

## Модель городской транспортной системы как инструмент прогнозирования параметров движения маршрутного транспорта



**ПОГРЕБНОЙ Вадим Юрьевич**

*Ассистент кафедры  
автоматики  
и компьютерных систем  
Института кибернетики  
Национального  
исследовательского  
Томского политехнического  
университета*

### Аннотация

Статья посвящена разработке методов дискретизации времени и формирования моделей городской улично-дорожной и маршрутной сети. Для описания маршрутной сети используется электронная карта и методы теории графов. Предлагаемая модель транспортной системы позволяет проецировать координаты транспортных средств на маршрутную сеть и осуществлять пространственно-временное распределение регистрируемых значений параметров движения маршрутного транспорта.

Спроецированные в реальном масштабе времени координаты и распределенные в пространстве и времени статистические значения позволяют прогнозировать будущие значения параметров движения транспорта с учетом реальной дорожной ситуации. Формируемый прогноз и представленная в виде орграфа маршрутная сеть применяются в задачах построения кратчайших маршрутов, формирования расписаний и графиков движения общественного транспорта, распознавания объектов улично-дорожной сети по текстовым описаниям.

### Ключевые слова:

**транспортная система, прогнозирование, маршрутная сеть, улично-дорожная сеть, навигационно-телеметрические данные, пространственно-временное распределение, параметр движения, граф.**

Прогнозирование значений параметров движения маршрутного транспорта основано на постоянном мониторинге местоположения транспортных средств (ТС) и регистрации текущих значений параметров. С применением современных глобальных навигационных спутниковых систем для отслеживания местоположения ТС возникает проблема отсутствия привязанности получаемых навигационно-телеметрических данных (НТД) к городской улично-дорожной сети (УДС) и к маршруту движения ТС. Для решения данной проблемы необходимо использовать механизм проецирования получаемых НТД на УДС или маршрут движения ТС, что приводит к необходимости построения компьютерной модели УДС и маршрутной сети.

Регистрируемые значения параметров зависят от множества критериев: времени регистрации, погодных условий, состояния УДС, поведения участников дорожного движения, соблюдения графиков и т. д. Так как одним из таких критериев является местоположение ТС, модель маршрутной сети также является инструментом для регистрации значений параметров движения транспорта. Зависимость значений от времени их регистрации может быть учтена с использованием электронного календаря и дискретизации времени.

В данной работе в рамках проекта развития интеллектуальной транспортной системы города Томска и, в частности, разработки информационной системы прогнозирования параметров движения маршрутного транспорта [4, 5] предлагается модель городской транспортной системы с пространственно-временным распределением регистрируемых значений параметров.

## Построение модели маршрутной сети

В городе функционирует около 700 остановочных пунктов, из которых 77 трамвайных и 168 троллейбусных, а также 4 трамвайных, 8 троллейбусных и 34 автобусных маршрута. Каждый маршрут можно представить в виде нескольких подмаршрутов, соответствующих направлениям движения транспорта: 2 главных взаимообратных направления, либо 1 направление, если маршрут является кольцевым. Также у маршрута могут быть дополнительные направления: укороченные либо продленные до близлежащих населенных пунктов, дополнительные направления электротранспорта, ведущие из трамвайного или троллейбусного депо до ближайшей остановки одного из главных направлений. Например, автобусный маршрут № 22 имеет 2 главных направления и 2 направления, продленных до поселка Спутник, троллейбусный маршрут № 1—2 главных направления и дополнительные направления «Троллейбусное депо — площадь Ленина», «площадь Ленина — Приборный завод», «Приборный завод — площадь Ленина» и «площадь Ленина — Троллейбусное депо». Таким образом, под одним маршрутом будем понимать комплекс маршрутов, названных направлениями движения транспорта. Каждое направление представим в виде упорядоченной последовательности остановок.

Для построения модели маршрутной сети была использована электронная карта OpenStreetMap. Координаты отображаемых на карте объектов  $\bar{X} = (\bar{x}, \bar{y})$  представлены в системе координат WGS-84, где  $\bar{x}$  — широта,  $\bar{y}$  — долгота. Первоначально на карту были нанесены узлы УДС  $n$  (остановки, перекрестки) в соответствии с их координатами. Каждому узлу были присвоены название, описание и тип. Для регистрации ТС в пределах узлов геометрически каждый узел описывается в виде круга  $\omega^n(\bar{O}^n, \rho)$  с центром  $\bar{O}^n = (\bar{x}^o, \bar{y}^o)$  и радиусом  $\rho$  либо многоугольником  $\omega^n(L^n)$  со сторонами  $L^n = \{l(\bar{A}^l, \bar{B}^l)\}$ , где  $\bar{A}^l, \bar{B}^l$  — концы отрезка  $l$  (рис. 1).

Для точного описания маршрутов, а также для разделения значений параметров движения транспорта по направлениям каждый перекресток был представлен в системе стольким количеством узлов, сколько возможно путей движения на данном перекрестке.

На втором этапе были сформированы маршруты с определенными номерами и типами (трамвай, троллейбус или автобус), которые состоят из направлений, представленных упорядоченным набором узлов УДС и промежуточных точек. Для графического отображения маршрутов, автоматического расчета расстояний между узлами и определения местоположения ТС с высокой точностью модели маршрутов геометрически полностью повторяют пути и улицы движения маршрутного транспорта, соответствуют перечням остановочных пунктов и перекрестков. Узлы маршрутов соответствуют

нанесенным ранее на карту узлам УДС, а промежуточные точки предназначены для линейризации и подробного описания схемы движения маршрутного транспорта [3]. Точки соединены прямыми линиями, представляющими сегменты УДС.

Математически представим маршрутную сеть  $R = \{r = \{d\}\}$  в виде орграфа  $(P^R, S^R) = \left( \bigcup_{r \in R} P^r, \bigcup_{r \in R} S^r \right)$ , где  $(P^r, S^r) = \left( \bigcup_{d \in r} P^d, \bigcup_{d \in r} S^d \right)$ ,  $(P^d, S^d)$  – орграф, представляющий направление  $d$  маршрута  $r$  с множеством вершин  $P^d$  и дуг  $S^d$ , описывающих упорядоченные узлы и сегменты направления. Множество  $P^d = \{p_j^d\}$  представим как  $P^d = \overline{P}^d \cup \tilde{P}^d$ , где  $p_j^d = \tilde{p}_j^{d,n} \vee \bar{p}_j^d$  – узел направления  $d$  порядковым номером  $j \in \{1, |P^d|\}$ ,  $\tilde{p}_j^{d,n} \in \tilde{P}^d$  – узел, соответствующий узлу УДС  $n$ ,  $\bar{P}^d = \{\bar{p}_j^d\}$  – промежуточные узлы, линейризирующие направление. Координаты узла  $p_j^d$  обозначим  $\bar{O}_j^{d,p} = (\bar{x}_j^{d,p,O}, \bar{y}_j^{d,p,O})$ . Сегмент направления  $d$ , соединяющий два последовательных узла, обозначим  $s_j^d = (p_j^d, p_{j+1}^d) \in S^d$  [1]. Для решения определенной транспортной задачи каждой вершине и дуге графа необходимо присвоить дополнительные параметры и веса, изменяемые либо вручную пользователем системы, либо автоматически во время построения модели или мониторинга движения транспорта. Примерами весов ребер являются расстояния между точками, а также плановые интервалы движения между узлами в случае формирования расписаний и графиков движения маршрутного транспорта (рис. 2).

Чтобы связать данные о расположении ТС с маршрутной сетью, представленной в виде графа, необходимо спроецировать координаты

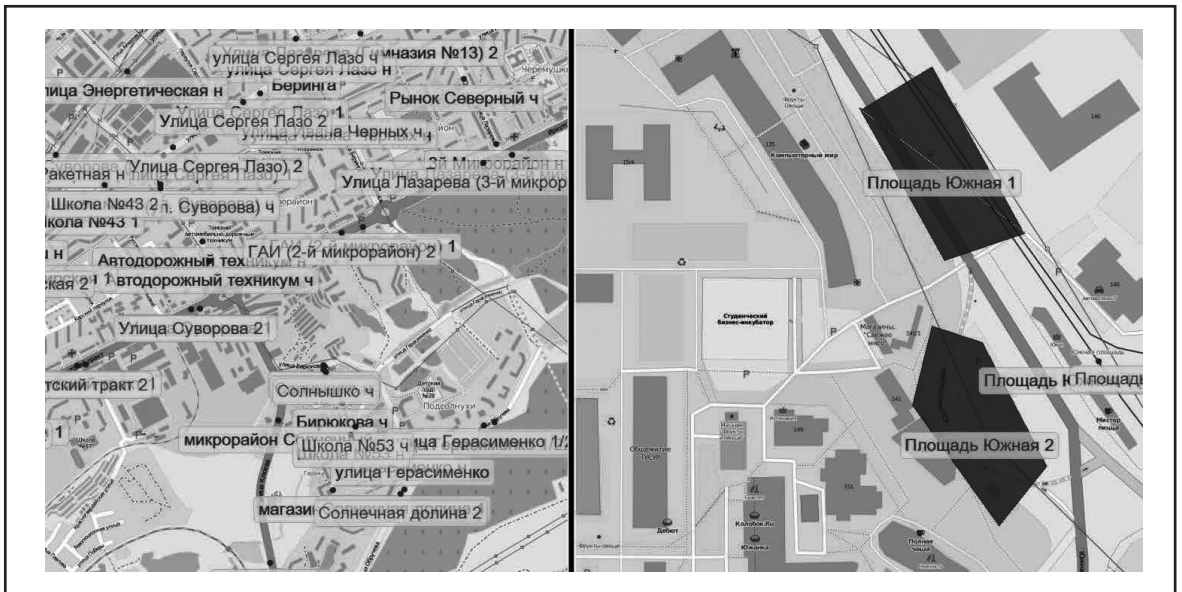


Рис. 1. Формирование узлов УДС на карте г. Томска

на ближайший к ТС сегмент. Однако в связи с тем, что координаты ТС и узлов УДС указываются в географической системе координат, формулы проецирования могут быть громоздкими, что усложняет и увеличивает продолжительность процесса обработки информации.

## Построение проекции

Все располагающиеся в пространстве объекты созданной модели и получаемые НТД содержат координаты в географической системе координат  $\bar{X} = (\bar{x}, \bar{y})$  в виде широты и долготы. Для решения транспортных задач в этой системе координат используется сферическая геометрия, громоздкие формулы которой создают дополнительные препятствия при разработке систем и для достижения результатов в короткие промежутки времени. С целью устранения проблем, связанных с применением сферической геометрии, необходимо перевести решение задачи на плоскость, что приводит к использованию картографической проекции.

Существует большое количество проекций, применяемых для решения различных задач в зависимости от установленных требований [7]. Для системы прогнозирования были сформированы следующие требования:

- а) построить проекцию объектов, располагающихся в Томске и его окрестностях;
- б) сохранять натуральный размер объектов;
- в) хранить координаты и размеры объектов в оперативной памяти ЭВМ;
- г) обеспечить быструю обработку данных в реальном масштабе времени.

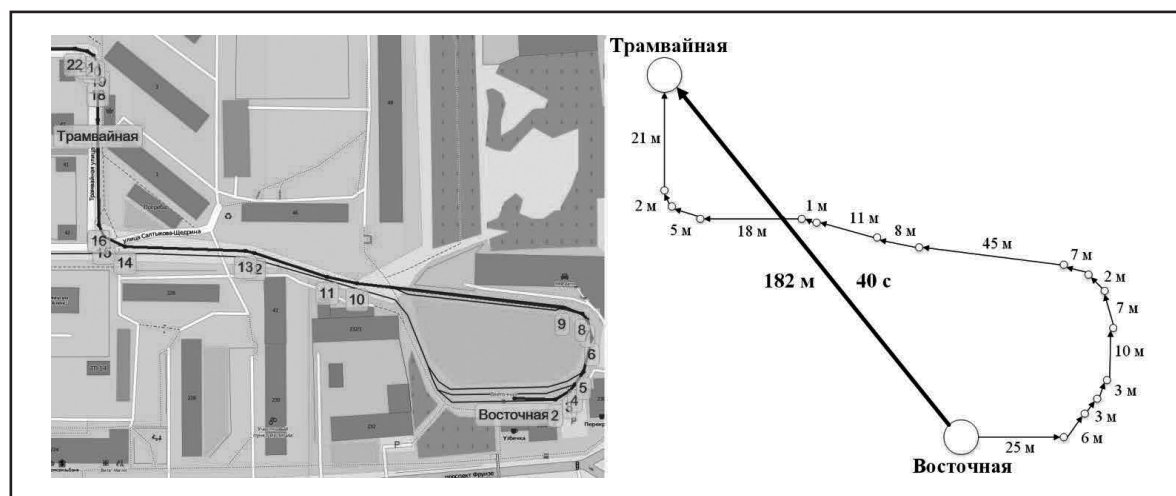


Рис. 2. Линеаризованный маршрут (на карте и в виде графа)

Указанным требованиям в большей мере удовлетворяет цилиндрическая равнопромежуточная проекция, описываемая следующими формулами:

$$\begin{aligned}x &= \cos \bar{y}_0 \times (\bar{y} - \bar{y}_0) \\y &= \bar{x} - \bar{x}_0,\end{aligned}$$

где  $(x, y)$  — координаты точки на плоскости;

$\bar{y}_0$  — долгота базисной точки;

$\bar{x}_0$  — широта базисной точки.

В качестве базисной точки выбраны координаты Томска:  $56^{\circ}29'19''$  с. ш.  $84^{\circ}57'08''$  в. д.

Выборную проекцию представим функцией  $\mu: \bar{X} \mapsto X$ . Координаты ТС в получаемых НТД, которые представлены в системе координат ПЗ-90 (ГЛОНАСС) или WGS-84 (GPS) [2], обозначим величиной  $\bar{V}$ . Для проектирования координат  $\bar{V}$  и решения других транспортных задач на плоскости необходимо выполнить следующие преобразования:  $(\forall n \in N) O^n = \mu(\bar{O}^n)$ ,  $(\forall l \in L^n) A^l = \mu(\bar{A}^l)$ ,  $B^l = \mu(\bar{B}^l)$ ;  $(\forall r \in R)(\forall d \in r)(\forall p_j^d \in P^d) O_j^{d,p} = \mu(\bar{O}_j^{d,p})$ ;  $V = \mu(\bar{V})$ .

## Дискретизация времени

Большинство значений параметров движения маршрутного транспорта зависит от времени их регистрации. Параметры изменяются в зависимости от сезона года, дня недели и времени суток [1, 4, 5]. Для учета данной зависимости в соответствии с особенностями города Томска были выделены временные периоды согласно следующей схеме:

- а) выделено 5 сезонов года: «зима», «весна», «лето+студенты», «лето» и «осень»;
- б) выделено 2 типа дней недели: «рабочий» и «выходной»;
- в) сутки разбиты на получасовые интервалы.

Каждый временной период  $m \in M$  имеет три параметра: сезон года, тип дня недели и время суток, где  $M$  — множество временных периодов. Всего выделено 480 временных периодов. С использованием разработанного метода дискретизации любой момент времени  $t$  можно преобразовать во временной период  $m$ . Для установления соответствия даты определенному сезону года и типу дня недели, а также для редактирования интервалов дискретизации суток была разработана специальная программа (рис. 3).

Описанный метод позволяет связать каждое регистрируемое значение определенного параметра движения транспорта с временным периодом. Накопленная статистика значений параметров, распределенная по различным временным периодам, позволяет анализировать динамику изменения параметров движения, строить временные ряды и прогнозировать будущие значения параметров.

Результатом выполненной работы стали три компонента модели транспортной системы, предназначенной для осуществления

прогнозирования: построена модель маршрутной сети, выбрана картографическая проекция и разработан метод дискретизации времени. Построенная модель маршрутной сети является инструментом, связывающим местоположение ТС с маршрутом его движения, что позволяет в любой момент времени получать информацию о местоположении ТС в маршруте. Кроме того, модель маршрутной сети позволила реализовать методы регистрации значений различных параметров движения транспорта.

Выбранная картографическая проекция способствовала быстрой реализации методов проецирования координат и регистрации значений параметров движения, а также высокой производительности работы алгоритмов, выполняемых в реальном масштабе времени. Разработанный метод дискретизации времени позволил распределять регистрируемые значения параметров не только в пространстве, но и во времени. Распределенная во времени статистика позволяет прогнозировать параметры движения транспорта с учетом реальной дорожной ситуации.

Описанная модель городской транспортной системы используется для прогнозирования будущих значений параметров, построения кратчайших по времени движения маршрутов, формирования расписаний и графиков движения общественного транспорта, распознавания объектов улично-дорожной сети по текстовым описаниям и решения других транспортных задач [1–8]. Так, местоположение ТС, привязанное к сегменту, и граф с интервалами движения между узлами в качестве весов ребер и временами задержки в узлах в качестве параметров вершин, а также адаптированные алгоритмы оценивания интервалов и времен задержек позволяют прогнозировать время прибытия ТС в последующие узлы маршрута его движения.

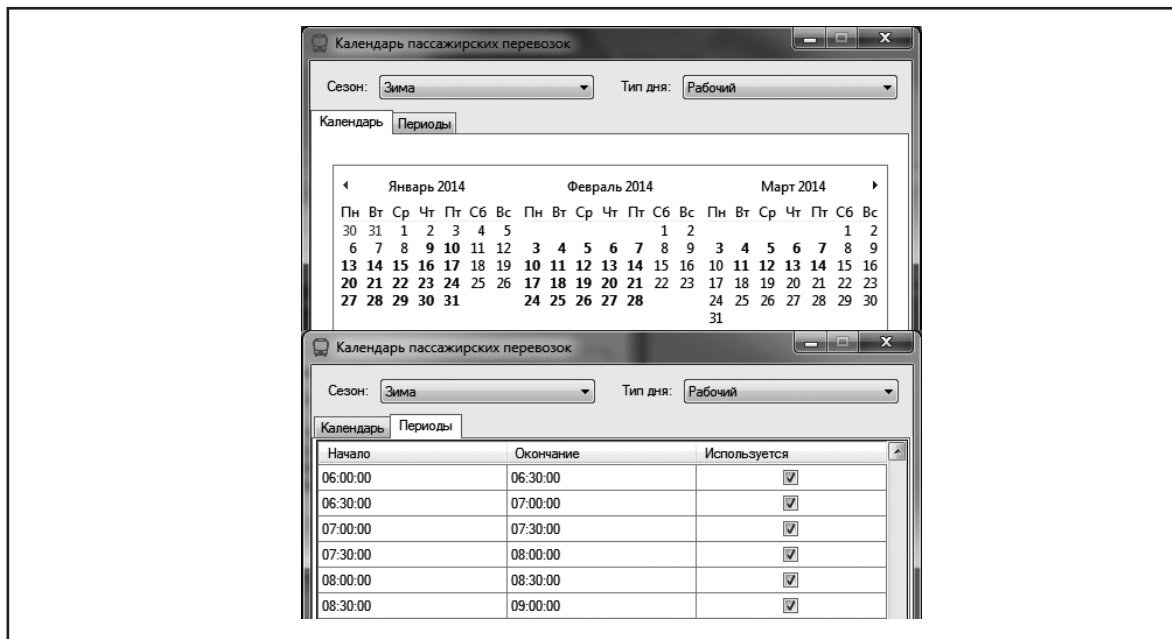


Рис. 3. Программа редактирования временных периодов

ЛИТЕРАТУРА

1. АГАФОНОВ А. А. **Прогнозирование параметров движения городского пассажирского транспорта по данным спутникового мониторинга** / А. А. Агафонов, А. В. Сергеев, А. В. Чернов // Компьютерная оптика. — 2012. — № 3. — С. 453–458.
2. МАРКОВ Н. Г. **Интеллектуальные навигационно-телекоммуникационные системы управления подвижными объектами с применением технологии облачных вычислений** / Д. М. Сонькин, А. С. Фадеев, А. О. Шемяков, Т. Т. Газизов // Научное издание. М.: Горячая линия–Телеком, 2011.
3. **On-Line-сервисы** // Официальный сайт МБУ «Центр организации и контроля пассажироперевозок». Томск, 2015. URL: <http://www.rasp.tomsk.ru/online> (дата обращения: 03.08.2015).
4. ПОГРЕБНОЙ В. Ю. **Алгоритмизация прогнозирования времени прибытия пассажирского транспорта города Томска на остановку с использованием модели, основанной на исторических и реальных данных** / В. Ю. Погребной, А. С. Фадеев // Интернет журнал «Наукovedение». — 2013. — № 6 (19). — С. 1–16. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/100TVN613.pdf> (дата обращения: 03.08.2015).
5. ПОГРЕБНОЙ В. Ю. **Анализ и выбор модели прогнозирования времени прибытия транспорта на остановку в условиях транспортной системы г. Томска** / В. Ю. Погребной, А. С. Фадеев // Грузовое и пассажирское автохозяйство. — 2013. — № 12. — С. 78–83.
6. ПОГРЕБНОЙ В. Ю. **Применение географических информационных систем в задачах оптимизации выбора маршрута, мониторинга и прогнозирования движения пассажирского транспорта** / В. Ю. Погребной, А. С. Фадеев, Ю. А. Мартынова // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2014: сборник научных трудов SWorld. 1–12 октября 2014 г. — Т. 10. № 3(36). — Одесса: Купrienko С. В., 2014. — С. 40–52.
7. **Получение матрицы пассажирских корреспонденций на основе данных электронных карт** / Е. А. Кочегурова, Я. А. Мартынов, Ю. А. Мартынова, А. С. Фадеев // Системы управления и информационные технологии. — 2013. — Т. 54. № 4. — С. 35–39.
8. МАРКОВ Н. Г., СОНЬКИН Д. М., ГАЗИЗОВ Т. Т., ЛЕЩИК Ю. В., ФАДЕЕВ А. С., ШЕМЯКОВ А. О. **Комбинированный алгоритм прогнозирования дорожной обстановки на основе методов нечеткого поиска в региональной навигационно-информационной системе мониторинга и управления транспортом** // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2013. — № 4 (30). — С. 182–187.
9. **ArcGIS 9. Картографические проекции** // ALPHAGIS. URL: [http://www.alphagis.ee/data/img/ArcGIS\\_9\\_Map\\_Projections.pdf](http://www.alphagis.ee/data/img/ArcGIS_9_Map_Projections.pdf) (дата обращения: 20.06.2014).