

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Исследование процессов и явлений реального мира с помощью их заменителей — моделей — позволяет без лишних затрат получать ответы на интересующие вопросы и потому всегда актуально. С развитием вычислительной техники возможности моделирования значительно расширились, предоставляя исследователю средства автоматизированной обработки огромных массивов данных. Компьютерное моделирование стало неотъемлемой частью исследований в технических и естественнонаучных областях, где нередко экспериментирование с реальным объектом может привести к негативным последствиям.

Не является исключением теория транспортных потоков, изучающая процесс движения потоков транспортных средств по магистралям и построение улично-дорожных сетей (далее УДС), обеспечивающих эффективное сообщение с минимальным числом заторных ситуаций. Интенсивное развитие автомобильной промышленности и автомобилизация, наблюдаемые на протяжении последних десятилетий, обеспечили решение проблем транспортировки грузов и пассажиров. Однако положительная динамика роста автопарка с каждым годом ставит вопрос управления автотранспортными потоками всё более остро, особенно в условиях городов, поскольку их улично-дорожные сети, будучи спроектированными для более скромных потребностей, уже не способны удовлетворять спрос на передвижение.

Основными причинами, по которым движение по магистралям становится затруднённым, являются помехи, в роли которых выступают перекрёстки и пешеходные переходы. Нередко причиной заторов становятся дорожно-транспортные происшествия или ремонтные работы, частично или полностью блокирующие движение. Нужно упомянуть и характерное для России в целом невысокое качество УДС, которое часто влечёт за собой вынужденное снижение скорости передвижения. Таким образом, ввиду несоответствия пропускной способности дорог потребностям их пользователей образуются пробки, для преодоления которых часто необходимо ожидать в очереди длительное время.

В любом крупном городе сегодня наблюдается проблема загрязнения окружающей среды объектами техногенного происхождения, и основным источником загрязнения, по данным статистики, признаётся именно автотранспорт, на долю которого в общем объёме выбросов загрязняющих веществ приходится в среднем 65%. В то же время наибольший объём выбросов имеет место, когда автомобиль работает на холостом ходу или движется с небольшой скоростью, т. е. простаивает в пробках.

Одним из путей решения проблемы разгрузки УДС является организация координированного светофорного регулирования с адаптивными схема-

ми, способными к динамическому изменению в соответствии со сложившейся ситуацией. Такое регулирование может быть достигнуто на основе оперативных данных о численности и структуре транспортного потока, для получения которых необходимо использовать специальные программно-технические средства. При этом отражение оперативной ситуации с помощью подобных систем в масштабе города сопряжено с необходимостью охвата устройствами наблюдения всех перекрёстков и магистралей, что не всегда возможно и оправдано. Также нередко возникает потребность в определении оптимального по времени маршрута передвижения при заданных условиях — плотности движения, светофорах и т. п., — например, для транспорта служб экстренного реагирования. Эти задачи можно решить, воспользовавшись средствами моделирования.

Эффективным и информативным способом моделирования движения совокупности транспортных средств по магистрали являются клеточные автоматы [1]. На основе подхода микромоделирования разработан ряд моделей [2], позволяющих отслеживать динамику как отдельно взятого автомобиля, так и потока в целом, и получать исходные данные для оценки времени передвижения, времени ожидания в пробке и средней скорости.

Целью диссертационной работы является разработка модели автотранспортного потока, принимающей во внимание его структуру, состояние дорожного покрытия и скоростные ограничения, способной выступать в роли источника данных о ситуации на дороге как в режиме реального времени, так и в перспективе.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. Исследовать существующие подходы к моделированию автотранспортных потоков.
2. Разработать модель дорожного движения, учитывающую структуру потока автотранспорта, скоростные ограничения, а также влияние состояния дорожного покрытия на передвижение транспортных средств.
3. Разработать программный инструментарий для моделирования потоков автомашин.
4. Провести натурное обследование структуры и интенсивности автотранспортных потоков. Провести калибровку модели.
5. Осуществить проверку адекватности модели на основе данных опытных наблюдений.
6. Провести серию численных экспериментов с целью исследования проблемных участков УДС г. Омска и оценки объёмов выбросов загрязняющих веществ.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы математического и компьютерного моделирования, теории ал-

горитмов и языков программирования, вычислительного эксперимента, математической статистики, наблюдения и измерения.

Научная новизна работы заключается в обобщении опыта, накопленного в моделировании дорожного движения с использованием клеточных автоматов, и его применении к разработке многофакторной модели. Нововведением предлагаемой в работе модели, основанной на стохастическом транспортном клеточном автомате, является учёт влияния *состояния дорожного полотна* на скорость передвижения транспортных средств, а также принятие во внимание *локальных скоростных ограничений*, устанавливаемых знаками дорожного движения. Набор правил модели включает вновь введённое правило “*превышения скорости*”, позволяющее более адекватно отражать скорость движения потока машин. Кроме того, разработанная модель позволяет представлять *разнородный* транспортный поток, образованный автомобилями различных типов (легковыми, грузовыми, автобусами) и обладает *переменной разрешающей способностью*, делающей возможным варьирование длины ячеек автомата.

Практическая значимость состоит в применении разработанной модели к прогнозированию дорожной ситуации; оценке задержек на участках УДС при заданных условиях; оценке возможности и целесообразности внесения изменений в структуру УДС; оценке влияния автотранспорта на экологическую ситуацию в пределах магистрали; разработке программной реализации модели. Результаты работы внедрены в учебный процесс ГОУ СибАДИ.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Имитационная модель движения разнородных автотранспортных потоков, основанная на стохастическом многополосном транспортном клеточном автомате и обладающая возможностью учёта влияния состояния дорожного покрытия и скоростных ограничений на движение машин.
2. Модель УДС на базе имитационной модели дорожного движения, включающая регулируемые и нерегулируемые перекрёстки и пешеходные переходы и позволяющая представлять движение потоков автомашин по сети дорог.
3. Универсальный программный инструментарий для проведения вычислительных экспериментов, предоставляющий набор классов для решения широкого круга задач по моделированию движения автотранспортных потоков.

Основные результаты работы были представлены на 62 научно-технической конференции СибАДИ (г. Омск, 2008); межвузовской научно-практической конференции “Информационные технологии и автоматизация управления” (ОмГТУ, г. Омск, 2009); Всероссийской научно-практической конфе-

ренции “Инновации и современные технологии: опыт, стратегии, проблемы” (издательский дом “Статус”, г. Омск, 2009); Международной научно-технической конференции “Информационно-вычислительные технологии и их приложения” (г. Пенза, 2009); Всероссийской научно-практической конференции “Технологическое развитие современных социально-экономических систем: тенденции, проблемы и перспективы” (г. Волгоград, 2010); Международной научно-практической конференции “Применение компьютерных и информационных наук в исследованиях природы” университета штата Нью-Йорк (Фредония, Нью-Йорк, 2010); 64 научно-технической конференции СибАДИ в рамках Юбилейного Международного конгресса “Креативные подходы в образовательной, научной и производственной деятельности”, посвящённого 80-летию академии (г. Омск, 2010).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 1 статья в рецензируемом журнале [3], 7 статей в сборниках трудов конференций [1, 2, 4–7] и тезисах докладов [8]; 1 работа опубликована в электронном издании [9].

Личный вклад автора состоит в разработке модели дорожного движения на основе стохастического транспортного клеточного автомата с дополненным набором правил для учёта состояния дорожного полотна и локальных скоростных ограничений; в разработке программной реализации модели.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы, изложенных на 133 страницах машинописного текста, содержащих 31 рисунок и 23 таблицы. Список приложений включает 12 наименований и изложен на 81 странице.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе рассмотрены подходы к проблеме моделирования автотранспортных потоков, ставшей актуальной с середины XX века и нашедшей своё отражение в работах Б. Гриншилдса, М. Лайтхилла и Дж. Уизема. Исследования в этом направлении продолжены И. Пригожиным, Р. Германом, Д. Газисом. В настоящее время проблемой активно занимаются К. Даганзо, Б.С. Кернер, М. Шрекенберг, К. Нагель, Д. Хелбинг.

Созданные модели исторически разделились на три группы: макро-, мезо- и микромодели, различающиеся степенью детализации моделируемого объекта. Макромодели, строящиеся преимущественно на основе аналогии с динамикой частиц в жидкой или газообразной средах, базируются на ис-

ходных допущениях о равновесном состоянии потока и взаимно однозначной зависимости скорости и плотности потока. Однако эти допущения не всегда находят опытное подтверждение. Мезомодели учитывают особенности поведения водителей, при этом рассматривают автотранспортный поток, не прибегая к моделированию отдельно взятых машин. В микромоделях автотранспортный поток складывается из взаимодействия множества отдельных машин и позволяет проследить динамику как потока автомобилей в целом, так и каждого автомобиля.

Применение клеточных автоматов в моделировании дорожного движения является молодым и перспективным направлением, характеризуемым высокой вычислительной скоростью и эффективностью. Этот подход может быть классифицирован как имитационный и позволяет представлять динамику системы во времени. Кроме того, разделение машин по типам в этом случае является простой задачей, что отличает его от аналитических моделей.

Во второй главе приведено формальное описание разработанной модели дорожного движения на основе стохастического транспортного клеточного автомата, учитывающей состояние дорожного полотна и локальные скоростные ограничения.

Автомат представлен массивом ячеек длины N и ширины M (число полос) (рисунок 1). Длина ячейки l_c характеризует разрешающую способность автомата и принимается равной 5,5 м (значение ширины ячейки не оказывает влияния на обновление автомата и потому опущено). Т. к. время в модели дискретно и один шаг обновления соответствует 1 сек, возможно моделирование движения машин со скоростью 20, 40, 60 км/ч и т. д. На массиве в произвольном порядке располагаются транспортные средства $a \in A$, $|A| = u$, $u \in \mathbb{N}$. Позиция i -го автомобиля определяется переменными n_i (ячейка) и m_i (полоса). Каждая машина принадлежит к определённому типу (легковой, грузовой, автобус): $c_i \in \mathbb{N}$. Число ячеек, необходимое для представления автомобиля, различается в зависимости от его типа. Максимальная скорость автомобиля v_m также зависит от значения c_i . Текущий момент времени (итерация) обозначается переменной t .

Каждая ячейка массива представляет сегмент дорожного полотна и обладает эксплуатационным состоянием, которое обозначается с помощью параметра $s(m, n) \in \mathbb{N}$. Его значение варьируется от 0 до 3: 0 — движение невозможно; 1 — площадь повреждений превышает $2,5 \text{ м}^2$ на 1000 м^2 ; 2 — площадь повреждений не выше $2,5 \text{ м}^2$ на 1000 м^2 ; 3 — выбоины и прочие дефекты на дороге отсутствуют (нормы согласно ГОСТ 50597-93). Каждому значению соответствует рекомендованная скорость движения v_{rec} .

Любая магистраль имеет максимальную разрешённую скорость движения, которая в модели представлена параметром v_{max} . На некоторых участ-

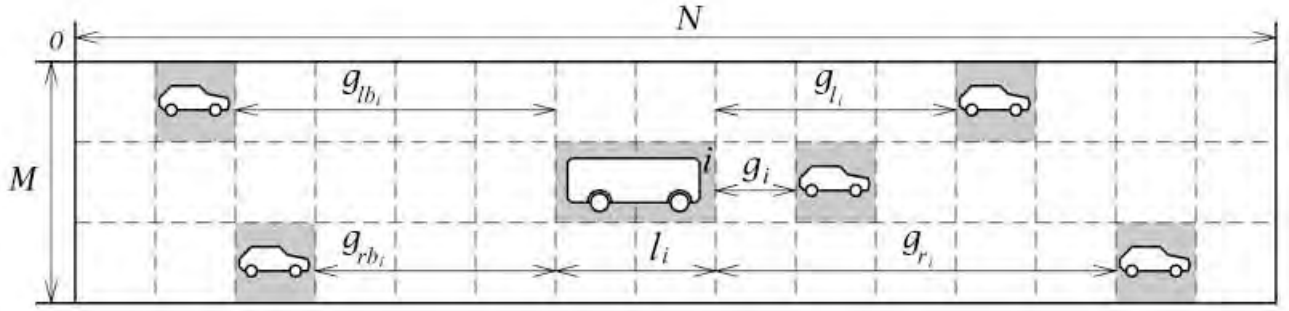


Рис. 1. Многополосный транспортный клеточный автомат 3x15

ках дороги разрешённая скорость может быть снижена соответствующими знаками дорожного движения — для их обозначения служат *локальные ограничения скорости* $v_{lmax}(m, n) \in \mathbb{N}$, $v_{lmax}(m, n) \leq v_{max}$.

Обновление конфигурации автомата проводится последовательно, в два этапа: сначала определяется необходимость и возможность смены полосы для всех автомобилей. Затем на каждой полосе проводится независимое обновление в соответствии с правилами для однополосной модели, при этом используется конфигурация, полученная на первом этапе. Оба набора правил модифицированы и дополнены в соответствии с задачей учёта состояния дороги и ограничений скорости.

Необходимость смены полосы на левую (*CLN*) или правую (*CRN*) возникает в следующих случаях:

1. Если впереди на более низкой скорости движется автомобиль:

$$\begin{aligned} &\text{if } g_i(t-1) < v_i(t-1) \text{ and } v_i(t-1) > v_{i+1}(t-1) \\ &\text{then } CLN1 = \mathbf{T}, CRN1 = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (1)$$

Переменные g с различными индексами характеризуют взаимные расстояния между машинами и отмечены на рисунке 1. Выражения t и $t-1$ в скобках определяют значение соответствующих переменных на текущей и предыдущей итерациях.

2. Если значение функции оценки состояния дорожного покрытия q_s для соседней полосы на расстоянии d_q больше, чем для текущей:

$$\begin{aligned} &\text{if } q_s(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1), d_q) > q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) \\ &\text{then } CLN2 = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\text{if } q_s(m_i(t-1) + 1, n_i(t-1), d_q) > q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) \\ &\text{then } CRN2 = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (3)$$

Функция q_s оперирует тремя аргументами — полосой движения m , текущей ячейкой n и *дистанцией контроля состояния дороги* $d_q \in \mathbb{N}$ (значение принимается равным 30 м, или 5 ячейкам). Фактически,

значение функции есть результат суммирования индексов состояния ячеек s , причём если среди значений присутствует нуль, значение функции также обращается в нуль.

3. Смена полосы необходима при выполнении условий:

$$\begin{aligned} & \text{if } ((CLN1 \text{ and } CLN2) \\ & \quad \text{or } CLN2 \\ & \quad \text{or } (CLN1 \text{ and } q_s(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1), d_q) > 0)) \\ & \text{then } CLN = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } ((CRN1 \text{ and } CRN2) \\ & \quad \text{or } CRN2 \\ & \quad \text{or } (CRN1 \text{ and not } CLN \\ & \quad \quad \text{and } q_s(m_i(t-1) + 1, n_i(t-1), d_q) > 0)) \\ & \text{then } CRN = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (5)$$

Смена полосы на левую (CLO) или правую (CRO) возможна при выполнении следующих условий:

1. На соседней полосе впереди на расстоянии, большем g_i , нет других машин:

$$\text{if } g_{i+1}(t-1) > g_i(t-1) \text{ then } CLO1 = \mathbf{T}. \quad (6)$$

Приоритет отдаётся левосторонним перестроениям, поскольку правилами дорожного движения обгон справа запрещён. Если машина впереди имеет нулевую скорость, объезд справа разрешается:

$$\begin{aligned} & \text{if } g_{r_i}(t-1) > g_i(t-1) \text{ and } v_{i+1}(t-1) = 0 \\ & \text{then } CRO1 = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (7)$$

2. На соседней полосе позади на расстоянии $v_{max} + 1$ отсутствует другая машина, которой текущий автомобиль может помешать при перестроении. Единица прибавляется для исключения столкновений в результате применения правила “превышения скорости”, определение которого приведено далее.

$$\text{if } g_{lb_i}(t-1) > v_{max} + 1 \text{ then } CLO2 = \mathbf{T}. \quad (8)$$

$$\text{if } g_{rb_i}(t-1) > v_{max} + 1 \text{ then } CRO2 = \mathbf{T}. \quad (9)$$

3. На соседней полосе впереди на расстоянии d_q индекс состояния дороги отличен от нуля:

$$\begin{aligned} & \text{if } q_s(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1), d_q) > 0 \\ & \text{then } CLO3 = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } q_s(m_i(t-1) + 1, n_i(t-1), d_q) > 0 \\ & \text{then } CRO3 = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (11)$$

4. Смена полосы на левую (*CLO*) или правую (*CRO*) возможна при выполнении условий:

$$\begin{aligned} & \text{if } CLO1 \text{ and } CLO2 \text{ and } CLO3 \text{ and } m_i(t-1) - 1 \geq 0 \\ & \text{then } CLO = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } CRO1 \text{ and } CRO2 \text{ and } CRO3 \text{ and } m_i(t-1) + 1 < M \\ & \text{then } CRO = \mathbf{T}. \end{aligned} \quad (13)$$

При выполнении перечисленных условий с вероятностью p_c по чётным итерациям происходит перестроение влево, по нечётным — вправо (*CLT* и *CRT* — высказывания для индикации стремления водителя к движению по крайней левой или правой полосе). Со введением вероятности ($\xi(t)$ — случайная величина, распределённая равномерно) устраняется “пинг-понг эффект”; разделение направлений смены полосы по значению итерации исключает “конфликты распределения”.

1. Перестроение влево:

$$\begin{aligned} & \text{if } (CLN \text{ and } CLO) \\ & \text{and } (\xi(t) < p_c \text{ or } CLT) \text{ and } (t \bmod 2 = 0) \\ & \text{then } m_i(t) = m_i(t-1) - 1, \end{aligned} \quad (14)$$

где функция \bmod возвращает остаток от деления своих аргументов.

2. Перестроение вправо:

$$\begin{aligned} & \text{if not } CL \text{ and } (CRN \text{ and } CRO) \\ & \text{and } (\xi(t) < p_c \text{ or } CRT) \text{ and } (t \bmod 2 > 0) \\ & \text{then } m_i(t) = m_i(t-1) + 1. \end{aligned} \quad (15)$$

Передвижение машин по сетке автомата производится по классическим правилам однополосной модели, дополненным возможностью учёта локальных скоростных ограничений и рекомендованных скоростей для участков с заданными индексами состояния дороги. Для более адекватного отражения динамики автотранспортного потока модель включает правила медленного старта и пространственного упреждения. Набор правил определяется следующим образом:

1. Ускорение — в дополнение к правилу классической модели, новая скорость определяется локальным ограничением v_{lmax} , рекомендованной для участка дороги с заданным индексом состояния скоростью v_{rec} и, наконец, максимальной скоростью v_m , развиваемой машиной данного

типа c_i . Кроме того, с вероятностью p_{sts} в пределах дистанции d_{sts} срабатывает правило медленного старта (16). Новая скорость выбирается по формуле (17).

$$\begin{aligned} &\text{if } \xi(t) < p_{sts} \text{ and } v_i(t-1) = 0 \text{ and } g_i(t-1) \leq d_{sts} \\ &\text{then } v_i(t) = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} v_i(t) = \min(&v_i(t), v_i(t-1) + 1, v_{max}, \dots \\ &\dots v_{lmax}(m_i(t), n_i(t-1)), v_{rec}(s(m_i(t), n_i(t-1))), v_m(c_i)). \end{aligned} \quad (17)$$

2. Торможение — с вероятностью p_{sa} и в пределах дистанции d_{sa} срабатывает правило пространственного упреждения (18). Если скорость $v_i(t)$ больше дистанции до впереди идущей машины g_i , новое значение принимается равным этой дистанции (19).

$$\begin{aligned} &b_i(t) = 0. \\ &\text{if } \xi(t) < p_{sa} \text{ and } v_i(t-1) > 0 \text{ and } v_{i+1}(t-1) > 0 \\ &\quad \text{and } g_i(t-1) \leq d_{sa} \\ &\quad \text{and } (b_{i+1}(t-1) = 1 \text{ or } v_{i+1}(t-1) < v_i(t-1)) \\ &\text{then } v_i(t) = v_{i+1}(t-1), b_i(t) = 1. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{if } v_i(t) > g_i(t-1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t-1), b_i(t) = 1. \quad (19)$$

В выражении (18) параметр b_i характеризует состояние стоп-сигналов машины и может принимать одно из двух значений — 1 (сигнал включен) и 0 (выключен).

3. Случайное возмущение — вносит элемент стохастичности в поведение водителей, с вероятностью p уменьшая скорость движения на единицу. Если $v_i(t-1)=1$, замедление происходит только при $SSA = \mathbf{T}$:

$$\begin{aligned} &\text{if } \xi(t) < p \text{ and } (v_i(t-1) > 1 \text{ or } SSA) \\ &\text{then } v_i(t) = \max(v_i(t) - 1, 0). \end{aligned} \quad (20)$$

Как видно из выражения (20), если SSA имеет истинное значение, исчезают случайные остановки при движении с минимальной скоростью, что согласуется с рациональным поведением.

4. “Превышение скорости” — с вероятностью p_s водитель,двигающийся со скоростью v_{lmax} , превышает это значение на единицу:

$$\begin{aligned} &\text{if } \xi(t) < p_s \text{ and } v_i(t-1) = v_{lmax}(m_i(t), n_i(t-1)) \\ &\quad \text{and } v_i(t-1) + 1 < g_s(t-1) \text{ and } v_i(t-1) + 1 \leq v_m(c_i) \\ &\text{then } v_i(t) = v_i(t-1) + 1. \end{aligned} \quad (21)$$

5. Движение — перемещение машины в соответствии со вновь вычисленной скоростью:

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t). \quad (22)$$

На рисунке 2 приведена пространственно-временная диаграмма фрагмента автомата длиной 400 ячеек в течение 150 итераций ($k = 0, 40\%$), показывающая траектории движения машин в модели. Один из автомобилей в целях наглядности выделен чёрным цветом.

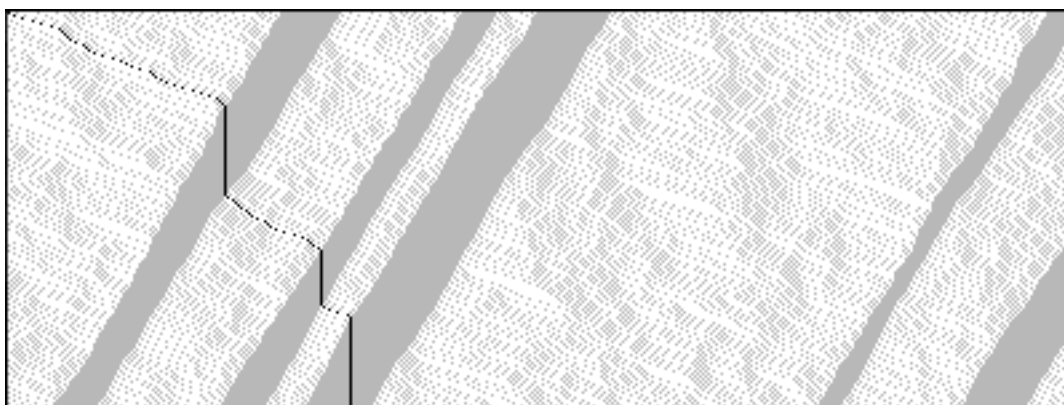


Рис. 2. Пространственно-временная диаграмма автомата

Представленная модель имитирует движение машин по линейному участку дороги, не связанному с другими магистралями. Для моделирования дорожного движения по сети дорог разработана модель УДС [7]. Дороги в ней связываются с помощью регулируемых и нерегулируемых перекрёстков, а также узлов, позволяющих представлять нелинейные участки дороги (повороты и т. п.).

В качестве основы модели пересечения магистралей применяется Т-образный перекрёсток — с каждой из четырёх “сторон” к нему может примыкать до двух дорог (для каждого направления). Контроль потока транспорта на *регулируемых перекрёстках* осуществляется с помощью светофоров. На *нерегулируемых перекрёстках*, или пересечениях с вышедшими из строя светофорами, регулирование осуществляется на основе приоритетов первоочередного движения.

Узлы предназначены для связи дорог одного направления (например, A и B) воедино и осуществляют передачу автомобилей с одной дороги на другую. При этом производится проверка наличия достаточного числа свободных ячеек на дороге B для размещения автомобиля. Если на ней имеется $u_i(t) = (n_i(t-1) + v_i(t) + 1) - N$ (u_i — количество “неиспользованных” ячеек на дороге A ; N — длина дороги A) свободных ячеек, координата автомобиля на дороге B становится $n_i(t) = u_i(t) - 1$ (рисунок 3а). Полоса движения остаётся неизменной. Если свободных ячеек меньше $u_i(t)$ (рисунок 3б), машина располагается в последней свободной ячейке $n_{fB} \in [0, u_i(t) - 1]$. Скорость машины

изменяется: $v_i(t) = N + n_{fB} - n_i(t-1)$. Если все $u_i(t)$ ячеек дороги B заняты (рисунок 3в), автомобиль помещается в последнюю свободную ячейку n_{fA} дороги A и остаётся там до тех пор, пока не появится возможность продолжить движение. Скорость машины при этом также уменьшается: $v_i(t) = n_{fA} - n_i(t)$.

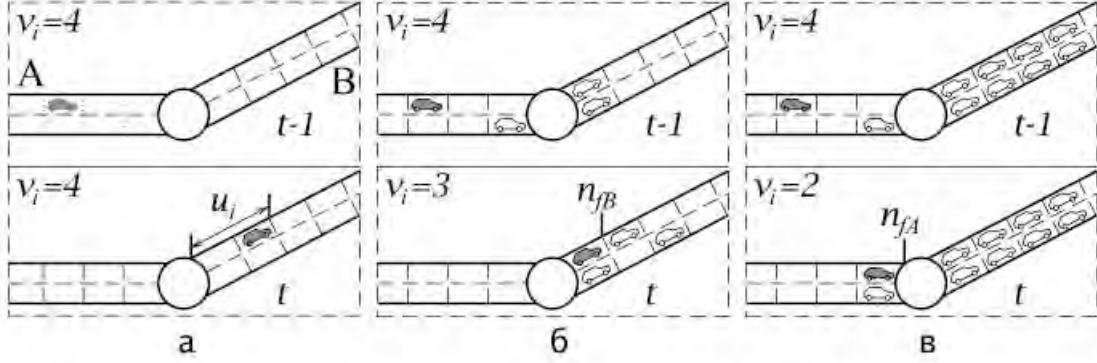


Рис. 3. Схема соединения дорог с помощью узлов

Регулирование потоков автотранспорта на пересечениях одного уровня осуществляется с помощью автомобильных светофоров. В модели сигналы светофора меняются в следующем порядке (начиная с разрешающего сигнала): зелёный (G) \rightarrow мигающий зелёный (GB) \rightarrow жёлтый (Y) \rightarrow красный (R) \rightarrow красный и жёлтый (RY) \rightarrow зелёный. Кроме того, светофор может быть неисправен, о чём сигнализируется с помощью мигающего жёлтого (YB). Каждое состояние светофора продолжается в течение заданного промежутка времени t_G , t_{GB} , t_Y и т. д. Набор правил передвижения модели (16–22) дополняется правилами реагирования на сигналы светофора (переменная g_{ls} показывает расстояние до ближайшего светофора):

1. Текущий сигнал — мигающий зелёный или жёлтый:

$$\begin{aligned}
 &\text{if } (LS = GB \text{ or } LS = Y) \text{ and } g_i(t-1) > g_{ls} \\
 &\quad \text{and } v_i(t-1) \geq v_{lmax}(m_i(t), n_i(t)) - 1 \\
 &\quad \text{and } g_i(t-1) > v_{lmax}(m_i(t), n_i(t)) \\
 &\quad \text{and } g_{ls} < v_{lmax}(m_i(t), n_i(t)) \\
 &\text{then } v_i(t) = v_i(t-1) + 1.
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{if } (LS = GB \text{ or } LS = Y) \text{ and } g_i(t-1) > g_{ls} \\
 &\quad \text{and } g_{ls} > v_i(t-1) + 1 \\
 &\text{then } v_i(t) = 1, b_i(t) = 1.
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{if } (LS = GB \text{ or } LS = Y) \text{ and } g_i(t-1) > g_{ls} \\
 &\quad \text{and } v_i(t-1) = 1 \text{ and } g_{ls} = 0 \\
 &\text{then } v_i(t) = 0, b_i(t) = 1.
 \end{aligned} \tag{25}$$

2. Текущий сигнал — красный:

$$\begin{aligned} &\text{if } LS = R \text{ and } g_i(t-1) > g_{ls} \text{ and } g_{ls} > 0 \text{ and } v_i(t) \geq 0 \\ &\text{then } v_i(t) = 1. \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} &\text{if } LS = R \text{ and } g_i(t-1) > g_{ls} \text{ and } g_{ls} = 0 \text{ and } v_i(t) \geq 1 \\ &\text{then } v_i(t) = 0, b_i(t) = 1. \end{aligned} \quad (27)$$

3. Если светофор неисправен ($LS = YB$), или сигнал зелёный ($LS = G$), машина продолжает движение с прежней скоростью:

$$\text{if } LS = G \text{ or } LS = YB \text{ then } v_i(t) = v_i(t). \quad (28)$$

Нередко на дорогах города встречаются нерегулируемые пересечения с пешеходными переходами. При этом часто такие пересечения имеют место на магистралях с высокой интенсивностью движения, снижая их пропускную способность. Моделирование таких случаев осуществляется с помощью соответствующей модели перехода, работа которого определяется вероятностью появления пешеходов p_p и временем t_p , необходимым для перехода. В случае появления пешехода участок блокируется в течение периода t_p , имитируя ожидание водителей перехода дорожки пешеходами.

Для проведения численных экспериментов была разработана программная реализация модели на языке C#. Выбор обусловлен поддержкой объектно-ориентированного подхода, кроссплатформенностью, а также бóльшим быстродействием при обработке массивов, чем в альтернативных языках (Java, Visual Basic .NET). Благодаря объектно-ориентированному подходу основные сущности модели (автомобиль, дорожный сегмент, светофор и т. д.) представлены в виде набора атрибутов и методов, удобном для манипуляций. Собственно автомат реализован в виде массива массивов (англ. *array of arrays*), обработка которого производится быстрее по сравнению с его многомерным аналогом. На рисунке 4 показан пример визуализации модели УДС участка города площадью 25 км² и протяжённостью 37 км.

Третья глава посвящена анализу адекватности разработанной модели с использованием опытных данных и применению её к некоторым практическим задачам.

В целях сбора опытных сведений проведено натурное обследование структуры и динамики автотранспортных потоков на нескольких участках УДС г. Омска с использованием видеокамеры и последующей камеральной обработкой материала. Для определения соответствия динамики движения отдельной машины в модели реальным данным проведён ряд заездов по специально разработанному маршруту протяжённостью 14,8 км и включающему регулируемые перекрёстки, участки с повреждённым покрытием, нерегулируемые пешеходные переходы и трамвайные переезды, а также участки со

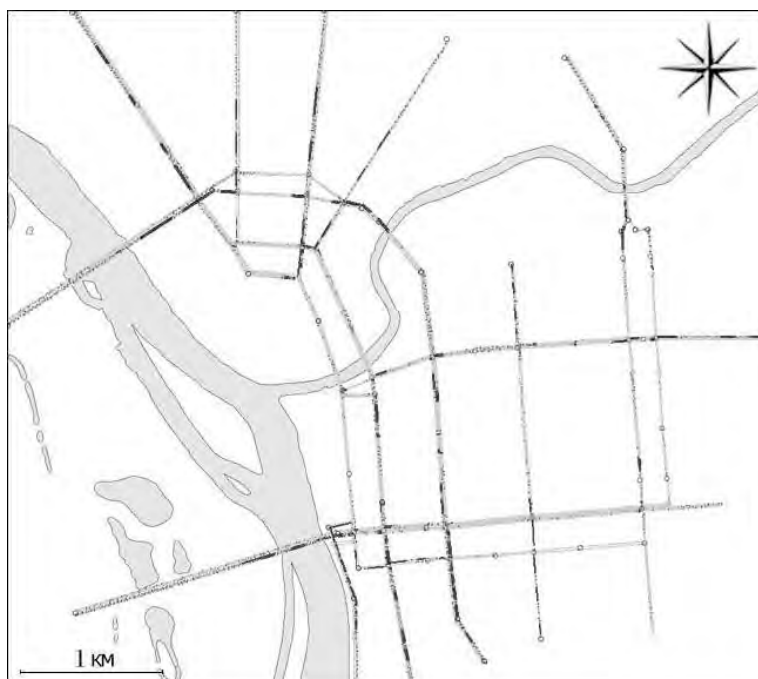


Рис. 4. Пример визуализации модели участка УДС г. Омска

скоростными ограничениями. Отснято 27 часов записи движения потока машин и 6 часов движения на автомобиле по маршруту.

Видеоданные проанализированы для получения сведений о структуре автотранспортного потока, средней скорости движения, а также для калибровки модели. Скорость машин измерялась с помощью разработанного метода анализа видеоматериала, заключающегося в выборе области, ограниченной сечениями А и Б, определения расстояния между ними и замере времени её преодоления автомобилем. Контрольные замеры, проведённые по видеозаписи движения автомобиля с заданной скоростью, подтверждают соответствие результатов применения метода опытным данным.

Калибровка ряда параметров модели проводилась на основе полученного видеоматериала. Установлено, что вероятность случайной (не обусловленной необходимостью обгона или объезда препятствия) смены полосы p_c составляет 5%; дистанция, которую выдерживают 50–70% водителей перед началом движения в режиме старт-стоп, составляет приблизительно 5 м. На основе замера скорости распространения ударных волн в заторе (11,52 км/ч) было выбрано значение вероятности медленного старта $p_{sts} = 0,68$; дистанция медленного старта d_{sts} составила 1 ячейку. Значения остальных параметров: вероятность случайного замедления $p = 0,20$; вероятность срабатывания правила пространственного упреждения $p_{sa} = 0,80$; вероятность превышения скорости $p_s = 0,70$; дистанция пространственного упреждения $d_{sa} = 5$.

Для проверки соответствия средней скорости потока машин в модели и опыте проведена серия численных экспериментов, заключавшихся в моде-

лировании движения машин при заданной плотности и структуре потока. Результаты показывают расхождение значения средней скорости с опытом, в среднем, не более чем ± 7 км/ч.

Для проверки адекватности отображения динамики отдельно взятого транспортного средства построена модель участка УДС г. Омска, дублирующая размещение нерегулируемых пешеходных переходов, знаков дорожного движения, участков с повреждённым дорожным полотном. С помощью серии численных экспериментов получены данные о средней скорости движения машины, времени простоя в заторах, общем времени прохождения маршрута. На основе непараметрического статистического критерия показано соответствие результатов моделирования опытными данными.

С применением модели исследованы проблемные участки УДС: магистрали с высокой интенсивностью движения (более 800 авт/ч), имеющие пересечения с трамвайными путями и пешеходными переходами. Целью этих экспериментов было определение целесообразности устранения помех движению для повышения пропускной способности.

В первом случае имелась четырёхполосная (в одном направлении) дорога (ул. Масленникова), пересекающаяся с трамвайным переездом. Данные контрольных заездов и видеоматериала с соответствующего перекрёстка показывают, что при преодолении переезда водители снижают скорость движения до 20–30 км/ч, что вызвано выбоинами, образующимися на асфальтовом покрытии переезда при вибрации головки рельса. Данные моделирования исходной ситуации и случая замены покрытия альтернативным резинокордовым, позволяющим двигаться без снижения скорости, свидетельствуют о приросте пропускной способности участка дороги на 650 авт/ч (при текущем показателе в 4319 авт/ч), что составляет 15% и говорит о целесообразности замены. На рисунке 5 показана зависимость пропускной способности дороги для исходного и альтернативного покрытий, полученная с помощью численного эксперимента.

Нерегулируемые пешеходные переходы, расположенные на оживлённых магистралях, также являются существенной помехой движению. Так, например, в г. Омске по ул. Маркса такой переход расположен недалеко от остановки общественного транспорта и является востребованным. При появлении пешеходов движение на трёхполосной (в одном направлении) дороге останавливается на 15–25 секунд, в течение которых успевают образоваться заторы. Альтернативой нерегулируемому переходу может служить светофорный объект, обеспечивающий достаточное время для преодоления дороги пешеходами, а также не являющийся существенной помехой для автотранспорта. Для обеих ситуаций были проведены численные эксперименты (при $p_p = 0, 10$), показывающие, что внедрение регулируемого перехода позволяет повысить пропускную способность в часы наибольшей интенсивности движения более чем

в два раза (с 1927 авт/ч до 4072 авт/ч) (рисунок 6). Кроме того, на 12 км/ч возрастает средняя скорость движения (которая в случае нерегулируемого перехода составляет 10 км/ч), что в совокупности определяет необходимость внесения изменений на этом участке.

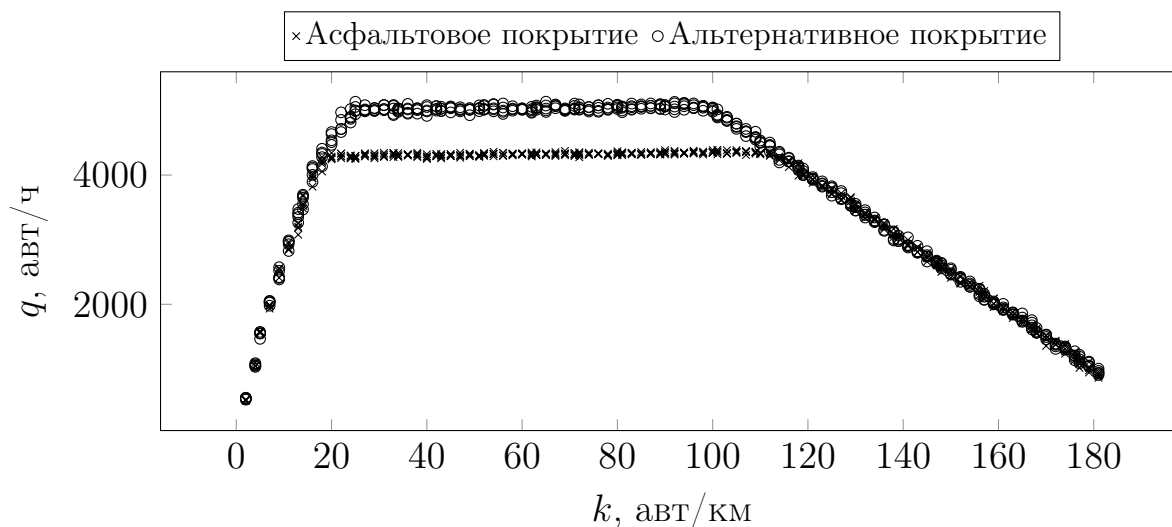


Рис. 5. Диаграмма зависимости пропускной способности от плотности движения для трамвайного переезда с асфальтовым и альтернативными покрытиями

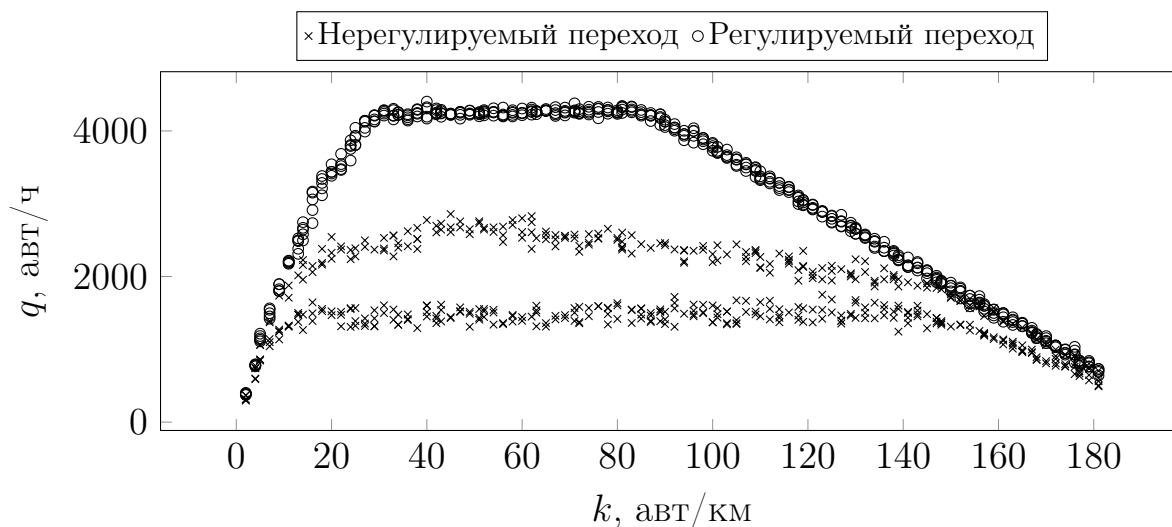


Рис. 6. Диаграмма зависимости пропускной способности от плотности движения для участка дороги с нерегулируемым и регулируемым переходами

Благодаря возможности разделения автомобилей по типам с помощью методики, разработанной Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды (от 1999 г.), проведена оценка суточных выбросов загрязняющих веществ (далее ЗВ). Имеющиеся данные об интенсивности и структуре потока машин на ул. Конева были использованы для генерации аналогичного потока автомобилей в модели. Численный эксперимент

проводился в течение 86 400 итераций (что соответствует 24 часам реального времени), при этом каждый час модельного времени интенсивность и структура движения на дороге менялись в соответствии с опытными данными. Как показывают результаты моделирования, итогом движения 14 328 легковых автомобилей, 1 271 грузового автомобиля и 378 автобусов в пределах 800-метрового участка магистрали является выброс приблизительно 100 кг ЗВ, в том числе 81 кг оксида углерода, 8 кг оксида азота, 10 кг соединений углерода (рисунок 7) и 500 г других веществ (сажи, оксида серы, формальдегида, свинца и бенз(а)пирена).

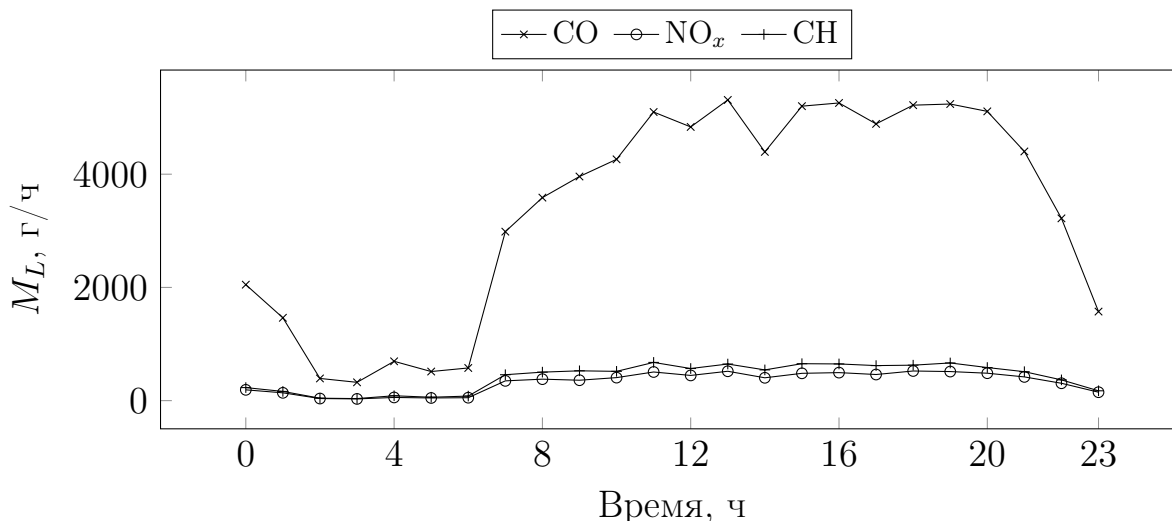


Рис. 7. Диаграмма выбросов загрязняющих веществ в течение суток

В заключении подведены итоги по основным результатам работы:

1. Исследование существующих подходов к моделированию автотранспортных потоков показало, что предъявляемые аналитическими моделями требования к условиям проведения экспериментов (равновесие потока и взаимно однозначная зависимость скорости и плотности) делают область их применения ограниченной. В то же время альтернативный имитационный подход на основе клеточных автоматов позволяет получать аналогичные результаты при отсутствии названных ограничений.
2. Разработана имитационная модель многополосного движения разнородных потоков автотранспорта, основанная на стохастическом транспортном клеточном автомате. Впервые в модель введены дополнительные правила, позволяющие учитывать эксплуатационное состояние дороги и локальные скоростные ограничения, устанавливаемые знаками дорожного движения. На базе имитационной модели построена модель УДС, включающая узлы, регулируемые и нерегулируемые перекрестки и пешеходные переходы.

3. Разработан программный инструментарий, представляющий собой библиотеку классов, предназначенную для решения широкого круга задач. Библиотека использована при проведении численных экспериментов.
4. Проведено обследование структуры и динамики автотранспортных потоков участков УДС г. Омска с высокой интенсивностью движения. На основе полученных данных проведена калибровка модели.
5. Разработан метод оценки скорости транспортных средств на основе видеозаписи, результаты которого находятся в согласии с опытными данными.
6. Обоснована адекватность модели, при этом результаты проверки показывают, что статистика движения как отдельно взятого транспортного средства, так и потока в целом, соответствует данным наблюдений.
7. Благодаря возможности задания дорожных условий с помощью разработанной модели проведена количественная оценка целесообразности реконструкции или модернизации некоторых участков УДС г. Омска.
8. С использованием модели проведена оценка суточных выбросов ЗВ на одном из участков УДС г. Омска. Полученные таким образом данные могут быть использованы для сопоставления с предельно допустимыми концентрациями и принятия соответствующих мер по предупреждению негативных последствий движения автотранспорта или борьбы с ними.

Список публикаций

1. Долгушин Д. Ю., Мызникова Т. А. Многофакторная модель дорожного движения города на основе клеточных автоматов // Материалы 62 научно-технической конференции СибАДИ / СибАДИ. Омск: 2008. С. 109–113.
2. Долгушин Д. Ю., Мызникова Т. А. Моделирование транспортных потоков города на основе клеточных автоматов // Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал. 2008. № 2 (8). С. 18–23.
3. Долгушин Д. Ю., Мызникова Т. А. Имитационное моделирование дорожного движения для оценки экологического влияния автотранспорта // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 4.1 (38). С. 139–142.