8173 k$	0,8119	Линейная / Greenshields model
	$v = 65,757e^{-0,02k}$	0,8078	Экспоненциальная / Underwood model
	$v = 66,246 - 7,788 \ln(k)$	0,5539	Логарифмическая / Greenberg model
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» Примыкание СНТ Мечта Горизонтальный участок 24.10.01 – 24.10.31	$v = 67,029e^{-1,5283 k}$	0,5560	Линейная / Greenshields model
	$v = 69,024e^{-0,035k}$	0,5900	Экспоненциальная / Underwood model
	$v = 65,948 - 7,248 \ln(k)$	0,4724	Логарифмическая / Greenberg model
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 Полоса на спуск, отделенная сплошной разметкой 24.10.01 – 24.10.31	$v = 86,043 - 1,4379 k$	0,6367	Линейная / Greenshields model
	$v = 86,482e^{-0,02k}$	0,6455	Экспоненциальная / Underwood model
	$v = 85,26 - 6,766 \ln(k)$	0,5717	Логарифмическая / Greenberg model

На участке движения на подъём (см. таблицу 1) у каждой из полос на диаграммах скорость-плотность и интенсивность-скорость наблюдается не разброс данных, а разделение данных на две группы, что указывает на наличие в потоке кластеров [6, 7, 8] и уже исключает применение моделей первого порядка.

ОБСУЖДЕНИЕ

Разнообразие данных, полученных даже всего на трех участках (см. таблицы 1 и 2), позволяют утверждать, что характеристики макроскопической диаграммы транспортного потока должны определяться отдельно для каждого участка размещения стационарного детектора. В этой связи в продолжающихся исследованиях необходимо выполнить:

- теоретическое обоснование методов и критериев выбора вида однорежимных (т.е. первого порядка) и многорежимных моделей (моделей второго порядка), а также методов оценки значений параметров этих моделей;
- экспериментальное тестирование выбранных методов с использованием данных, собранных на участках, отличающихся условиями дорожного движения.

Модели первого порядка более просты в практическом применении, что является их преимуществом. За долгий период развития теории транспортных потоков разработано более пятнадцати моделей первого порядка, представленных в работах Underwood R.T.⁹, Castillo J.M.D. и Benítez F.G.¹⁰, а также в более поздних публикациях [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21], наиболее распространенные из них приведены в таблице 3 и сгруппированы не в хронологическом порядке, а по характеру положенных в основу зависимостей и параметров:

v_f – скорость потока в свободных условиях;
 k_j – максимальная плотность (плотность транспортного потока);

v_f и k_c – критическая скорость и оптимальная плотность, при которых наблюдается максимальная интенсивность движения (т.е. достигается пропускная способность);

n, m, a – параметры калибровки моделей.

Сопоставление полученных регрессионных моделей (см. таблицу 2) и уравнений скорость-плотность (см. таблицу 3) позволяет сделать вывод, что для рассмотренных горизонтальных участков и полосы движения на спуск параметры потоков следует определять с использованием моделей Андервуда и Гриншильдса (таблица 4). Полученные результаты позволяют осуществлять оценку уровня обслуживания (коэффициента скорости) в каждый период агрегации данных как отношение текущего значения скорости к скорости потока в свободных условиях.

Полученные результаты (см. таблицы 1 и 2) позволяют сформулировать важный вывод. Модели первого порядка не всегда применимы, что демонстрируют данные, полученные для движения на подъём на участке а/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 (см. таблицу 1). Критерием необходимости применения мультирежимных моделей является невозможность качественной аппроксимации зависимости скорость-плотность одним уравнением регрессии на всем диапазоне значений плотности потока.

В публикациях Drake J.S., Schofer J.L. и May, A.D.¹¹, Easa S.M.¹², Romanowska A. и Jamroz K. [21], посвященных макроскопической диаграмме транспортного потока, мультирежимные модели рассматриваются как комбинации линейных и нелинейных моделей (рисунок 2).

⁹ Underwood, R.T. Speed, volume and density relationships. In Quality and Theory of traffic Flow. Bureau of Highway Traffic, Yale University: New Haven, CT, USA. 1960. pp. 141–188.

¹⁰ Castillo, J.M.D.; Benítez, F.G. On the functional form of the speed-density relationship—I: General theory. Transp. Res. Part B Methodol. 1995. 29. pp. 373–389.

¹¹ Drake J.S.; Schofer, J.L.; May, A.D. A statistical analysis of speed density hypotheses. Highw. Res. Rec. 1966. 154. pp. 53–87.

¹² Easa S.M. Selecting Two-Regime Traffic-Flow Models/ Transportation Research Record .1982. vol.869. pp. 25–36.

Таблица 3
Уравнения скорость-плотность моделей первого порядка
Источник: составлено авторами.

Table 3
Velocity-density equations for the first-order models
Source: compiled by the authors.

Модели	Уравнение скорость-плотность	Параметры модели
Greenshields	$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)$	v_f, k_j
Pipes	$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)^n$	v_f, k_j
Drew	$v = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^n\right]$	v_f, k_j, n
May – Keller	$v = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^{n \cdot m}\right]$	v_f, k_j, n, m
Greenberg	$v = v_f \ln \left(\frac{k_j}{k}\right)$	v_f, k_j
Underwood	$v = v_f \exp \left(-\frac{k}{k_c}\right)$	v_f, k_c
Northwestern	$v = v_f \exp \left[1 - \left(\frac{k}{k_j}\right)^2\right]$	v_f, k_j
Newell	$v = v_f \left\{1 - \exp \left[-\frac{a}{v_f} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_j}\right)\right]\right\}$	v_f, k_j, a

Таблица 4
Уравнения скорость-плотность моделей первого порядка
Источник: составлено авторами.

Table 4
Velocity-density equations for the first-order models
Source: compiled by the authors.

Участок	Параметры потока	Уравнение скорость-плотность	Уравнение интенсивность-плотность	Уровень обслуживания
Култукский тракт, ост. Луговое Горизонтальный участок	$v_f=62,65$ $k_j=76,68$	$v = 62,648 - 0,8173 k$	$q = k (62,648 - 0,8173 k)$	$\frac{v}{62,65}$
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» Примыкание СНТ «Мечта». Горизонтальный участок	$v_f=62,02$ $k_c=28,57$	$v = 69,024e^{-0,035k}$	$q = k 69,024e^{-0,035k}$	$\frac{v}{62,02}$
А/д «Иркутск – Усть-Ордынский» 6+900 Полоса на спуск, отделенная сплошной разметкой	$v_f=86,48$ $k=28,57$	$v = 86,482e^{-0,02k}$	$q = k 86,482e^{-0,02k}$	$\frac{v}{86,65}$

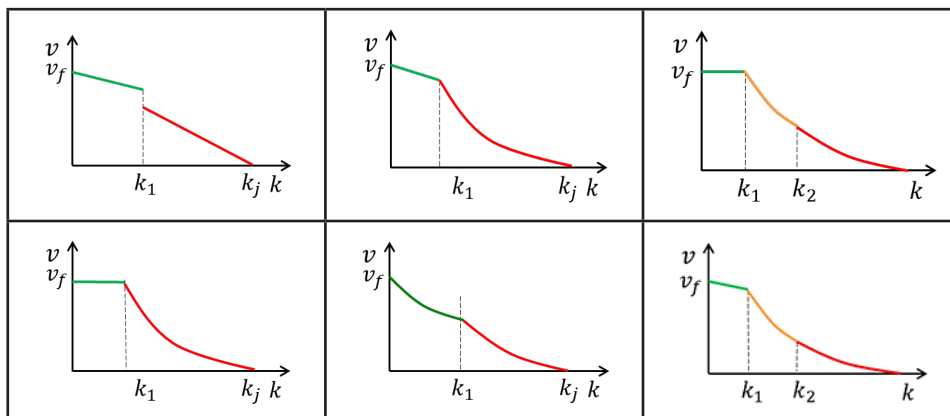


Рисунок 2 – Мультирежимные зависимости скорость-плотность: k_1 и k_2 – значения плотности, при которых происходит изменение режима движения потока
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Multi-regime speed-density models: k_1 and k_2 – critical density values for the traffic flow regime change
 Source: compiled by the authors.

Таблица 5
 Мультирежимные модели скорость-плотность
 Источник: Wang H., Chen Q-Y., Ni D. [22].

Table 5
 Multi-regime speed-density models
 Source: Wang H., Chen Q-Y., Ni D. [22].

Мультирежимные модели	Состояние потока / режим движения		
	Свободный поток	Транзитное состояние	Напряженный поток
Edie model	$v = 54,9 \ln e^{\left(\frac{-k}{163,9}\right)} (k \leq 50)$...	$v = 26,8 \ln\left(\frac{145,5}{k}\right) (k \geq 0,35)$
Линейная модель с двумя режимами	$v = 60,9 - 0,51k (k \leq 65)$...	$v = 40,0 - 0,265k (k \geq 0,65)$
Modified Greenberg model	$v = 48k (k \leq 35)$...	$v = 32 \ln\left(\frac{145,5}{k}\right) (k \geq 0,35)$
Линейная модель с тремя режимами	$v = 50,0 - 0,098k (k \leq 40)$	$v = 81,4 - 0,91k (40 \leq k \leq 65)$	$v = 40,0 - 0,265k (k \geq 0,65)$

Анализ литературы по тематике исследования Sun L., Zhou J.¹³, Wang H. и др. [22] показал, что для определения уравнений и значений плотности, при которых происходит изменения режима движения потока, используется кластерный анализ. Пример оценки двух- и трехрежимных зависимостей скорость-плотность, полученных при исследовании транспортных потоков на магистральных дорогах США, [22] представлен в таблице 2.

Сравнение таблиц 2 и 4 позволяет отметить, что в исследовании Wang H., Chen Q-Y., Ni D. [22] в двух случаях применена линейная мо-

дель Гриншильдса, которая показала достаточно высокое качество аппроксимации данных мониторинга горизонтальных участков и полосы движения на спуск (таблица 5). Вместе с тем модель Гринберга, применённая в двухрежимной модели (Modified Greenberg), во всех трех случаях, рассмотренных в таблице 2, имеет наименьшие значения коэффициента детерминации. Это позволяет делать вывод, что при рассмотрении данных о движении транспортных потоков на двухполосных дорогах и магистральных многополосных дорогах могут получаться разные макроэкономические модели.

¹³ Sun, L., Zhou, J., Development of multiregime speed-density relationships by cluster analysis. Transportation Research Record. 2005. 1934. pp. 64–71.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшим результатом этого этапа исследований является установленный факт, что при выполнении мониторинга возникает необходимость применения как моделей первого порядка, так и многорежимных моделей. Критерием необходимости применения мультимодальных моделей является невозможность аппроксимации зависимости скорость-плотность одним уравнением регрессии на всем диапазоне значений плотности потока.

На последующих этапах исследований предстоит:

- установить эмпирические зависимости между средней временной скоростью и средней пространственной скоростью;
- выполнить с применением кластерного анализа обработку примеров данных, которые не аппроксимируются моделями первого порядка;
- оценить влияние длительности периода агрегации (5, 10 и 15 мин) на качество аппроксимации данных, поступающих с детекторов;
- определить репрезентативный объем выборки (данные за сутки, данные за неделю, данные за месяц), обеспечивающий статистически надежную оценку зависимостей, входящих в состав моделей первого порядка и мультимодальных моделей;
- оценить влияние погодных условий на параметры транспортного потока: скорость потока в свободных условиях, критические скорость и плотность потока.

Решение перечисленных выше задач позволит разработать практические рекомендации по выполнению мониторинга транспортных потоков с применением радиолокационных детекторов.

Представляется важным осуществлять централизованное накопление и систематизацию данных мониторинга с использованием детекторов транспорта. Это позволит на основе актуальных данных разрабатывать на федеральном уровне методические документы в области оценки пропускной способности автомобильных дорог общего пользования и улично-дорожных сетей городов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зырянов В.В. Особенности применения основной диаграммы транспортного потока на сетевом уровне // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. Волгоградский государственный технический университет. 2013. С. 71–74. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20901102>.
2. Zyryanov V.V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066049
3. Цзянг Х. Оптимизация дорожного движения на основе макроскопической фундаментальной диаграммы в городской двухзональной системе // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 246–257. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257
4. Михайлов А.Ю., Тараховский И.И. Оценка скорости транспортного потока в свободных условиях на основе данных, поступающих от стационарного радиолокационного детектора // Вестник гражданских инженеров. 2025. 5(112). С. 98–110. DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-5-98-110
5. Тараховский И.И., Михайлов А.Ю. Оценка параметров модели Андервуда с использованием данных радиолокационного детектора транспорта // Транспорт Урала. 2025. 4 (87). С. 79–84. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-79-84
6. Cerner B. Three-Phase Traffic Theory and Highway Capacity // Physica A Statistical Mechanics and its Applications. 2004. 333 (1). pp. 379-440 DOI: 10.1016/j.physa.2003.10.017
7. Treiber M., Kesting A., Helbing D. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts // Transportation Research Part B: Methodological. 2010. 44(8-9). pp. 983-1000. DOI: 10.1016/j.trb.2010.03.004
8. Delle Monache M.L. Chi K.; Chen Y.; Goatin P.; Han K.; Qiu J.; Piccoli B. A Three-Phase Fundamental Diagram from Three-Dimensional Traffic Data // Axioms 2021, 10. 17. DOI: 10.3390/axioms10010017
9. Knoop V., Hoogendoorn S., Van Zuylen H. Empirical differences between time mean speed and space mean speed // Conference proceedings: Traffic and Granular Flow 07. 2007. pp. 351-356.
10. Han J., Polak J.W., Barria J., Krishnan R. On the estimation of space-mean-speed from inductive loop detector data // Transport. Plann. Tech. 2013. 3(1). pp. 91–104. DOI: 10.1080/03081060903429421.
11. Rakha H., Arafeh M. Calibrating steady-state traffic stream and car-following models using loop detector data // Transp. Sci. 2010. 44. pp.151–168.
12. Jovanovi B., Ševrovi M., Luburi G. Comparative Analysis of Deterministic Fundamental Diagrams Representative of Continuous and Interrupted Traffic Flow on Selected Regional Road in Croatia // Appl. Sci. 2024. 14. 533. DOI: 10.3390/app14020533
13. Bian Z. et al. Two-lane highways: guidance for estimating speed-flow relationships and free-flow speeds from field data // Advances in Transportation Studies. 2025. LXVI. pp. 241-264.
14. Daganzo C. F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic // Transportation Research Part B: Methodological. 2008. 42(9). pp. 771 – 781. DOI: 10.1016/j.trb.2008.06.008
15. Zhong R. et al. Automatic calibration of fundamental diagram for first-order macroscopic freeway

traffic models // *Journal of Advanced Transportation* 2015. 50(3). pp. 363-385.

16. Gaddam H.K., Rao K.R. Speed–density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation // *J. Mod. Transport*. 2019. 27(1). pp. 61–74.

17. 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 Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022. 23., pp. 14104–14127.

18. Taylor N.B. Speed-density Equation Flow-density relationship // *Transportation Research Procedia* 2025. vol. 82. pp.3076–3095.

19. Liu Y. et al. A Flow-Speed Model for Motorways in England: Analysis Under Various Weather Conditions // *Atmosphere*. 2025. 16.117. 15 p. DOI: 10.3390/atmos16020117

20. Chen Y., Lu J. Research on traffic state prediction method based on traffic flow prediction under multi-time granularity // *Scientific Reports*. 2025. vol. 15. Article number: 24317. DOI: 10.1038/s41598-025-10267-9

21. Romanowska A., Jamroz K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment. // *Appl. Sci.* 2021. 11. 9914. DOI: 10.3390/app11219914

22. Wang H., Li, J. Chen Q.-Y., Ni D. Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship. // *Transportation Research. Part A*. 2011, 45, pp. 554–566. DOI: 10.1016/j.tra.2011.03.010

REFERENCES

1. Zyrjanov V.V. Osobennosti primeneniya osnovnoj diagrammy transportnogo potoka na setevom urovne [Features of the application of the main diagram of the traffic flow at the network level]. *Izvestiya volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: nazemnye transportnye sistemy. Volgogradskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet*. 2013: 71-74. (in Russ.) <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20901102>.

2. Zyryanov V.V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066049

3. Jiang Haiyan Optimizatsiya dorozhnogo dvizheniya na osnove makroskopicheckoy fundamental' noy diagrammy v gorodskoy dvukhzonol'noy sisteme [Traffic optimization based on a macroscopic fundamental diagram in urban bizonal system]. *Vestnik SibADI*. 2022. 19 (2). pp. 246-257. (in Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257

4. Mikhaylov A.Yu., Tarakhovskiy I.I. Otsenka skorosti transportnogo potoka v svobodnykh usloviyakh na osnove dannyykh, postupayushchikh ot stacionarnogo radiolokatsionnogo detektora [Estimation of the speed of traffic flow in free conditions based on data received from a stationary radar detector]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2025. 5 (112). C. 98-110. DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-5-98-110

5. Tarakhovskiy I.I., Mikhaylov A.Yu. Otsenka parametrov modeli andervuda s ispol'zovaniyem dannyykh radiolokatsionnogo detektora transporta [Estimation of the parameters of the Underwood model using data from a radar transport detector]. *Transport Urala*. 2025. 4 (87). C. 79-84. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-79-84

6. Cerner B. Three-Phase Traffic Theory and Highway Capacity. *Physica A Statistical Mechanics and its Applications*. 2004. 333 (1). pp. 379-440 DOI: 10.1016/j.physa.2003.10.017

7. Treiber M., Kesting A., Helbing D. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2010. 44(8-9). pp. 983-1000. DOI: 10.1016/j.trb.2010.03.004

8. Delle Monache M.L. Chi K.; Chen Y.; Goatin P.; Han K.; Qiu J.; Piccoli B. A Three-Phase Fundamental Diagram from Three-Dimensional Traffic Data. *Axioms* 2021, 10. 17. DOI: 10.3390/axioms10010017

9. Knoop V., Hoogendoorn S., Van Zuylen H. Empirical differences between time mean speed and space mean speed. *Conference proceedings: Traffic and Granular Flow 07*. 2007. pp. 351-356.

10. Han J., Polak J.W., Barria J., Krishnan R. On the estimation of space-mean-speed from inductive loop detector data. *Transport. Plann. Tech.* 2013. 3(1). pp. 91–104. DOI: 10.1080/03081060903429421

11. Rakha H.; Arafteh M. Calibrating steady-state traffic stream and car-following models using loop detector data. *Transp. Sci.* 2010. 44. pp.151–168.

12. Jovanovi B., Ševrovi M., Luburi G. Comparative Analysis of Deterministic Fundamental Diagrams Representative of Continuous and Interrupted Traffic Flow on Selected Regional Road in Croatia. *Appl. Sci.* 2024. 14. 533. DOI: 10.3390/app14020533

13. Bian Z. et al. Two-lane highways: guidance for estimating speed-flow relationships and free-flow speeds from field data. *Advances in Transportation Studies*. 2025. LXVI. pp. 241-264.

14. Daganzo C.F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2008. 42(9). pp. 771 – 781. DOI: 10.1016/j.trb.2008.06.008

15. Zhong R. et al. Automatic calibration of fundamental diagram for first-order macroscopic freeway traffic models. *Journal of Advanced Transportation* 2015. 50(3). pp. 363-385.

16. Gaddam H.K., Rao K.R. Speed–density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation. *J. Mod. Transport*. 2019. 27(1). pp. 61–74.

17. 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 Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022. 23., pp. 14104–14127.

18. Taylor N.B. Speed-density Equation Flow-density relationship. *Transportation Research Procedia* 2025. vol. 82. pp.3076–3095.

19. Liu Y. et al. A Flow-Speed Model for Motorways in England: Analysis Under Various Weather Conditions. *Atmosphere*. 2025. 16.117. 15 p. DOI: 10.3390/atmos16020117

20. Chen Y., Lu J. Research on traffic state prediction method based on traffic flow prediction under multi-time granularity. *Scientific Reports*. 2025. vol. 15. Article number: 24317. DOI: 10.1038/s41598-025-10267-9

21. Romanowska A., Jamroz, K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment. *Appl. Sci*. 2021. 11. 9914. DOI: 10.3390/app11219914

22. Wang H., Li, J. Chen Q.-Y., Ni D. Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship. *Transportation Research. Part A*. 2011, 45, pp. 554–566. DOI: 10.1016/j.tra.2011.03.010

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тараховский И.И. Сбор и обработка экспериментальных данных, подготовка текста статьи.

Михайлов А.Ю. Анализ литературы по тематике исследования, подготовка текста и научная редакция статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Tarakhovsky I.I. Collecting and processing experimental data, writing the manuscript.

Mikhailov A.Yu. State of the art analysis, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тараховский Игорь Игоревич – генеральный директор ООО «КВАНТ ИНЖИНИРИНГ» (664003, г. Иркутск, ул. Парковая, д.4, офис 1).

e-mail: igor@kvanteng.ru

Михайлов Александр Юрьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1946-0659>,

Scopus ID: 57193751842,

Author ID: 385530,

SPIN-код: 2498-7773,

e-mail: 89148701840@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tarakhovsky Igor I. – General Director, QUANT ENGINEERING LLC (664003, Irkutsk, st. Parkovaya, 4, office 1).

e-mail: igor@kvanteng.ru

Mikhailov Alexander Yu. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Automobile Transport Department, Irkutsk Scientific Research Technical University (Irkutsk, Lermontova st. 83).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1946-0659>,

Scopus ID: 57193751842,

Author ID: 385530,

SPIN-code: 2498-7773,

e-mail: 89148701840@mail.ru