

УДК 656.13.08:004.942

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-73-79

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
В КАЧЕСТВЕ ПОДВИЖНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ**

*д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ,
канд. техн. наук, доц. С.В. БОГДАНОВИЧ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Статья посвящена методологическому анализу использования транспортных средств, оснащенных приемниками спутниковой навигации в качестве подвижных датчиков (probe vehicle data, PVD) для мониторинга параметров дорожного движения. Рассмотрены требования к репрезентативности выборки, обработке траекторных данных, реконструкции макроскопических характеристик транспортного потока и оценке объема движения при неполных данных. Предложена схема интеграции PVD с компонентами интеллектуальных транспортных систем (ИТС) применительно к условиям дорожной сети Республики Беларусь. Обоснованы подходы к валидации данных и описаны ограничения метода. Показано, что переход к распределенному мониторингу на основе транспортного потока существенно изменяет функциональные требования к стационарной дорожной инфраструктуре.

Ключевые слова: *подвижные датчики (probe vehicle data), мониторинг дорожного движения, траекторные данные, интеллектуальные транспортные системы, транспортный поток, дорожная инфраструктура, Республика Беларусь.*

Введение. Мониторинг параметров дорожного движения на протяженных участках автомобильных дорог в течение длительного времени основывался на стационарных средствах учета: индуктивных петлях, радарных и ультразвуковых датчиках, системах автоматической видеофиксации [1]. Такие устройства обеспечивают высокую точность измерений в точке установки, однако их экономическая целесообразность резко снижается при необходимости контроля разреженных загородных сетей. Стоимость установки одного комплекта стационарного детектора на республиканских дорогах Беларуси с учетом подключения к каналам связи и электрообеспечения по данным РУП «Белдорсвязь» может достигать 10–15 тыс. EUR, что делает плотное покрытие экономически проблематичным.

Альтернативным подходом является использование транспортных средств, оснащенных приемниками глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), в качестве подвижных датчиков. Концепция probe vehicle data (PVD) предполагает, что каждое транспортное средство, передающее свои координаты и временные метки, становится элементом распределенной сенсорной сети [2]. При достаточной доле оснащенных транспортных средств в общем потоке, обозначаемой как уровень проникновения (penetration rate, PR), появляется возможность оценивать макроскопические параметры потока, таких как скорость, плотность, интенсивность. Однако переход от индивидуальных треков к характеристикам потока порождает ряд методологических проблем, не имеющих однозначных решений.

Цель настоящей статьи – систематизировать методологические следствия, возникающие при использовании PVD для мониторинга дорожного движения, и оценить применимость данного подхода к условиям дорожной сети Республики Беларусь. В работе рассмотрены требования к выборке, процедуры обработки траекторных данных, методы реконструкции параметров потока, а также вопросы интеграции PVD с существующими элементами интеллектуальных транспортных систем (ИТС).

Основная часть. Традиционный подход к мониторингу предполагает разделение на объект наблюдения (транспортный поток) и средство наблюдения (стационарный детектор). PVD-подход снимает это разделение, т.к. часть транспортного потока сама становится инструментом его описания. Такое преобразование имеет значимые последствия для теории и практики транспортного мониторинга.

Стационарный детектор подсчитывает число транспортных средств, пересекающих заданный створ, и измеряет их мгновенную скорость. Данные такого типа принято обозначать как эйлеровы (Eulerian) наблюдения [3]. Напротив, подвижный датчик перемещается вместе с потоком и генерирует лагранжеву (Lagrangian) траекторию – последовательность координат с привязкой ко времени. Различие между этими двумя типами данных носит не только терминологический, но и сущностный характер, поскольку позволяют непосредственно оценивать разные переменные фундаментальной диаграммы транспортного потока.

Эйлерово измерение напрямую дает интенсивность (q , авт./ч) и точечную скорость, тогда как плотность (k , авт./км) вычисляется косвенно. Лагранжево измерение, напротив, непосредственно характеризует пространственную скорость на участке, но не позволяет без дополнительных допущений определить объем или плотность потока. В этом состоит существенное методологическое ограничение PVD: для перехода от скоростей к полному набору макроскопических параметров необходимы дополнительные модельные предположения или внешние источники данных.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема, иллюстрирующая совместное функционирование стационарных датчиков, установленных на дорожных измерительных станциях (ДИС), и подвижных датчиков в составе транспортного потока. В условиях белорусских автомобильных дорог первоочередными источниками PVD могут стать коммерческий транспорт логистических компаний, междугородные автобусы и техника дорожных служб, уже оснащенные системами спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS [4]. По нашим оценкам, доля таких транспортных средств на республиканских дорогах составляет 5–12% от общего потока в зависимости от участка и времени суток.

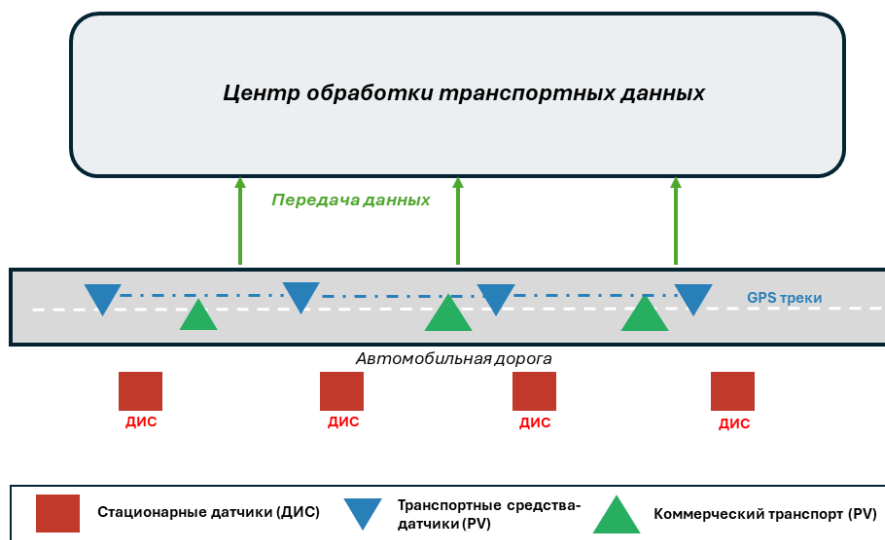


Рисунок 1. – Концептуальная схема транспортного потока как распределенной сенсорной сети

Достоверность оценок параметров потока, полученных на основе PVD, прямо зависит от уровня проникновения – доли оснащенных транспортных средств в общем потоке. Минимальный порог PR, обеспечивающий статистически приемлемое качество оценки средней пространственной скорости, по данным большинства исследований, составляет 2–5% [5]. При значениях ниже этого порога ошибка средней скорости на пятиминутном интервале агрегирования превышает 15–20%, что не подходит для задач управления в реальном времени.

Проблема усложняется тем, что распределение оснащенных транспортных средств в потоке не является равномерным. Коммерческий транспорт в основном использует определенные маршруты и временные окна. Легковые автомобили с навигационными приложениями формируют другую пространственно-временную структуру покрытия. Систематическое смещение выборки (sample bias) – фундаментальная проблема PVD-подхода. Грузовые транспортные средства движутся медленнее легкового потока, что приводит к занижению оценки средней скорости при их преобладании в выборке. Для коррекции необходима информация о структуре потока по категориям транспортных средств – данные, которые сами по себе требуют дополнительных источников [6].

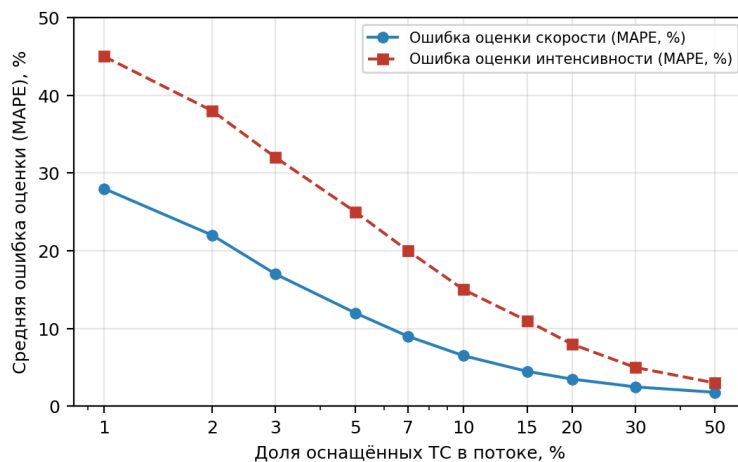


Рисунок 2. – Зависимость ошибки оценки параметров потока от уровня проникновения PVD (составлено авторами по данным [5; 6])

На рисунке 2 показана типичная иллюстративная зависимость ошибки оценки скорости и интенсивности от уровня проникновения PVD. Оценка интенсивности имеет более высокую чувствительность к PR: даже при 10% оснащенных ТС средняя ошибка остается в пределах 15%. Для скорости аналогичный уровень точности достигается уже при PR = 3–5%. Данная закономерность обусловлена тем, что интенсивность является производной от плотности и скорости, а обе переменные оцениваются с собственной погрешностью, которая увеличивается при переходе к производным параметрам.

В таблице 1 систематизированы характеристики четырех основных источников данных о транспортном потоке. PVD принципиально отличается от стационарных детекторов по типу наблюдения, охвату и набору непосредственно измеряемых параметров. Основным преимуществом PVD является непрерывный пространственный охват при низкой удельной стоимости на километр контролируемой сети. Однако зависимость от уровня проникновения и невозможность прямого измерения интенсивности ограничивают самостоятельное применение метода.

Таблица 1. – Сравнительные характеристики источников данных о транспортном потоке

Характеристика	Индуктивные петли	Радары	Видеодетекторы	PVD
Тип наблюдения	Эйлерово	Эйлерово	Эйлерово	Лагранжево
Пространственный охват	Точечный	Зональный (до 250 м)	Зональный (до 100 м)	Непрерывный (весь маршрут)
Измеряемые параметры	q, v	q, v	q, v , класс ТС	v , время в пути, траектория
Зависимость от PR	Нет	Нет	Нет	Да ($\geq 2-5\%$)
Стоимость на 1 км покрытия	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая

Траекторные данные, поступающие от бортовых ГНСС-приемников, содержат последовательность записей вида (φ, λ, t) , где φ и λ – географические координаты, t – временная метка. Частота записи варьируется от 1 до 60 с в зависимости от настроек терминала и оператора мониторинга. Преобразование этих сырых данных в параметры транспортного потока требует нескольких последовательных этапов обработки, представленных на рисунке 3.

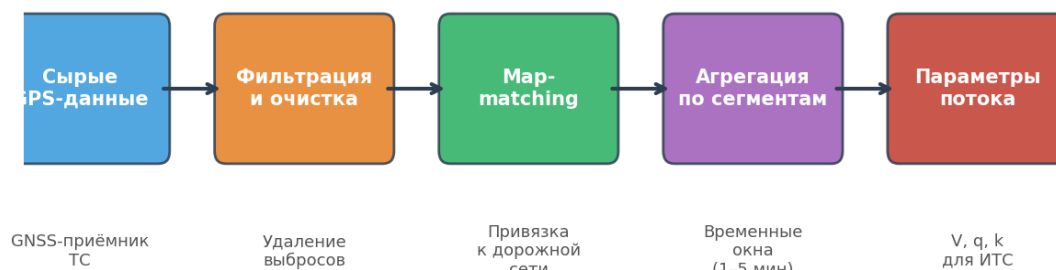


Рисунок 3. – Конвейер обработки траекторных данных для получения параметров потока

Первый этап – фильтрация и очистка данных. Навигационные данные содержат ошибки позиционирования, обусловленные многолучевым распространением сигнала в условиях городской застройки или лесных массивов, временной потерей связи со спутниками, аппаратными сбоями терминалов. Типичная процедура включает удаление записей с аномальными скачками координат (более 200 м за один интервал при частоте 1 Гц), фильтрацию по допустимому диапазону скоростей (0–200 км/ч для автомобильных дорог) и медианное сглаживание для устранения высокочастотного шума [7].

Второй этап – привязка к дорожной сети (map-matching). Координаты ГНСС-приемника не совпадают точно с осью дороги; ошибка позиционирования составляет 3–15 м для одночастотных приемников. Алгоритмы привязки проецируют каждую точку траектории на ближайший сегмент дорожного графа с учетом топологии сети, направления движения и предыстории трека. Наибольшее распространение получили вероятностные методы на основе скрытых марковских моделей (Hidden Markov Model, HMM), обеспечивающие точность привязки 95–98% на развитых дорожных сетях [8]. Для условий Беларуси, где дорожный граф на большинстве дорог существенно менее плотный, чем в западноевропейских странах, задача привязки упрощается: на загородных участках альтернативные параллельные маршруты, как правило, отсутствуют.

Третий этап – агрегация по пространственно-временным сегментам. Привязанные треки разбиваются по сегментам дорожной сети фиксированной длины (обычно 0,5–2,0 км) и временным окнам (1–5 мин). Для каждой ячейки «сегмент × интервал» рассчитываются агрегированные показатели: средняя пространственная ско-

рость (space-mean speed), дисперсия скоростей, число наблюдений. Средняя пространственная скорость определяется как

$$\bar{V}_s = L / (1/n \cdot \sum_i t_i), \quad (1)$$

где L – длина сегмента, км;

t_i – время прохождения сегмента i -м транспортным средством, ч;

n – число наблюдений в данном пространственно-временном окне.

Данная формула соответствует гармоническому среднему индивидуальных скоростей и является корректной оценкой именно пространственной, а не временной средней скорости, что имеет значение для макро-скопического описания потока [9].

Непосредственное измерение интенсивности (q) и плотности (k) по данным PVD требует дополнительных предположений. Подвижный датчик «видит» только собственную траекторию; он не подсчитывает транспортные средства, пересекающие створ. Для перехода к этим параметрам используется несколько подходов, каждый из которых основан на определенных допущениях о характере потока.

Первый подход предполагает использование фундаментального соотношения транспортного потока:

$$q = k \cdot \bar{V}_s. \quad (2)$$

Если средняя пространственная скорость $\bar{V}_s$ получена из PVD, а плотность k оценена с помощью модели (например, модели Гриншилдса $k = k_j(1 - \bar{V}_s/V_f)$, где k_j – плотность затора, V_f – скорость свободного потока), то интенсивность может быть рассчитана аналитически. Данный метод применим при наличии предварительно откалиброванной фундаментальной диаграммы для конкретного участка дороги [10].

На рисунке 4 сопоставлены модели Гриншилдса и Андервуда с точечными оценками, полученными по PVD. Рассеяние наблюдений обусловлено ограниченным числом подвижных датчиков и стохастическим характером потока. В области свободного движения ($k < 30$ авт./км) обе модели дают близкие результаты, а расхождения нарастают при переходе к насыщенным и заторовым режимам, где модель Гриншилдса систематически завышает скорость.

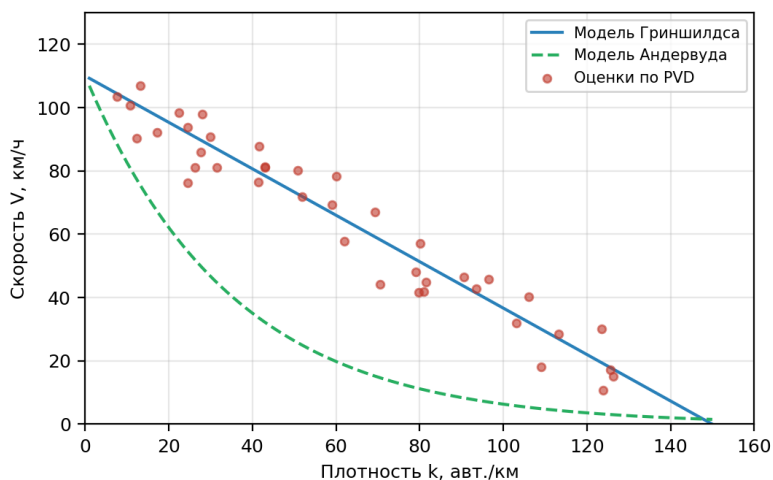


Рисунок 4. – Фундаментальная диаграмма «скорость — плотность»: модели и оценки по PVD (составлено авторами по данным [10; 12])

Второй подход основан на оценке плотности через долю времени занятости сегмента (оccupancy), восстанавливаемую из числа подвижных датчиков, одновременно находящихся на сегменте:

$$\hat{k} = n_{obs} / (PR \cdot L), \quad (3)$$

где n_{obs} – число подвижных датчиков на сегменте длиной L в данный момент времени;

PR – уровень проникновения.

Точность данной оценки критически зависит от знания PR , которое само по себе является неизвестной и нестационарной величиной. Ряд авторов предлагает адаптивные методы оценки PR путем сопоставления PVD с данными стационарных детекторов в точках их совместного наличия [11].

Практическое применение PVD в составе ИТС требует решения задачи интеграции с существующими подсистемами: управления динамическими информационными табло (VMS), навигационными сервисами, центрами управления дорожным движением (ЦУДД). В условиях Республики Беларусь эта задача имеет свою специфику, обусловленную разреженностью стационарной инфраструктуры и преобладанием двухполосных дорог в сети республиканских автомобильных дорог.

На рисунке 5 представлена предлагаемая архитектура интеграции. Платформа обработки PVD получает данные от ГЛОНАСС-трекеров транспортных средств, дорожных метеостанций и ГИС дорожной сети. Выходные данные передаются в три канала: динамические табло VMS, навигационные сервисы через API (в форматах DATEX II или TPEG) и центр управления дорожным движением.



Рисунок 5. – Схема интеграции PVD с компонентами ИТС

Для управления VMS на загородных магистралях данные PVD используются для автоматического формирования предупреждающих сообщений. Алгоритм обнаружения аномалий сравнивает текущую среднюю скорость на сегменте с базовым профилем, описывающим нормальное поведение потока для данного времени суток, дня недели и сезона [4]. Отклонение, превышающее установленный порог (например, снижение скорости более чем на 40% от базового значения), классифицируется как аномалия и генерирует управляющее воздействие. Формально условие активации может быть записано:

$$\Delta V = (V_{base} - \bar{V}_s) / V_{base} > \theta, \quad (4)$$

где V_{base} – базовая скорость для данного пространственно-временного контекста;

θ – пороговое значение (обычно 0,3–0,5). Выбор порога определяет баланс между чувствительностью обнаружения и долей ложных срабатываний.

В таблице 2 систематизированы четыре основных сценария использования PVD для целей управления дорожным движением. Каждый сценарий предполагает сочетание PVD с данными других источников, что подтверждает тезис о том, что PVD не заменяет стационарную инфраструктуру мониторинга, а дополняет ее, формируя гибридную систему с расширенными функциональными возможностями.

Таблица 2. – Сценарии использования PVD в системе управления дорожным движением

Сценарий	Входные данные PVD	Дополнительные источники	Управляющее воздействие
Обнаружение инцидента	Снижение $\bar{V}_s$ на сегменте	Видеокамеры (верификация)	VMS: предупреждение, объезд
Прогноз гололеда	Данные ESP/ABS от подключенных ТС	Метеостанции, прогноз погоды	VMS: ограничение скорости
Оценка времени в пути	Средняя $\bar{V}_s$ по маршруту	–	Навигационный сервис (API)
Мониторинг состояния покрытия	Акселерометры ТС	PMS, ГИС	Планирование ремонтных работ

Достоверность PVD определяется совокупностью факторов: точностью навигационного позиционирования, частотой передачи данных, корректностью алгоритмов привязки и агрегации. Для систематической оценки качества данных целесообразно использовать многоуровневую модель, включающую валидацию на уровне отдельного трека (микроуровень), агрегированных параметров сегмента (мезоуровень) и показателей сети в целом (макроуровень) [12].

На микроуровне проверяется целостность и физическая правдоподобность индивидуального трека: отсутствие разрывов, соответствие скоростей допустимому диапазону, согласованность последовательных точек по направлению и расстоянию. На мезоуровне агрегированные оценки скорости и времени в пути сопоставляются

с данными стационарных детекторов в точках их наличия. Стандартная процедура предусматривает расчет средней абсолютной процентной ошибки (MAPE):

$$MAPE = (1/n) \cdot \sum_i |V_{pv,i} - V_{ref,i}| / V_{ref,i} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $V_{pv,i}$ – оценка скорости по PVD;

$V_{ref,i}$ – эталонное значение от стационарного детектора;

n – число сопоставляемых наблюдений.

Приемлемым уровнем MAPE для скорости считается 10–15% при пятиминутном интервале агрегирования [13].

Отдельную проблему составляет стандартизация данных. В Республике Беларусь отсутствуют специализированные стандарты на формат и качество PVD. Целесообразно ориентироваться на международные стандарты ISO/TS 19468¹ (определение методов мониторинга трафика) и DATEX II² (обмен данными между системами управления) как базовые рамочные документы для формирования национальных требований.

Переход к мониторингу на основе PVD не означает полного отказа от стационарных детекторов. Однако их функция в этом случае меняется: из основного источника данных о потоке они становятся средством калибровки и валидации данных, полученных от подвижных датчиков. Стационарный детектор в такой архитектуре – не единственный источник данных, а опорная точка системы, обеспечивающая привязку «плавающих» оценок PVD к абсолютным значениям интенсивности и плотности [14].

Для условий Республики Беларусь это означает пересмотр стратегии размещения стационарных постов контроля. Вместо стремления к равномерному покрытию, нерентабельному для протяженной дорожной сети, может быть применен принцип «опорных сечений» (anchor cross-sections). Опорные сечения устанавливаются в местах с характерными изменениями параметров потока: на въездах и выездах из населенных пунктов, в зонах примыканий и развязок, на границах участков с различной пропускной способностью. Расстояние между опорными сечениями может составлять 20–50 км при условии, что уровень проникновения PVD на промежуточных участках не опускается ниже 3–5%.

Дорожные метеостанции при этом сохраняют самостоятельную роль, поскольку данные о температуре покрытия, влажности, видимости и наличии осадков не могут быть получены из PVD с достаточной точностью. Вместе с тем перспективным направлением является использование данных бортовых систем транспортных средств (срабатывание систем ABS, ESP, активация стеклоочистителей) как косвенных индикаторов дорожных условий. Такая информация, поступающая от «подключенных» транспортных средств (connected vehicles), расширяет спектр отслеживаемых параметров без увеличения числа стационарных датчиков [4].

Также чрезвычайно перспективным и более простым методом получения актуальной информации о состоянии покрытия представляется оснащение автомобилей дорожных служб мониторами состояния дороги, например таких, как RCM411 [15].

Методологические ограничения PVD-подхода целесообразно разделить на четыре группы. Первая связана с нестационарностью уровня проникновения: PR изменяется во времени и пространстве, и его текущее значение, как правило, неизвестно. Вторая группа ограничений обусловлена систематическим смещением выборки: структура подвижных датчиков (преобладание грузовых ТС, междугородних автобусов) отличается от структуры общего потока. Третья группа связана с невозможностью прямого измерения интенсивности и плотности без дополнительных модельных предположений. Четвертая – с вопросами конфиденциальности и правового регулирования сбора и передачи геолокационных данных транспортных средств.

Среди перспективных направлений исследований для условий Республики Беларусь выделим оценку фактического уровня проникновения PVD на основных маршрутах республиканской дорожной сети; разработку алгоритмов коррекции смещения выборки с учетом структуры потока на двухполосных дорогах; создание методики размещения опорных сечений, оптимизирующей суммарную точность оценки параметров потока при заданном бюджете на стационарную инфраструктуру; интеграцию PVD с данными системы взимания платы за проезд (BelToll), уже обеспечивающей пространственный охват основных республиканских магистралей³.

Заключение. Использование транспортных средств в качестве подвижных датчиков порождает комплекс методологических следствий, затрагивающих все этапы транспортного мониторинга – от сбора данных

¹ ISO/TS 19468:2019 Intelligent transport systems – Data interfaces between centres for transport information and control systems – Platform-independent model specifications for data exchange protocols for transport information and control systems. – Geneva: ISO, 2019. – 120 p.

² EN 16157-1:2018. Intelligent transport systems – DATEX II data exchange specifications for traffic management and information – Part 1: Context and framework = Интеллектуальные транспортные системы. Спецификации обмена данными DATEX II для управления дорожным движением и информирования. Часть 1. Контекст и общая структура. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2018. – 50 p.

³ О некоторых вопросах функционирования электронной системы сбора платы за проезд транспортных средств по отдельным автомобильным дорогам Республики Беларусь: Указ Президента Республики Беларусь, 27 сент. 2012 г., № 426 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2012. – 1/13874.

до принятия управленческих решений. Лагранжев характер PVD-измерений обеспечивает непрерывный пространственный охват при низких затратах, но одновременно ограничивает перечень непосредственно измеряемых параметров, исключая прямую оценку интенсивности и плотности потока.

Для условий Республики Беларусь переход к распределенному мониторингу на основе PVD представляется обоснованным в силу значительной протяженности и разреженности дорожной сети, наличия массива коммерческого транспорта, оснащенного системами ГЛОНАСС/GPS, и высокой стоимости развертывания стационарных детекторов. При этом PVD не может рассматриваться как полная замена стационарной инфраструктуры; оптимальным является гибридный подход, при котором стационарные посты выполняют функцию опорных калибровочных сечений, а PVD обеспечивает пространственную интерполяцию параметров потока между ними.

Внедрение PVD в практику управления дорожным движением требует решения ряда нормативно-методических задач: утверждения требований к качеству и формату данных, разработки процедур валидации, определения минимально допустимого уровня проникновения для различных типов дорог и сценариев управления. Формирование такой нормативной базы на национальном уровне с учетом международных стандартов ISO и DATEX II является необходимым условием для масштабного практического применения рассмотренного подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Martin P. T., Feng Y., Wang X. Detector technology evaluation. – Utah: University of Utah, 2003. – 132 p.
2. Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: the Mobile Century field experiment / J. C. Herrera, D. B. Work, R. Herring et al. // Transportation Research Part C. – 2010. – Vol. 18, No. 4. – P. 568–583.
3. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1952. – Vol. 1, No. 3. – P. 325–362.
4. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
5. Srinivasan K.K., Jovanis P.P. Determination of number of probe vehicles required for reliable travel time measurement in urban network // Transportation Research Record. – 1996. – No. 1537. – P. 15–22. DOI: 10.3141/1537-03
6. Jenelius E., Koutsopoulos H. N. Probe vehicle data sampled by time or space: consistent travel time allocation and estimation // Transportation Research Part B. – 2015. – Vol. 71. – P. 120–137. DOI: 10.1016/j.trb.2014.10.008
7. Qudus M. A., Ochieng W. Y., Noland R. B. Current map-matching algorithms for transport applications: state-of-the art and future research directions // Transportation Research Part C. – 2007. – Vol. 15, No. 5. – P. 312–328. DOI: 10.1016/j.trc.2007.05.002
8. Newson P., Krumm J. Hidden Markov map matching through noise and sparseness // Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL. – 2009. – P. 336–343. DOI: 10.1145/1653771.1653818
9. Edie L. C. Discussion of traffic stream measurements and definitions // Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow / London (25–27 June 1963). – P. 139–154.
10. Greenshields B. D. A study of traffic capacity // Proceedings of the Highway Research Board. – 1935. – Vol. 14. – P. 448–477.
11. Floating car data adaptive traffic signals: a description of the first real-time experiment with «connected» vehicles / V. Astarita, V. P. Giofre, D. C. Festa et al. // Electronics. – 2020. – Vol. 9, No. 1. – Art. 114. DOI: 10.3390/electronics9010114
12. A traffic model for velocity data assimilation / D. B. Work, S. Blandina, O.-P. Tossavainen et al. // Applied Mathematics Research eXpress. – 2010. – No. 1. – P. 1–35. DOI: 10.1093/amrx/abq002
13. Zheng F., Zuylen H. Van. Urban link travel time estimation based on sparse probe vehicle data // Transportation Research, Part C. – 2013. – Vol. 31. – P. 145–157. DOI: 10.1016/j.trc.2012.04.007
14. Leduc G. Road traffic data: collection methods and applications // JRC Technical Notes. – Luxembourg: European Commission, 2008. – 55 p.
15. Brustad T. F., Pedersen A., Bang B. A field study of sensors for winter road assessment // Transportation Research. Interdisciplinary Perspectives. – 2020. – Vol. 7(6). – 100206. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100206

Поступила 05.07.2026

METHODOLOGICAL IMPLICATIONS OF USING VEHICLES AS MOBILE SENSORS FOR TRAFFIC MONITORING

D. KAPSKI, S. BOGDANOVICH
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article provides a methodological analysis of using vehicles equipped with satellite navigation receivers as mobile sensors (probe vehicle data, PVD) for traffic monitoring. Requirements for sample representativeness, trajectory data processing, macroscopic traffic flow reconstruction, and volume estimation under incomplete data are examined. A PVD integration framework with intelligent transportation system (ITS) components adapted to the road network of the Republic of Belarus is proposed. Approaches to data validation are substantiated and method limitations are described. It is shown that the transition to distributed monitoring based on traffic flow fundamentally alters functional requirements for stationary road infrastructure.

Keywords: probe vehicles, probe vehicle data, traffic monitoring, trajectory data, intelligent transportation systems, traffic flow, road infrastructure, Republic of Belarus.