

УДК 004.94:656
DOI

ПРЕДИКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Финогеев А.А., Майоров Р.С., Деев М.В.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», Пенза,
e-mail: fanton3@yandex.ru, miqz@yandex.ru, miqz@yandex.ru

Целью работы является моделирование и предиктивный анализ процесса движения общественного транспорта по городским автомагистралям с учетом транспортной загруженности участков дорог в различные периоды времени. Для достижения цели решается задача прогностической оценки, расчета и корректировки времени прибытия общественного транспорта на промежуточные и конечные точки своих маршрутов в условиях городской среды с учетом динамики изменения транспортных и пешеходных потоков, времени проездов регулируемых и нерегулируемых перекрестков и других факторов. В результате исследований разработана методика и программное приложение для анализа движения транспортных средств и прогностической оценки их средней скорости движения на участках маршрута с учетом различных факторов и корректировки прогнозируемого времени прибытия в зависимости от текущих условий дорожного движения. Целью является повышение точности прогноза времени прибытия транспортных средств на заданные точки остановок по маршрутам следования. Критерием эффективности является среднее абсолютное отклонение прогнозного времени прибытия транспорта на промежуточные и конечные точки маршрутов от реального в условиях текущей дорожной обстановки. Программное предложение предназначено для прогнозирования и корректировки времени движения общественного транспорта по маршруту.

Ключевые слова: GPS данные, прогноз времени прибытия, средняя скорость движения, среднее время проезда, общественный транспорт, маршрут

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10087).

PREDICTIVE MODELING AND TIMING PUBLIC TRANSPORT TRAFFIC

Finogeev A.A., Mayorov R.S., Deev M.V.

Penza State University, Penza, e-mail: fanton3@yandex.ru, miqz@yandex.ru, miqz@yandex.ru

The purpose of the work is to model and predictively analyze the process of public transport movement along urban highways, taking into account the traffic congestion of road sections at different periods of time. To achieve the goal, the problem of predictive assessment, calculation and adjustment of the arrival time of public transport at intermediate and final points of its routes in an urban environment is solved, taking into account the dynamics of changes in transport and pedestrian flows, travel times at controlled and unregulated intersections and other factors. As a result of the research, a methodology and software application was developed for analyzing the movement of vehicles and predicting their average speed on sections of the route, taking into account various factors and adjusting the predicted time of arrival depending on current traffic conditions. The goal is to increase the accuracy of forecasting the time of arrival of vehicles at given stopping points along the routes. The efficiency criterion is the average absolute deviation of the predicted time of arrival of transport at intermediate and final points of routes from the actual one under the current traffic situation. The software proposal is designed to predict and adjust the travel time of public transport along the route.

Keywords: GPS data, arrival time forecast, average speed, average travel time, public transport, route

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 20-71-10087).

В современных городских условиях управление движением общественного транспорта (ОТ) становится одним из важных аспектов повседневной жизни. С увеличением мобильности населения и развитием городской инфраструктуры возникает необходимость в инновационных подходах к оптимизации графиков движения транспортных средств. В работе исследуются вопросы разработки методики прогностического моделирования и расчета параметров движения ОТ. Скорость движения ОТ в городской среде зависит от загруженности городских автомагистралей, от средней скорости движения транспортных средств (ТС),

от дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на маршруте следования, от работы светофорных объектов. Основной задачей является анализ загруженности участков дорог на маршрутах следования ОТ с целью регулирования его движения, прогнозирования времени прибытия на промежуточные и конечные точки маршрута. Решение задачи необходимо для автоматизации процессов диспетчерского управления транспортными потоками в городской среде с возможностью оперативного информирования пассажиров на остановочных пунктах о времени возможного ожидания ОТ. Целью исследования является разработка

модели и методики прогностического моделирования и коррекции времени прибытия городского транспорта на остановки на основе сбора и анализа GPS данных. Для достижения цели решаются задачи: а) анализ факторов влияния на скоростные и временные параметры движения ОТ, б) синтез модели прогнозирования, в) разработка методики расчета скоростных и временных параметров движения транспорта с учетом влияния факторов, г) разработка приложения для реализации методики, д) оценка точности моделирования и корректировка времени прибытия транспорта.

Разработанная методика предназначена для повышения эффективности работы организаций, занимающихся диспетчерским управлением и обслуживанием городского ОТ. В настоящее время важной задачей является улучшение методов и средств диспетчерского управления процессами движения ОТ. В частности, к таким организациям относится городской диспетчерский центр управления пассажирским транспортом. Современные системы диспетчерского управления транспортом должны выполнять следующие функции: автоматический сбор GPS данных о местонахождении транспортного средства, автоматическое представление данных о сбоях и отклонениях от расписания движения транспорта, контроль управляющих воздействий системы управления для коррекции и стабилизации процессов движения, обеспечение связи диспетчера с водителями, визуализация местоположения ОТ на карте и схемы движения в режиме реального времени, уведомление пассажиров о движении единиц ОТ, оперативное определение возникновения различных ситуаций и ДТП и т.д. Основной задачей является обеспечение диспетчеров и пассажиров оперативной и максимально точной информацией о текущем положении единиц ОТ для точного расчета времени его прибытия на промежуточные и конечные точки маршрута. В настоящее время есть три базовых модели диспетчерского управления пассажирским транспортом: релейная, псевдоимпульсная и импульсная (цифровая) модели. В случае релейной модели информация о положении ТС обрабатывается после его прибытия на промежуточный или конечный контрольный пункт. Эта модель используется в традиционных автоматизированных системах диспетчерского управления. Псевдоимпульсная модель используется в радионавигационных системах диспетчерского управления, когда информация поступает с заданной периодичностью и используется для отображения ТС на карте. В цифровой модели на-

вигационная информация обрабатывается и используется для определения местоположения ТС на маршруте. Для повышения эффективности работы цифровой модели диспетчерского управления и предназначена предлагаемая методика прогностического моделирования времени движения единиц ОТ, а также для оперативного оповещения пассажиров о времени ожидания. Решение проблем совершенствования диспетчерского управления ОТ относится к задачам развития современных организационных систем.

Материалы и методы исследования

Большинство методов определения интервалов движения и времени прибытия ОТ на промежуточные и конечные точки маршрутов следования работают на основе технологии GPS трекинга. GPS модуль в режиме реального времени представляет информацию о местоположении ТС, что позволяет предсказывать его местоположение в следующие моменты времени. Задача максимально точного прогнозирования времени прибытия ТС на промежуточную или в конечную точку маршрута следования сводится к оценке ожидаемого времени в пути между выбранными точками, так, чтобы оно наиболее точно соответствовало реальному времени прибытия. Существует несколько подходов к прогнозированию времени прибытия ТС. К ним относятся метод прогноза на основе архивных данных [1], мониторинг GPS данных в реальном времени [2], методика прогноза на основе статистического анализа [3], методы с использованием технологий машинного обучения [4] на основе опорных векторов [5], фильтрации Калмана [6], нейронных сетей [7] и т.д. Метод прогноза по архивным данным позволяет предсказывать время движения в определенный период дня посредством расчета среднего времени проезда участка другими ТС в тот же период за предыдущие дни [8]. Метод с использованием GPS данных прогнозирует прибытие транспорта, опираясь на его текущее положение и скорость. Статистические подходы в основном используют регрессионные модели для прогнозирования времени прибытия транспорта. Метод машинного обучения с использованием опорных векторов требует временных и вычислительных затрат на обучение модели прогноза времени прибытия. Применение нейронных сетей позволяет учесть нелинейные взаимосвязи между разными факторами, оказывающими существенное влияние при прогнозировании времени прибытия [9]. Однако этот метод также требует обучения, подбора входных переменных и обладает вычислительной сложностью.

Интеграция различных подходов при решении задачи дает неплохие результаты. В работе [10] предложен интегрированный метод применения GPS данных с фильтром Калмана для отслеживания ТС. В работе [11] предлагается объединение линейной регрессионной модели с локально взвешенной регрессионной моделью для повышения точности. Модели прогноза с фильтрацией лучше всего решают задачу вместе с моделью нейронной сети [12].

При расчете времени движения на маршрутах в навигационных сервисах используется информация о прогнозируемой скорости движения на участках маршрута согласно координатам, которые поступают от GPS модулей. Ожидаемая скорость на участке дороги учитывает данные о реальном движении, получаемые от ТС, которые ранее проехали участок. Ряд факторов влияющих на скорость движения, в частности интенсивность движения, которая меняется в часы пиковой загрузки, что определяет фактор сезонности. При возникновении внезапной помехи скорость ТС замедляется, перерасчет времени движения ТС происходит с запозданием. На изменения средней скорости оказывают влияние параметры транспортных и пешеходных потоков, пробки, работа спецтехники, изменения светофорных циклов и т.д. Для прогноза времени прибытия на остановку применяется методика прогностической оценки средней скорости движения на каждом участке маршрута.

Маршруты движения ОТ моделируются ориентированным графом. Взвешенные ребра графа представляют участки дорог между остановками и перекрестками. Стрелки ребер показывают направления движения. Между вершинами графа может быть несколько ребер, которые моделируют полосы движения. Остановки ОТ и перекрестки являются вершинами графа. Расчет весов расстояний между вершинами выполняется по их GPS-координатам. Кроме весов расстояний в методике учитываются веса факторов, которые оказывают влияние на характер движения на участке. Веса характеризуют скоростные ограничения, число нерегулируемых перекрестков и пешеходных переходов, загруженность участка, число и длительность фаз светофорных циклов, среднее время посадки/высадки пассажиров, среднее время ожидания на светофорах, на выездах на главную дорогу, перед нерегулируемым пешеходным переходом, перед остановкой при ее занятости другим транспортом и т.п. Веса нормализуются, и определяется общий весовой коэффициент для каждого ребра графа в виде свертки всех весов.

Так как ОТ идет по заранее заданному маршруту, который он может менять только в экстренных ситуациях, то на графе изначально существует один маршрут. Расчет времени движения по маршруту зависит от значений весовых коэффициентов ребер в момент времени. Периодически выполняется обновление весов и перерасчет общего весового коэффициента. Изменения весов представляется временными рядами с сезонной составляющей (часы пик) и случайными флуктуациями (дорожные инциденты).

Методика предиктивного моделирования средней скорости и времени движения транспорта на маршруте основана на модели линейной векторной авторегрессии. Модель векторной авторегрессии в векторно-матричной записи:

$$Y_t = a + A^{[1]}Y_{t-1} + A^{[2]}Y_{t-2} + \dots + A^{[p]}Y_{t-p} + \bar{\epsilon}_t. \quad (1)$$

Методика прогностического моделирования представляет собой предиктивный анализ нескольких временных рядов изменений средних скоростей единиц ОТ, которые ранее проехали по данному маршруту. Основной гипотезой является то, что прогнозируемая средняя скорость движения текущей единицы ОТ на маршруте может быть определена по динамике изменений средних скоростей нескольких ранее проехавших аналогичных единиц ОТ на данном маршруте, которые зафиксированы как значения временных рядов. Метод предиктивного анализа базируется на технологии глубокого обучения для интегрированной модели рекуррентной нейронной сети (RNN) и модели трансформера в качестве механизма внимания. На первом этапе выполняется подготовка временных рядов данных, включая сбор, фильтрацию, нормализацию данных о скоростях единиц ОТ и представление их последовательности в виде временного ряда. Далее синтезируется модель RNN с архитектурой трансформера и выполняется настройка кодирующих и декодирующих слоев трансформера. Следующим этапом является обучение модели на подготовленных данных. Модель прогнозирования обучается каждые сутки на основе зафиксированных времени движения на маршруте и скоростей транспортных средств за определенные временные промежутки. Выбирается четыре шаблонных временных интервала для обучения: ночное время, часы пик утром, часы пик вечером, время между утренней и вечерней пиковой загрузкой. В ходе обучения для каждого шаблонного интервала выполняется прогноз средней скорости и сравнивается

с реальной зафиксированной скоростью на конкретном маршруте. По полученной погрешности прогноза настраиваются весовые коэффициенты на каждом слое методом градиентного спуска с целью минимизации функции потерь. Это необходимо, чтобы минимизировать погрешность для прогноза средней скорости единиц ОТ в каждый шаблонный интервал на следующие сутки. В завершение выполняется визуализация прогнозируемого сегмента временного ряда и сравнение с фактическим. Если результаты не устраивают, то выполняется корректировка модели для повышения точности. Настройка включает изменение весовых коэффициентов, функции потерь, числа слоев, количества нейронов в слое. Для текущего прогнозирования по настроенной суточной модели и получаемым GPS трекам транспорта на каждом маршруте выполняется прогностическое моделирование средней скорости на ближайший час.

Методика может применяться не только для расчета и прогноза времени прибытия, но и для решения обратной задачи поиска оптимального маршрута на графе для минимизации времени достижения конечной точки маршрута. Основными параметрами, которые влияют на результаты прогнозирования средней скорости и времени движения ОТ по маршруту, являются: а) время проезда между остановками на маршруте (зависит от средней скорости на данном

участке), б) время посадки/высадки пассажиров (зависит от числа пассажиров), в) время старта и торможения перед остановками, г) время ожидания проезда на светофорных объектах, д) время проезда нерегулируемых перекрестков (зависит от интенсивности движения транспорта), е) время ожидания из-за колебаний загруженности и случайных задержек (зависит от пробок, работ спецтехники, погодных условий, ДТП и т.п.). Значения весовых коэффициентов, которые должны учитывать влияние данных факторов, подбираются экспериментально в процессе мониторинга реальной работы ОТ. В дальнейшем они корректируются при изменении условий движения. Результатами прогноза являются:

1. Время движения между остановками i и j :

$$T_{distance}^{ij} = \frac{D_{stop_by_stop}^{ij}}{V_{average}^{ij}} * W_{ij}, \quad (2)$$

где $D_{stop_by_stop}^{ij}$ – расстояние между остановками по маршрутному графу, $V_{average}^{ij}$ – средняя скорость на участке дороги, W_{ij} – весовой коэффициент для учета различных факторов влияния на расчет времени движения.

2. Средняя скорость, которая определяется по длине участка дороги (l) ребра и среднему времени проезда всеми зафиксированными ТС за интервал времени:

$$V_{average} = \frac{D_{stop_by_stop}^{ij}}{K \cdot T_{average}^{ij}}, \quad T_{average}^{ij} = \sum_{m=1}^K (T_m^j - T_m^i), \quad (3)$$

где T_m^j , T_m^i – время прибытия m -того ТС на i -ю и j -ю остановки по GPS данным, K – число ТС, проехавших между вершинами ребра графа за интервал времени.

В случае отсутствия проезда ТС за интервал времени, данный интервал увеличивается, или считается средняя скорость за предыдущий интервал.

3. Ожидаемое время прибытия T_{wait}^j на j -ю остановку определяется как

$$T_{wait}^j = T_{distance}^{ij} + T_{boarding}^{ij} + T_{start_brake}^{ij} + \sum_{n=1}^{S_{ij}} T_n^{cross}, \quad (4)$$

где $T_{boarding}^{ij}$ – время посадки/высадки пассажиров, $T_{start_brake}^{ij}$ – время старта/торможения перед остановками, T_n^{cross} – время проезда через перекрестки, S_{ij} – число перекрестков на участке между i -й и j -й остановками.

4. Для расчета времени прибытия в конечную точку маршрута подсчитывается суммарное время проезда по всем ребрам маршрута со средней скоростью.

Средние скорости единиц ОТ постоянно меняются из-за различных факторов. Поэтому изменяются веса ребер, которые определяют вклад фактора в расчет времени проезда. Влияние также оказывает се-

зонная составляющая, которая определяет два промежутка времени с резко возрастающей интенсивностью дорожного движения и случайные изменения дорожных ситуаций. Для оценки точности прогноза времени прибытия используется метрика среднего абсолютного отклонения в процентах, которая показывает, на сколько процентов прогнозное время отличается от реального,

которое измеряется по GPS данным. Метрика решает проблему интерпретации результатов, так как не надо оценивать длительность движения по маршруту.

Результаты исследования и их обсуждение

Для реализации методики прогностического моделирования и повышения эффективности работы городского центра диспетчерского управления пассажирским транспортом разработано соответствующее приложение. В приложении реализован следующий функционал.

1. Определение классов данных: а) класс GPSData для сбора и хранения GPS-данных, б) класс Schedule для сбора и хранения информации о движения транспорта, включая время посадки/высадки пассажиров, начала и окончания движения на остановках, проезда через перекрестки, задержек на незапланированных точках маршрута (пешеходных переходах, в местах ДТП, нерегулируемых перекрестках, в местах работы спецтехники и т.п.).

2. Подготовка и анализ данных GPS для синтеза временных рядов единиц ОТ. Функция `analyze_gps_data` работает с GPS данными, текущими изменениями средней скорости единиц ОТ, расстояниями между остановками, регулируемые и нерегулируемые перекрестками, временными задержками для задания и изменения весовых

коэффициентов модели. По результатам анализа изменения координат выполняется синтез временных рядов скоростей единиц ОТ на участке дороги (ребре графа) и прогнозный расчет времени его проезда, которые записываются в базу данных для каждого ребра маршрутного графа.

3. Прогностическое моделирование средней скорости движения единиц ОТ и времени движения на участке с учетом весовых коэффициентов. Функция `run_simulation` создает объект с GPS данными и вызывает функцию предиктивного анализа временного ряда на нейросети, которая возвращает прогнозную скорость ОТ на участке.

4. Расчет времени прибытия на остановки по прогнозируемой средней скорости на каждом участке маршрута. Далее формируется расписание с временами прибытия на точки маршрута и вызывается функция коррекции графика движения. Входными данными для функции `forecast_and_correct` являются объект (единица ОТ), прогнозная средняя скорость для ребра графа, интервал движения, расстояние между вершинами ребра. Для каждой остановки прогнозируется время ожидания с учетом средней скорости единицы ОТ и выполняется коррекция графика движения транспорта.

Для тестирования работы приложения был выбран маршрут движения автобуса № 130 в городе с остановками, отмеченными на карте (рис. 1).

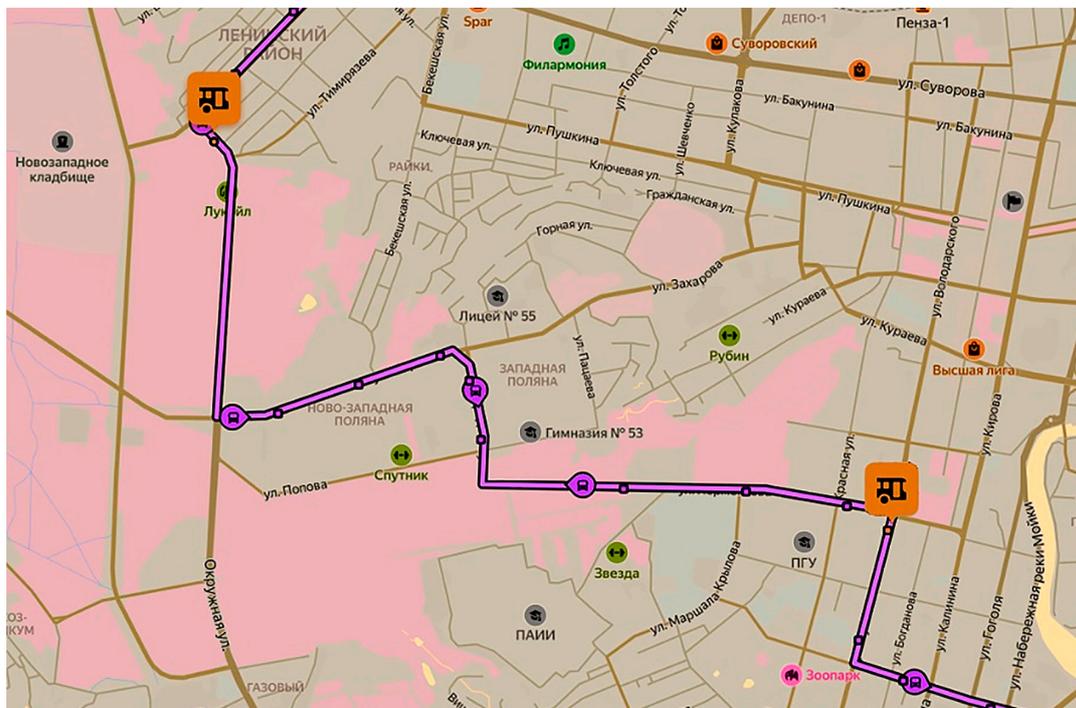


Рис. 1. Пример фрагмента автобусного маршрута

```

INFO:root:Скорректированные скорости для участков дороги: [41, 41, 30, 39.8, 40.1, 40.05, 39.85, 40.25, 39.8, 40.15]
Updated Schedule:
Stop: Окружная, Time: 15 minutes, 0 seconds
Stop: Мира, Time: 17 minutes, 33 seconds
Stop: НИИ Контрольприбор, Time: 18 minutes, 38 seconds
Stop: ЖК Фаворит, Time: 19 minutes, 54 seconds
Stop: Ленинградская, Time: 20 minutes, 49 seconds
Stop: Дом Офицеров, Time: 21 minutes, 47 seconds
Stop: Перинатальный центр, Time: 23 minutes, 31 seconds
Stop: ПГУ, Time: 24 minutes, 52 seconds
Stop: Красная, Time: 26 minutes, 5 seconds
Stop: Куйбышева, Time: 27 minutes, 4 seconds

```

Рис. 2. Результаты прогностического моделирования

На фрагменте маршрута присутствует 10 остановок. Для моделирования задается интервал обновления весов $A = 15$ мин и другие входные данные. Результаты прогностического моделирования времени показывают, как меняется скорость ТС на разных интервалах в зависимости от задержки (рис. 2).

В ходе апробации алгоритма, для единиц ОТ в городе с населением около 500 тыс. человек (г. Пенза), были определены основные показатели, для которых достигнута максимальная точность прогноза, а именно средняя длина участка – от 280 до 330 м, горизонт прогнозирования – не более 2,5 ч, средняя скорость единиц ОТ – 36 км/ч, а в часы пик – 17 км/ч, средняя погрешность прогноза – 6 %. Применение метода прогнозирования средней скорости и времени прибытия ОТ на промежуточные и конечную точки маршрута позволило центру диспетчерского управления движением транспорта эффективно вести мониторинг, организовать планирование и оперативно корректировать расписание движения единиц ОТ на маршрутах. Работа приложения в службах диспетчеризации городского транспорта позволяет пассажирам через мобильные средства связи получать оперативную информацию о движении и сроках прибытия ОТ.

Заключение

Применение методики и программного приложения позволяет эффективно учитывать условия дорожного движения, что способствует повышению точности расчета времени прибытия общественного транспорта на промежуточные и конечные точки маршрута следования. Простота интеграции с системами диспетчерского управления и адаптация к различным дорожным условиям делают его инструментарием для оптимизации графиков движения и информирования городского населения об изменениях в расписании движения общественного транспорта. Дальнейшая работа над методикой и приложением предполагает применение в методике архитектуры

рекуррентной нейронной сети с механизмом трансформера не только для прогноза средней скорости движения на маршруте, но и для прогнозирования временных рядов изменения весовых коэффициентов, учитывающих факторы влияния и различные задержки на маршруте. Прогнозную модель предлагается обучить и тестировать в городских условиях на данных об изменениях интенсивности и плотности автомобильного и пешеходного трафика на участках. Также предполагается добавить возможность реагирования на появление незапланированных препятствий при движении общественного транспорта по маршруту следования и в случае вынужденного изменения маршрута. Расширенная методика и комбинированная прогностическая модель позволит расширить функциональность приложения, повысить эффективность и точность оценки временных показателей движения городского общественного транспорта. В настоящее время модуль прогностической оценки времени движения и прибытия общественного транспорта реализуется в системе интеллектуального мониторинга городской дорожно-транспортной инфраструктуры.

Список литературы

1. Погребной В.Ю., Фадеев А.С. Алгоритмизация прогнозирования времени прибытия пассажирского транспорта города Томска на остановку с использованием модели, основанной на исторических и реальных данных // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 6 (19). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/100TVN613.pdf> (дата обращения: 12.04.2024).
2. Vanajakshi L., Subramanian S., Sivanandan R. Travel time prediction under heterogeneous traffic conditions using global positioning system data from buses // IET Intelligent Transport Systems. 2009. Vol. 3. P. 1–9.
3. Игумнов А.О., Соськин Д.М. Разработка методики построения прогноза времени прибытия с использованием статистических и фактических данных о движении транспортных средств по принципу подбора шаблонов // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. № 3 (8). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN316.pdf> (дата обращения: 12.04.2024).
4. Агафонов А.А., Юмаганов А.С. Сравнение методов машинного обучения в задаче прогнозирования движения общественного транспорта // Информационные технологии

и нанотехнологии: сборник трудов ИТНТ-2019: V международная конференция и молодежная школа. Самара: Новая техника, 2019. С. 761–768.

5. Lee C., Yoon Y. A Novel Bus Arrival Time Prediction Method Based on Spatio-Temporal Flow Centrality Analysis and Deep Learning // *Electronics*. 2022. Vol. 11. DOI: 10.3390/electronics11121875.

6. Aljamal M.A., Abdelghaffar H.M., Rakha H.A. Developing a Neural – Kalman Filtering Approach for Estimating Traffic Stream Density Using Probe Vehicle Data // *Sensors*. 2019. Vol. 19. DOI: 10.3390/s19194325.

7. Аламир Х.С., Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А. Модель прогнозирования транспортного потока на основе нейронных сетей для предсказания трафика на дорогах // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2021. № 6 (223). С. 124–132.

8. Achar A., Regikumar R., Kumar B. Dynamic Bus Arrival Time Prediction exploiting Non-linear Correlations // *Inter-*

national Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 2019. P. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8852358.

9. Tingting Y., Gang Z., Jian Z., Shanglu H., Bin R. A prediction model of bus arrival time at stops with multi-routes // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 4623–4636. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.381.

10. Hamidu M. Modeling and Simulation of GPS Positioning and Iterative Vehicle Motion Using Kalman Filter in Vehicle Tracking System // *Communications*. 2017. Vol. 5. DOI: 10.11648/j.com.20170502.11.

11. Pun L., Zhao P., Liu X. A Multiple Regression Approach for Traffic Flow Estimation // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 35998–36009. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2904645.

12. Hans E., Chiabaut N., Leclercq L., Bertini R. Real-time Bus Route State Forecasting Using Particle Filter: An Empirical Data Application // *Transportation Research Procedia*. 2015. Vol. 6. P. 434–447. DOI: 10.1016/j.trpro.2015.03.033.