

© 2021 г. В.М. СТАРОЖИЛЕЦ (starvsevol@gmail.com),
Ю.В. ЧЕХОВИЧ, канд. физ.-мат. наук (chegovich@forecsys.ru)
(Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН, Москва)

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К СТАТИСТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА МКАД И УПРАВЛЕНИЮ ВЪЕЗДАМИ¹

Работа посвящена математическому моделированию транспортных потоков в большой автомобильной сети. Использована предложенная авторами статистическая модель транспортных потоков, предназначенная для полномасштабного моделирования функционирования транспортных систем значительного размера в течение длительных интервалов времени. Построена модель одной из сторон МКАД и проведены эксперименты для двух путей возникновения заторного движения на магистрали. В обоих типах экспериментов проведена проверка на работоспособность наивной модели управления въездами. Показана эффективность с точки зрения временных потерь на проезд по автомагистрали даже простейшего метода ограничения входного потока.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков, фундаментальная диаграмма потоков, группы автомобильно-транспортных средств (АТС), МКАД, моделирование автомагистрали.

DOI: 10.31857/S0005231021110088

1. Введение

В работе рассматривается проблема математического моделирования автомобильных транспортных потоков в рамках транспортных систем значительных масштабов. Непосредственно рассматривается задача применения математической модели, описанной в [1], к моделированию конкретной транспортной магистрали — Московской кольцевой автомобильной дороги (МКАД). Целью моделирования является проверка гипотезы о возможности посредством управления потоком въезжающих на магистраль автомобильно-транспортных средств (АТС) уменьшить суммарные потери времени на МКАД и увеличить пропускную способность автомагистрали.

На сегодняшний день моделирование крупных транспортных сетей представлено в [2, 3] в виде примеров применения существующих программных

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-01057 А).

пакетов, таких как SUMO (Simulation of Urban Mobility), iTETRIS (An Integrated Wireless and Traffic Platform for Real-Time Road Traffic Management Solutions) и др. Детальное описание подхода к моделированию автомагистрали в данных пакетах зачастую отсутствует.

В [1] предложена математическая модель, свойства которой были исследованы на модельных элементарных фрагментах транспортной сети. Эта модель создавалась для расчетов пропускной способности в различных режимах работы транспортных графов значительного масштаба, включающих тысячи сегментов и имеющих протяженность десятки километров. Модель основана на оригинальном мезоскопическом подходе, оперирующем в качестве объектов моделирования группами автомобильных транспортных средств (АТС), объединяющими автомобили со сходными параметрами, находящимися на одном сегменте транспортного графа. Скорость групп автомобилей рассчитывается с помощью фундаментальной диаграммы поток-плотность на магистрали [4]. Такой подход позволяет быстро обчислять достаточно большие транспортные сети, в том числе такую магистраль, как МКАД, что необходимо для решения оптимизационных задач, для которых проводится моделирование.

Данный подход отличается от двух классических направлений к моделированию транспортных потоков, представленных микроскопическим подходом, основанным на моделировании движения каждого отдельного автомобиля [5–8], и макроскопическим подходом, опирающимся на сходство движения АТС с жидкостью или газом [9–12].

Моделирование транспортных потоков на автомагистрали тесно связано с задачей оптимизации светофорного управления в транспортной сети [13]. Так, в [14, 15] используется обучение с подкреплением для получения оптимальной схемы управления перекрестком. В [16] конструируется адаптивное управление светофором на перекрестке на основе загруженности сегментов дороги за ним, а в [17] строится модель выхлопов от автомобилей и целью светофорного управления задается минимизация выхлопов.

Из мезоскопических моделей можно выделить [18], где рассматривается комбинация микро-, мезо- и макроскопических моделей для расчета выделения углекислого газа в атмосферу в транспортной сети, а также [19], где мезоскопическая модель используется для моделирования пешеходного движения, однако в ней проводятся расчеты вычислительной сложности полученной модели и проводится сравнение зависимости вычислительных затрат относительно плотности потока пешеходов для рассматриваемой мезоскопической модели и выбранных микро- и макромоделей.

В большинстве работ, посвященных светофорному управлению, дороги на перекрестке считаются равнозначными и не ставится задача обеспечения максимальной пропускной способности выделенной автомагистрали, как это происходит в данной статье.

В данной работе строится модель одной из сторон МКАД с крупными въездами и съездами с нее. На основе имеющихся данных с дорожных датчиков на некоторых из въездов и статистических данных Центра органи-

зации дорожного движения генерируются модельные данные на въездах на автомагистраль двух типов: с утренней пиковой загрузкой и с вечерней, что соответствует большому потоку автомобилей в Москву и из Москвы. Проводится моделирование поведения автомагистрали с различным модельными данными на въездах и сравниваются результаты с контролем на въездах и без него. Для проверки гипотезы об эффективности управления въездами рассчитываются временные потери на проезд по МКАД за день, а также число автомобилей, проехавших по автомагистрали.

2. Описание модели

Опишем кратко ранее разработанную процедуру моделирования, представленную детально в [1].

В модели транспортная сеть представляет из себя связный ориентированный граф $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$, где \mathbf{V} – множество вершин, $\mathbf{E} = \{(i, j)\}$ – множество ветвей графа с ограничением на степень вершин $d(i)$: $\min(d(i)) = 1$ и $\max(d(i)) = 3$. Причем не существует вершины с $d(i) > 1$, в которой только заканчивалось бы несколько ветвей или только начиналось бы несколько ветвей. Таким образом, рассматриваются только автомагистрали, на которых не может быть перекрестков, только съезды либо въезды на магистраль.

Каждая ветвь модели характеризуется следующими свойствами:

1. Длина ветви – $l_{i,j}$.
2. Число полос, по которым разрешено движение автомобилей по данной ветви – $n_{i,j}$.
3. $I_{i,j} = \{0, 1\}$ – идентификатор того, является ветвь съездом или нет. Если является, то $I_{i,j} = 1$.
4. Функция скорости для данной ветви – $V = f_{i,j}(\rho)$, $f_{i,j} : \mathbb{Q}_+ \rightarrow \mathbb{Q}_+$, где $\rho \in \mathbb{R}_+$ – плотность АТС. В данной работе рассматриваются только ограниченные непрерывные монотонно убывающие функции скорости. Процедура получения данной функции из экспериментальных данных детально описана в [4].
5. Матрица перемешивания в узле j в момент времени t задается функцией $M_j(t)$. Причем для узлов j , из которых в модели нет съезда, $M_j(t) = 0$, т.е. автомобили либо продолжают движение по автомагистрали, либо данный узел инцидентен ветви-стоку, на которой автомобили в модели заканчивают свое движение.
6. Интенсивность источника в узле i в момент времени t задается функцией $F_i(t)$. Для всех узлов i , не являющихся источниками в модели, $F_i(t) = 0$.

В модели по ветвям графа движутся не отдельные автомобили, а группы автомобильно-транспортных средств (АТС): $\mathbf{A}_k^t = \{\text{Pos}_k, V_k, N_k\}$, обладающие следующими характеристиками:

1. Pos_k – позиция начала группы относительно начала ветви, на которой она расположена.

2. V_k — скорость группы АТС.
3. N_k — размер группы АТС из $\mathbb{R}_{\geq 0} = \mathbb{R}_+$.

Пусть теперь $\mathbf{A}_{i,j}^t = \{\mathbf{A}_k^t\}$ — упорядоченное множество автомобильных групп на ветви (i, j) . Причем $\forall l, m : l < m \rightarrow \text{Pos}_l > \text{Pos}_m$ — группы не могут обгонять друг друга.

Таким образом, вводится состояние системы в момент времени t как $\mathbf{A}^t = \{\mathbf{A}_{i,j}^t\} \cup \{A_{\text{out},i,j}^t\}$, т.е. положение, скорость, размер и тип всех автомобильных групп на всех ветвях дорожно-транспортной сети. Группы АТС $\{A_{\text{out},i,j}^t\}$ представляют собой специальные группы-буферы для обработки очередей на съездах с автомагистралями.

Переход от времени t ко времени $t + \tau$ осуществляется с помощью последовательного выполнения следующей процедуры:

1. Удаляем все группы АТС, находящиеся на ветвях-стоках.
2. Формируем новые группы АТС во всех узлах-источниках.
3. Пусть \mathbf{C} — некоторое подмножество ветвей графа. Будем выполнять следующие действия, пока оно не пусто:
 - (a) Исходно \mathbf{C} — множество всех ветвей-стоков.
 - (b) $\forall (i, j) \in \mathbf{C} \rightarrow \forall \mathbf{A}_k^t \in \mathbf{A}_{i,j}^t$ — для каждой группы АТС рассчитываем ее новое положение. Расчет производится упорядоченно по убыванию величины Pos_k , причем группы-буферы обсчитываются первыми.
 - (c) $\mathbf{C}' = \{(k, i)\} : \exists j : (i, j) \in \mathbf{C}$ — формируем новое подмножество для расчетов.
 - (d) $\mathbf{C} = \mathbf{C}'$.
4. $\forall (i, j) \in \mathbf{E} \rightarrow \forall \mathbf{A}_k^t \in \mathbf{A}_{i,j}^t$ — объединяем группы АТС, если это возможно.

3. Построение модели МКАД

Модель транспортной сети в данной работе представляет из себя связанный ориентированный граф \mathbf{G} . Данный граф строится на основе топологии МКАД и прилегающих к нему дорог. При построении графа вручную размечаются основные ребра-въезды на автомагистраль и ребра-съезды с автомагистралей. Причем разметка въездов разделяет их на два типа — въезды с магистралей, направленных в Москву, и с магистралей, направленных из Москвы. Это нужно ввиду того, что пиковый поток на этих двух типах въездов приходится на разное время суток.

Поскольку в топологии не выделены сегменты, отвечающие за сам МКАД, но указаны координаты каждого ребра, то выделение автомагистрали проводится следующим образом:

1. Выбирается один сегмент i на автомагистрали; так как координаты начала и конца сегмента известны, то можем представить его как вектор \mathbf{i} .

2. Ищутся все сегменты топологии, идущие после него, и считается их векторное представление. Обозначим множество этих векторов через \mathbf{S} .
3. $\forall \mathbf{j} \in \mathbf{S}$ — рассчитываем угол между векторами $(\mathbf{i}; \mathbf{j})$ и выбираем сегмент с наименьшим углом как продолжение магистрали \mathbf{i}' .
4. Возвращаемся к пункту 1 с $\mathbf{i} = \mathbf{i}'$, пока не вернулись в исходный сегмент (для МКАД) или не достигнем ее конца (в этом случае требуется задать сегмент — конец автомагистрали).

Данная процедура значительно уменьшает объемы ручной работы для формирования графа \mathbf{G} . Однако она все же допускает ошибки и требуется формирование небольшого списка сегментов топологии, точно не являющихся искомой автомагистралью. В данной работе этот список состоит из 14 сегментов. Все еще требуется вручную разметить основные въезды и съезды с автомагистрали, однако можно проигнорировать незначительные, т.е. съезды на небольшие прилегающие дороги и въезды на них, поток на которых пренебрежимо мал для целей этой работы.

В результате работы по данному алгоритму получен связный ориентированный граф \mathbf{G} одной из сторон МКАД со всеми необходимыми въездами и съездами.

4. Генерация синтетических данных на въездах

Ввиду отсутствия открытых источников данных с дорожных датчиков на въездах требуется сгенерировать реалистичный поток автомобилей синтетически. По информации от ЦОДД [20] по всему МКАД за сутки проезжает 1,36 млн автомобилей (т.е. приблизительно 680 тысяч АТС по одной стороне),

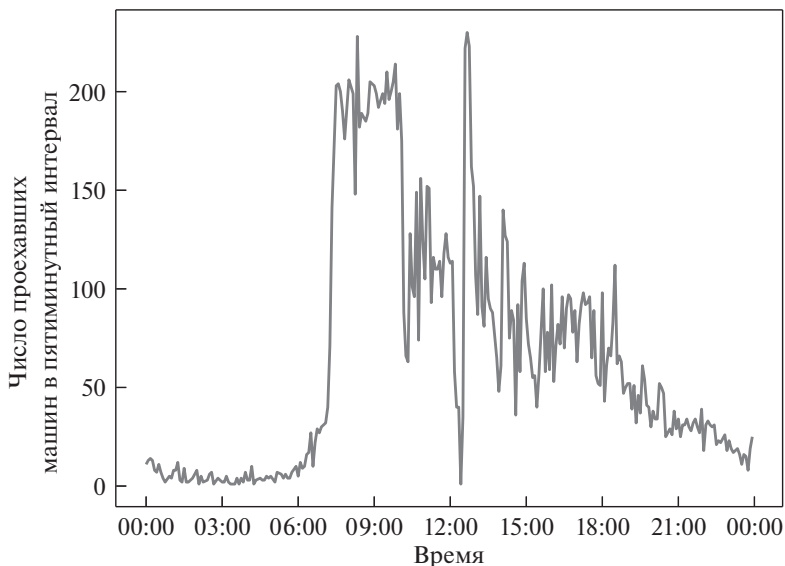


Рис. 1. Данные с дорожного датчика за один день. Пиковая нагрузка 45 АТС/мин в 8:20.



Рис. 2. Типичные пробки по понедельникам в 18:15 на основе статистики сервиса «Яндекс-пробки» транспортной сети Москвы и МКАД, в частности по состоянию на 16.05.21.

а по имеющимся данным с дорожных датчиков пиковый поток АТС на въезде составляет 60 АТС/мин. Пример данных с дорожных датчиков показан на рис. 1.

Таким образом, в экспериментах функции входного потока на въездах строились так, чтобы походить на данные с реального дорожного детектора и соответствовали информации о пиковой (или средней, если это требовалось) нагрузке на въезде и числу проезжающих по автомагистрали за день АТС.

Как говорилось выше, все въезды также вручную были разделены на два класса:

1. Въезды с магистралей по направлению из Москвы, на которых поток АТС нарастает ближе к вечеру.
2. Въезды с магистралей по направлению в Москву, на которых поток АТС нарастает утром и спадает к вечеру.

5. Описание данных

В работе проводится моделирование внешней стороны МКАД (рис. 2). Для построения графа использовалась топология, взятая у компании Яндекс в 2014 г. Полученная топология, а также увеличенный участок МКАД со съездами и въездами изображены на рис. 3.

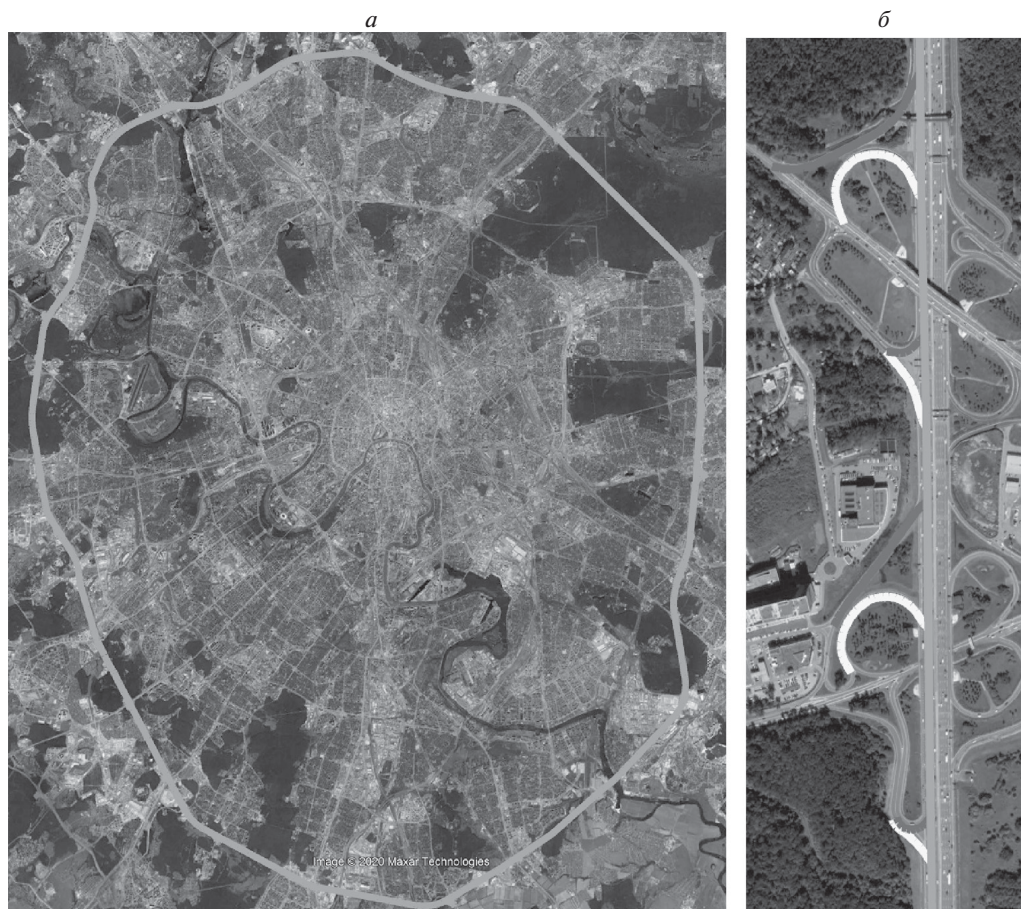


Рис. 3. *а*) Вид расчетного графа МКАД, полученного с помощью топологии компании Яндекс, *б*) конфигурация въездов и съездов с МКАД в полученном на основе топологии компании Яндекс графе. Темная вертикальная линия — МКАД, светло-серая — въезды на магистраль, темная — съезды с нее.

В данной работе во всех экспериментах использовались фундаментальные диаграммы поток-плотность, полученные анализом реальных данных с дорожных датчиков за 2012 г. Построение фундаментальной диаграммы сводится к следующим шагам:

1. Для каждого надежного датчика на выбранном участке дороги извлекаем данные измерений плотности и потока за наблюдаемый период времени. Каждая точка на диаграмме определяется парой значений «плотность-поток» на плоскости $Q(\rho)$.
2. Проводим фильтрацию выбросов путем построения альфа-оболочек облака точек диаграммы до тех пор, пока разница площадей оболочек для двух смежных итераций не будет мала.
3. Находим опорные точки на границе облака точек диаграммы и строим на их основе функцию-ограничивающую, которую и принимаем за фундаментальную диаграмму поток-плотность.

Детально процедура построения фундаментальной диаграммы описана в [4].

6. Вычислительные эксперименты

Проведены следующие группы вычислительных экспериментов:

1. Эксперименты со средней, но продолжительной, пиковой загрузкой на въезды с проверкой эффекта от динамического ограничения входного потока в зависимости от состояния автомагистрали.
2. Эксперименты с высокой, но непродолжительной, пиковой загрузкой въездов (что более соответствует данным от ЦОДД) с проверкой эффекта от динамического ограничения входного потока в зависимости от состояния автомагистрали.
3. Эксперименты с длинными въездами с высокой, но непродолжительной, пиковой загрузкой въездов с проверкой эффекта от динамического ограничения входного потока в зависимости от состояния автомагистрали. В данной группе экспериментов максимальная длина очереди на въездах на МКАД увеличена для расчетов времени ожидания на въезде на магистраль без управления въездами и с ним.

В связи с отсутствием реальных данных о числе покидающих автомагистраль транспортных средств в каждый момент времени считаем эту долю фиксированной и выбранной из следующих соображений:

- 1) проезжать более половины МКАД в одну сторону неосмысленно, так как в данном случае можно поехать в другую сторону;
- 2) на половине МКАД в рассматриваемой модели 32 съезда.

Таким образом, если x — доля съезжающих на каждом съезде АТС, то величина $(1 - x)^{30}$ должна быть мала. В экспериментах используется величина $x = 12\%$.

В каждой группе экспериментов также проводится моделирование ситуации установки светофора на въездах на автомагистраль. В таком случае алгоритм ограничения входного потока на МКАД выглядит следующим образом:

- Для каждого сегмента автомагистрали по направлению движения АТС после рассматриваемого въезда посчитаем плотность автомобилей ρ на ней.
- В зависимости от величины $\rho_{\text{opt}} - \rho$, где ρ_{opt} — плотность, при которой достигается максимальный поток на рассматриваемом сегменте автомагистрали, входной поток ограничивается на $l < l_{\text{max}}$ процентов.
- Ограничения для каждого из сегментов складываются и получается результирующее понижение входного потока АТС.

Важной характеристикой моделируемой системы считаем временные потери на проезд по транспортной сети относительно пустой автомагистрали, т.е. автомагистрали, по которой возможно движение АТС с максимально допустимой скоростью. Каждую минуту рассчитывается среднее продвижение каждого автомобиля в модели и сравнивается с расстоянием, которое он мог бы преодолеть по пустой магистрали. Это преобразуется в график временных потерь, который трактуется как время простоя автомобиля в транспортной сети за минуту.

7. Эксперименты со средней загрузкой

В данной группе экспериментов въезды считаются однополосными и функции входного потока изображены на рис. 4. В данном случае есть два типа въездов на автомагистраль — с утренней и вечерней пиковыми нагрузками в течение трех часов.

7.1. Эксперимент без управления въездами

Результаты моделирования автомагистрали при такой конфигурации въездов представлены на рис. 5. Число реально въехавших автомобилей и коли-

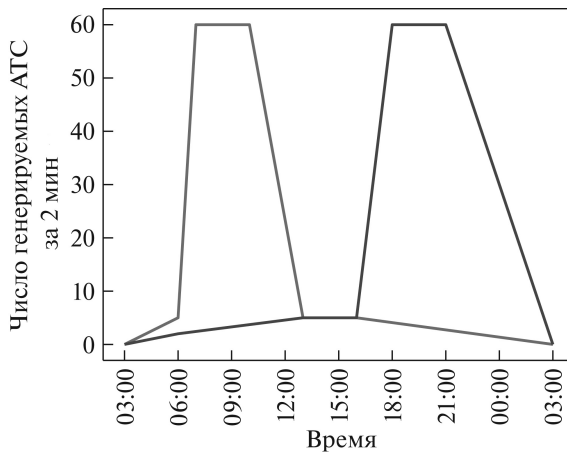


Рис. 4. Графики загрузки двух типов въездов — с утренней и вечерней пиковыми нагрузками в эксперименте со средней загрузкой.

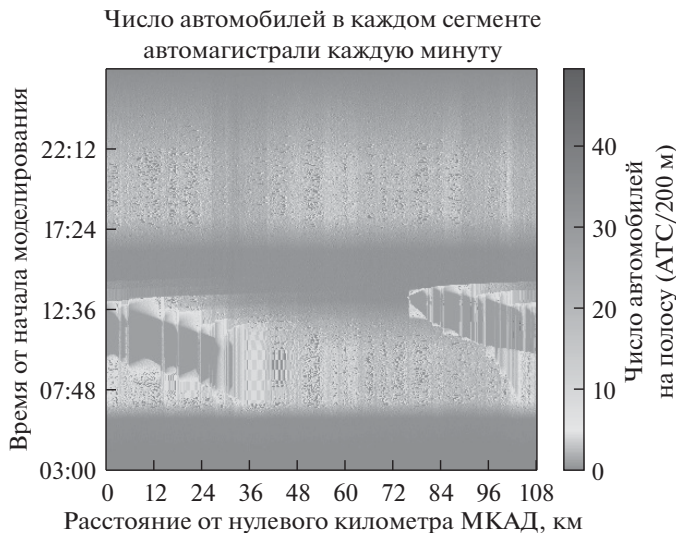


Рис. 5. Количество автомобилей на полосе в модели транспортной сети за день в эксперименте со средней загрузкой.

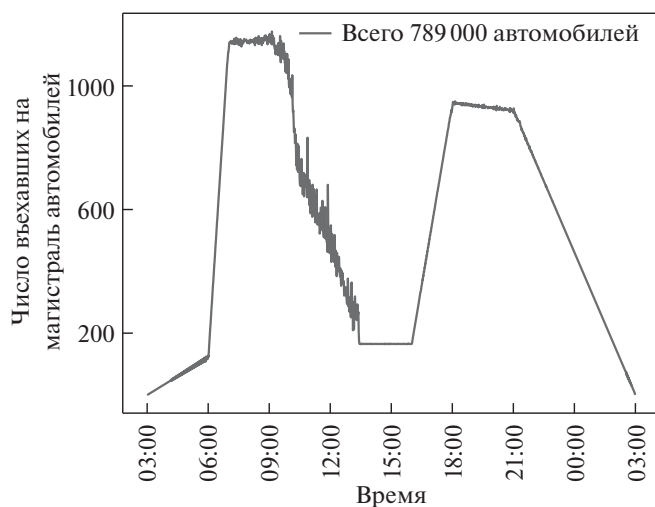


Рис. 6. График суммарно въехавшего на автомагистраль со всех въездов числа автомобилей в эксперименте со средней загрузкой.

чество проехавших за день по транспортной сети АТС изображены на рис. 6. График временных потерь — на рис. 7.

Видно, что при такой конфигурации входных потоков заторы возникают всего в нескольких местах и потом со временем распространяются по автомагистрали. Так как пробки успевают исчезнуть к вечеру, то МКАД не останавливается полностью, хотя при меньшей доли съезжающих автомобилей это произойдет.

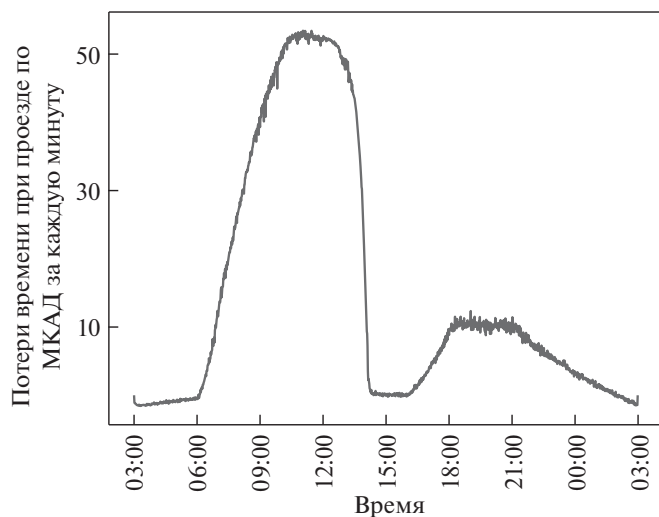


Рис. 7. Временные потери на проезд по автомагистрали в эксперименте со средней загрузкой.

7.2. Эксперимент с управлением въездами

Промоделируем ситуацию, в которой при увеличении потока на автомагистрали будем ограничивать поток с ближайших въездов на автомагистраль искусственно, например с помощью светофора. В данном эксперименте можем перекрывать въезд вплоть до 80% в зависимости от плотности автомо-

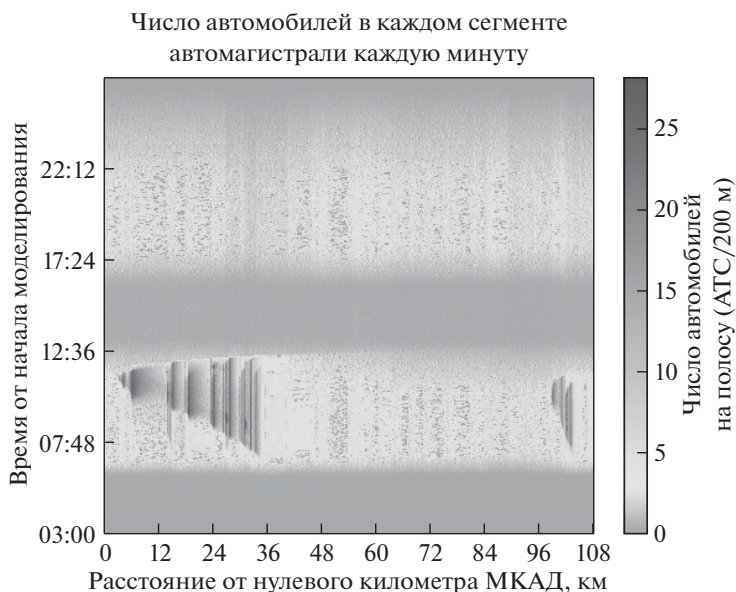


Рис. 8. Количество автомобилей на полосе в модели транспортной сети за день в эксперименте со средней загрузкой с управлением въездами.

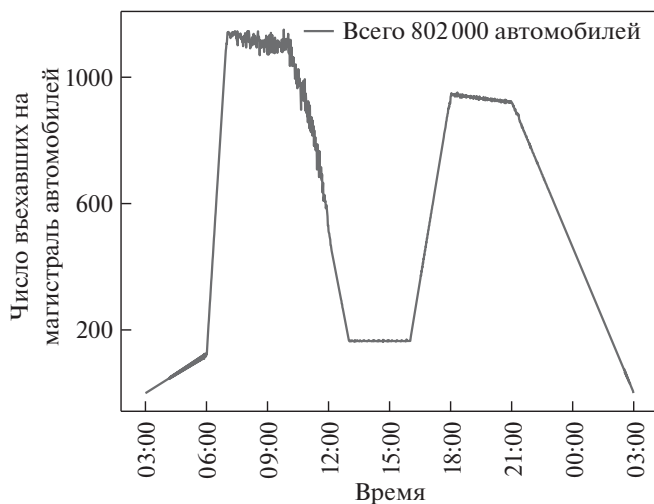


Рис. 9. График суммарно въехавшего на автомагистраль со всех въездов числа автомобилей в эксперименте со средней загрузкой с управлением въездами.

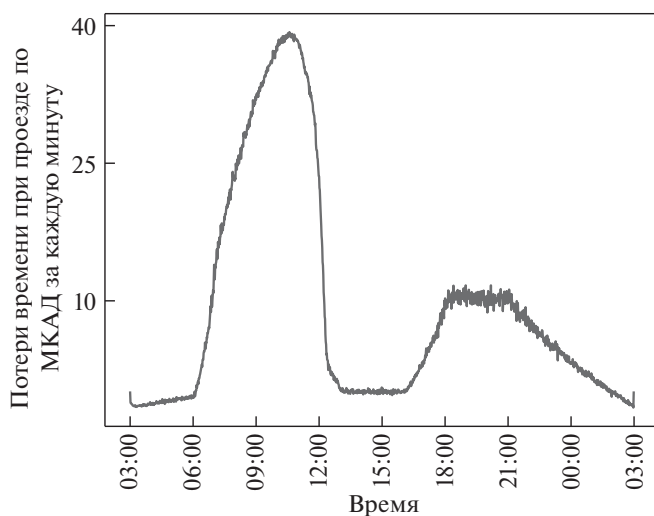


Рис. 10. Временные потери на проезд по автомагистрали в эксперименте со средней загрузкой с управлением въездами.

билей на магистрали. Результаты моделирования при такой конфигурации въездов представлены на рис. 8. Число реально въехавших автомобилей и количество проехавших за день по транспортной сети АТС изображены на рис. 9. График временных потерь проезда по всей автомагистрали представлен на рис. 10.

На графиках видно уменьшение времени затора на МКАД, а также небольшое увеличение числа проехавших автомобилей. Однако временные потери на проезд по автомагистрали значительно снизились. Интегральная

разность между графиками временных потерь на рис. 7 и 10 составляет около 4, 5 мин.

8. Эксперименты с высокой загрузкой

В данной группе экспериментов въезды считаются двухполосными и функции входного потока изображены на рис. 11. В данном случае есть два типа въездов на автомагистраль — с утренней и вечерней пиковыми загрузками в течение трех часов.

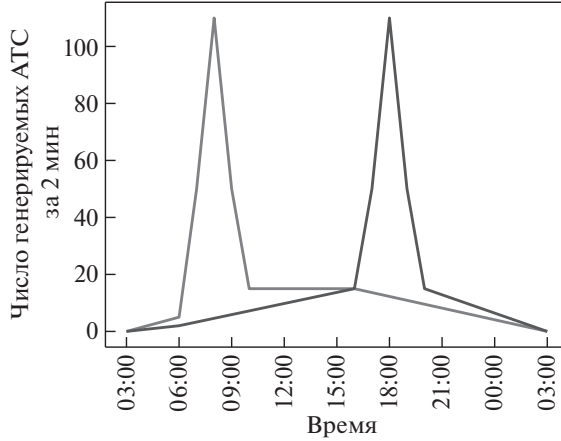


Рис. 11. Графики загрузки двух типов въездов — с утренней и вечерней пиковыми загрузками в эксперименте с высокой загрузкой.

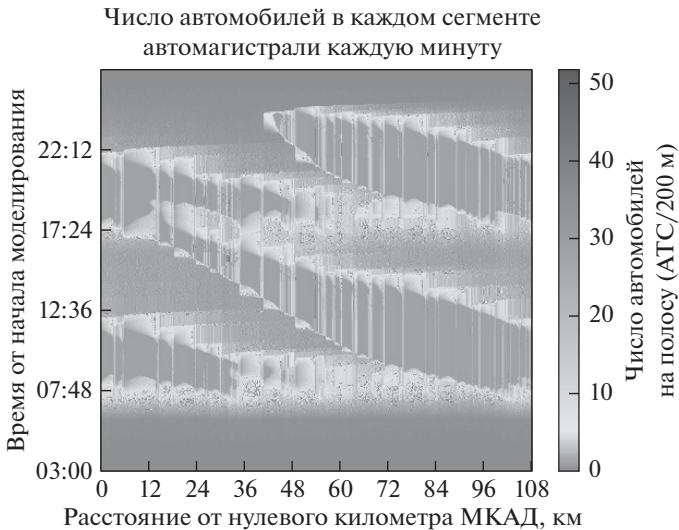


Рис. 12. Количество автомобилей на полосе в модели транспортной сети за день в эксперименте с высокой загрузкой.

8.1. Эксперимент без управления въездами

Результаты моделирования при такой конфигурации въездов представлены на рис. 12. Видно, что в данной конфигурации потоков на въездах заторные движения образуются по всей протяженности автомагистрали, объединяясь впоследствии в один большой. В данном эксперименте МКАД практически полностью занята пробкой с утра до вечера. На рис. 13 показано число реально въехавших автомобилей и количество проехавших за день по

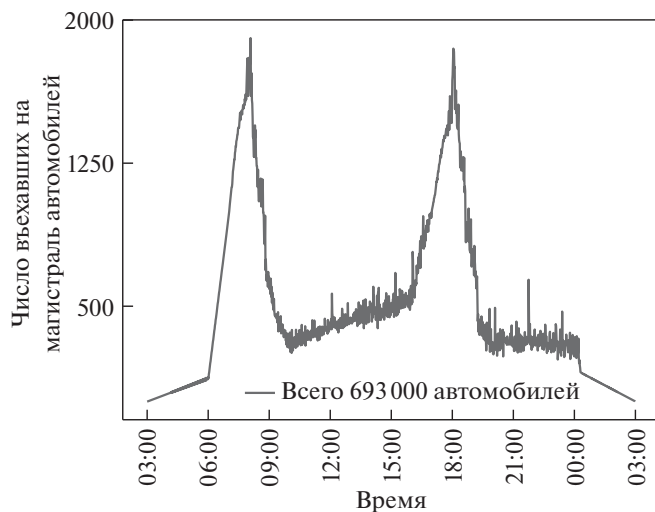


Рис. 13. График суммарно въехавшего на автомагистраль со всех въездов числа автомобилей в эксперименте с высокой загрузкой.

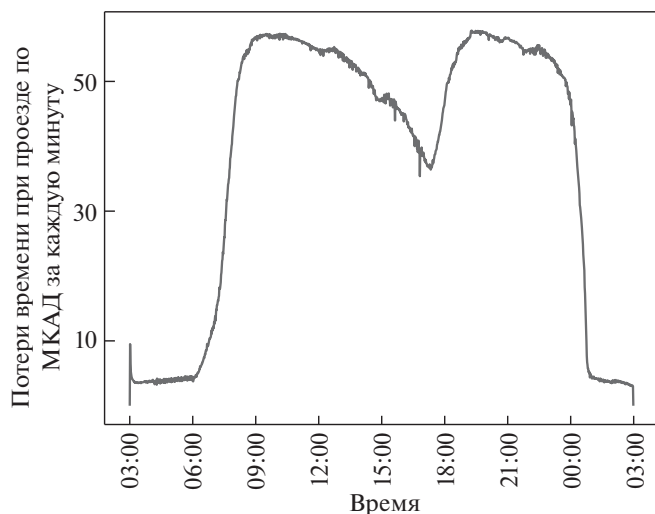


Рис. 14. Временные потери на проезд по автомагистрали в эксперименте с высокой загрузкой.

магистрали АТС. График временных потерь проезда по всей автомагистрали представлен на рис. 14.

8.2. Эксперимент с управлением въездами

В данном эксперименте с управлением въездами также перекрываем въезды вплоть до 80% в зависимости от плотности автомобилей на магистрали. Результаты моделирования, число въехавших автомобилей и график временных потерь при проезде по магистрали изображены на рис. 8, 9 и 10 соответственно.

На графиках видно уменьшение времени затора на МКАД, а также небольшое увеличение числа проехавших автомобилей. Хотя число проехавших по МКАД автомобилей увеличилось незначительно, временные потери на проезд по автомагистрали сильно снизились, а временной интервал затрудненного движения уменьшился. Интегральная разность между графиками на рис. 14 и 17 составляет чуть более 18 мин.

9. Эксперименты с высокой загрузкой с длинными въездами

В данной группе экспериментов функции входного потока соответствуют потоку в предыдущем эксперименте и изображены на рис. 11. В данном случае есть два типа въездов на автомагистраль — с утренней и вечерней пиковыми нагрузками в течение трех часов. Въезды на автомагистраль — все протяженностью в 6 км в отличие от уже проведенных экспериментов, в которых их длина бралась 2 км.

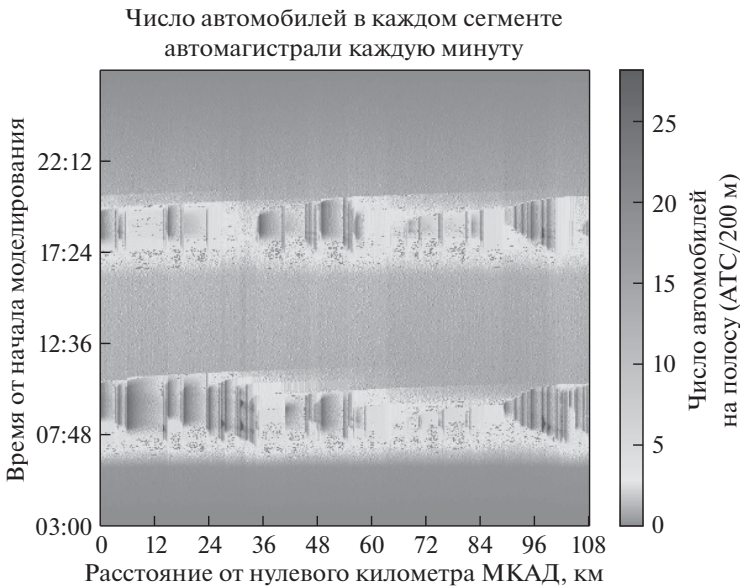


Рис. 15. Количество автомобилей на полосе в модели транспортной сети за день в эксперименте с высокой загрузкой с управлением въездами.

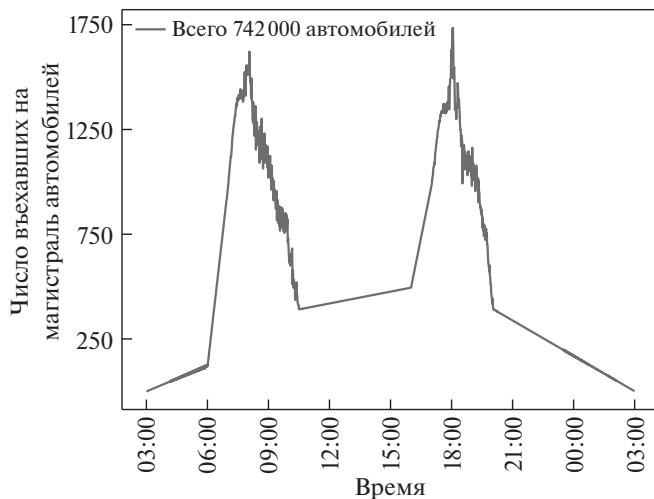


Рис. 16. График суммарно въехавшего на автомагистраль со всех въездов числа автомобилей в эксперименте с высокой загрузкой с управлением въездами.

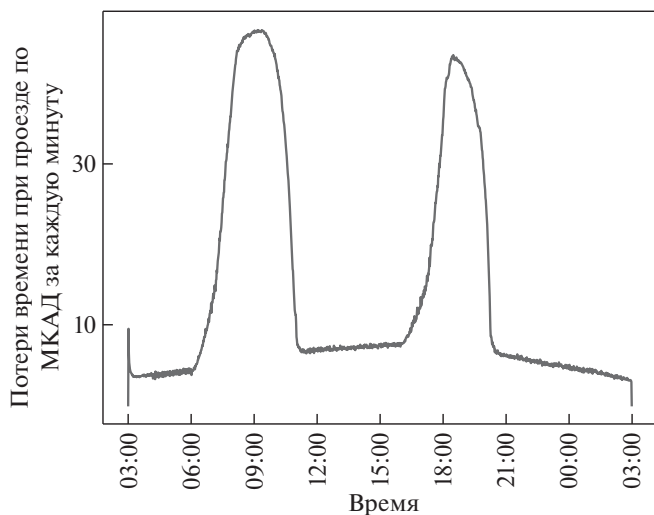


Рис. 17. Временные потери на проезд по автомагистрали в эксперименте с высокой загрузкой с управлением въездами.

В данном разделе приведем все результирующие графики парами. Результаты моделирования представлены на рис. 18. Число реально въехавших автомобилей и количество проехавших за день по магистрали АТС изображены на рис. 19. График временных потерь проезда по всей автомагистрали представлен на рис. 20. График временных потерь въезда на автомагистрали относительно пустой транспортной сети показан на рис. 21.

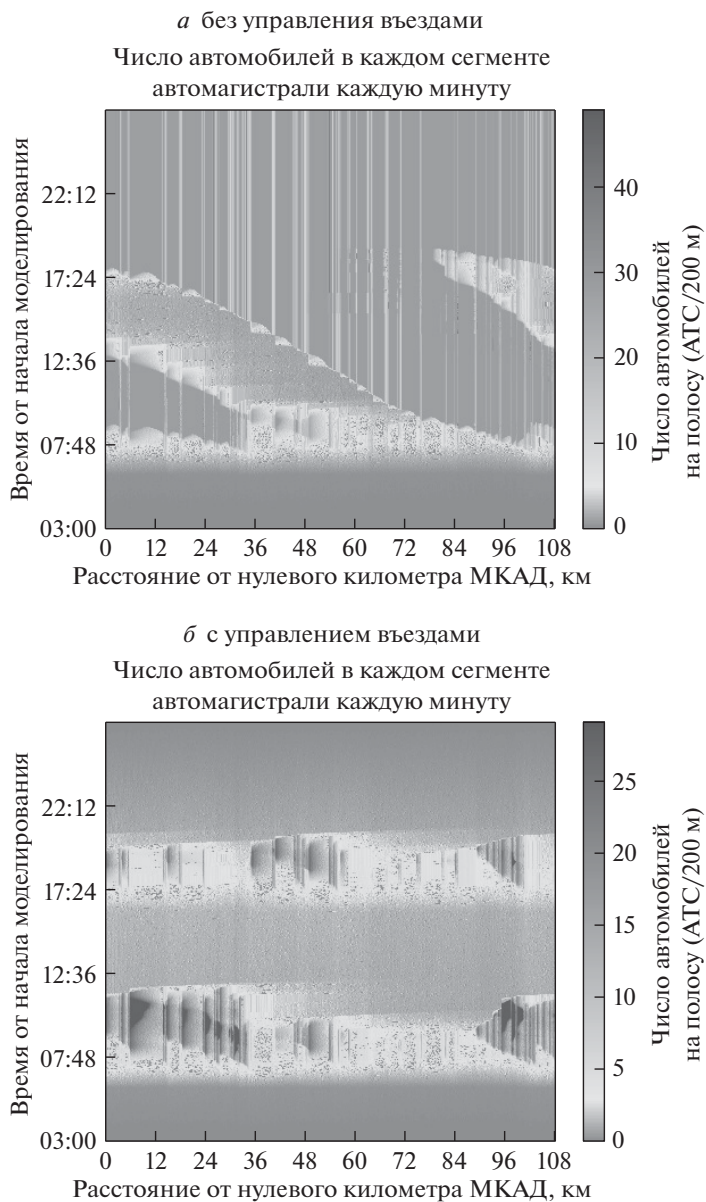


Рис. 18. Количество автомобилей на полосу в модели транспортной сети за день в эксперименте с высокой загрузкой.

В эксперименте видно, что из-за большого числа автомобилей, ожидающих въезда на МКАД без управления въездами, автомагистраль полностью забивается и не успевает освободиться до конца моделирования. Поскольку динамическое управление въездами не позволяет пробке поддерживаться за счет ограничения входного потока на магистраль, наблюдаются значительное улучшение состояния магистрали и сильная локализация затора во времени.

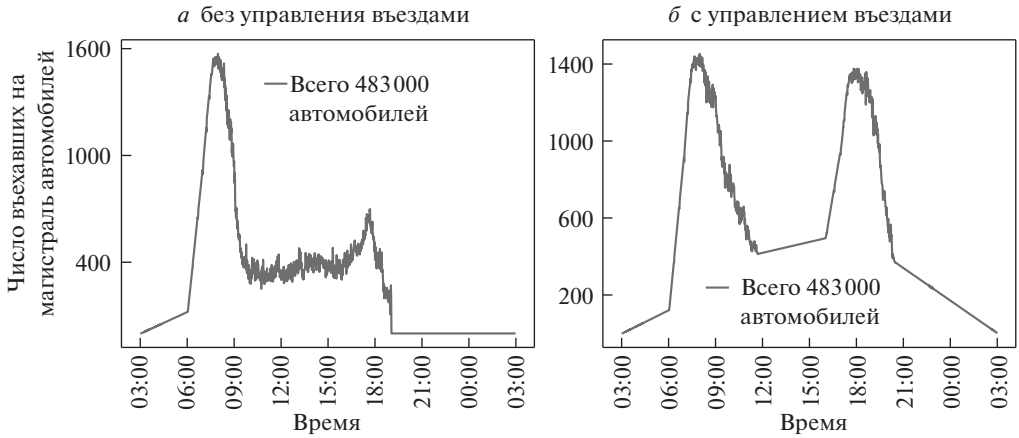


Рис. 19. Графики суммарно въехавшего на автомагистраль со всех въездов числа автомобилей в эксперименте с высокой загрузкой.

Интегральная разность между графиками на рис. 21 составляет чуть более 26 мин. Однако имеет смысл не учитывать сугубо экстремальную вечернюю ситуацию с практически полной остановкой автомагистрали. В этом случае при расчете интеграла до 15:00 задержка ожидания проезда по МКАД составит около 7 мин за половину суток.

10. Обсуждение результатов

В работе проведена проверка работоспособности статистической модели для задачи моделирования транспортных потоков в сети большой протяженности.

На графиках рис. 5, 12 видно, что модель адекватно ведет себя при образовании заторов и моделирует их образование, распространение по магистрали и рассасывание.

Графики на рис. 8, 15 показывают возможность локализации заторного движения на магистрали при наивном управлении ее въездами, что позволяет быстрее вывести ее в оптимальный режим. Преимущества управления явно показаны на графиках рис. 7, 10, 14, 17 ввиду существенного уменьшения времени проезда по МКАД. Заметим, что, например, на рис. 14 временные потери достигают 430 мин, или 7 ч, что соответствует скорости в 15 км/час. В реальности такое время проезда по всей автомагистрали, конечно же, не наблюдается ввиду того, что пробка через несколько часов уже пропадает и движение становится более свободным. На рис. 20, 21 видны временные потери на проезд по МКАД и на въезд на автомагистраль при высокой загрузке въездов шестикилометровой протяженности. Заметим, что в данном эксперименте магистраль полностью останавливается ввиду того, что в модели не учитываются изменения поведения водителей из-за существенной загруженности МКАД. В такой экстремальной ситуации автомобилисты начнут

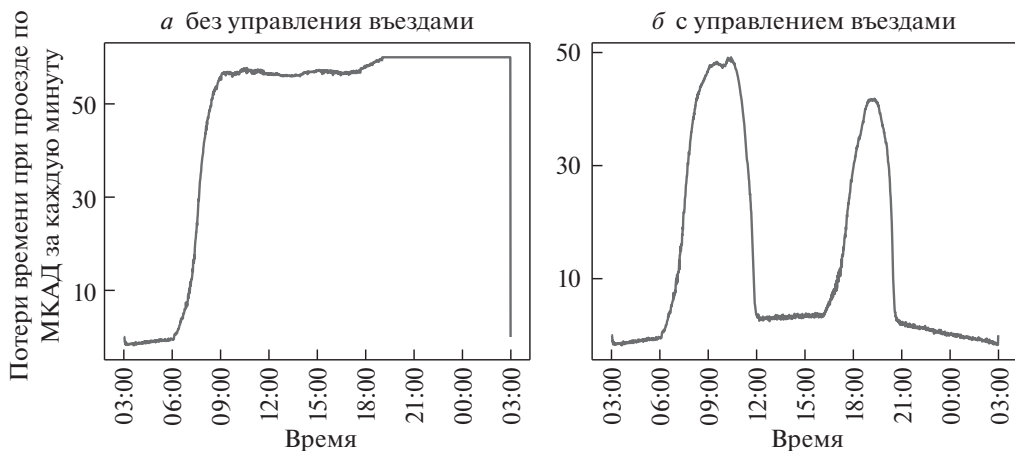


Рис. 20. Временные потери на проезд по автомагистрали в эксперименте с высокой загрузкой.

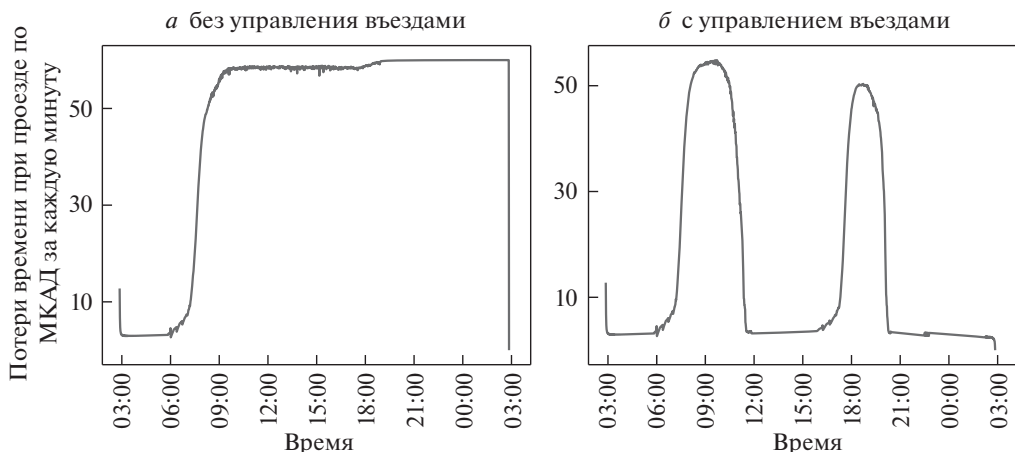


Рис. 21. Временные потери на въезд на автомагистраль в эксперименте с высокой загрузкой.

больше съезжать с МКАД, а системы построения маршрутов будут пытаться прокладывать пути без въезда на загруженную магистраль. Из-за этого эксперимент с управлением въездами, не дающий автомагистрали перейти в полностью заторное состояние, показывает существенный выигрыш как по времени проезда по магистрали, так и по времени въезда на нее.

На графиках рис. 6, 9, 13, 16 видно увеличение числа проехавших по магистрали АТС при использовании контроля въездов. Число проехавших по магистрали автомобилей во всех экспериментах соответствует данным от ЦОДД в 1,36 млн автомобилей за сутки по всему МКАД или приблизительно 680 тысяч автомобилей по одной стороне.

11. Заключение

Получен инструмент для моделирования транспортной сети большой протяженности за небольшое время. В однопоточном режиме моделирование одних суток на одной половине МКАД занимает 15 мин. Рассмотрены различные варианты входных потоков на автомагистраль и их влияние на образование и распространение заторного режима. Показано на примере МКАД, что управление въездами может быть использовано для локализации пробок на автомагистрали и увеличения ее пропускной способности.

Проведена проверка адекватности работы модели на небольших сегментах автомагистрали в различных конфигурациях дорог и входных потоков в [1], а также ее адекватности при моделировании большой дорожно-транспортной сети в данной работе. Ввиду вычислительной простоты модель может быть использована для онлайн-моделирования магистрали для различных целей, в том числе для управления въездами на нее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Старожилец В.М., Чехович Ю.В.* Об одном подходе к статистическому моделированию транспортных потоков // Журн. вычисл. матем. и мат. физики. 2021. № 7. С. 1220–1232.
2. *Yuta A., Nobuyasu I., Hajime I., Tetsuo I., Uchitane T.* Traffic simulation of Kobecity // Proceedings of the international conference on social modeling and simulation, plus Econophysics Colloquium 2014. Berlin: Springer. 2015. V. 229. P. 255–264.
3. *Bieker L., Krajzewicz D., Morra A., Michelacci C., Cartolano F.* Traffic simulation for all: a real world traffic scenario from the city of Bologna // Modeling Mobility with Open Data. Berlin: Springer, 2015. V. 229. P. 47–60.
4. *Алексеевко А.Е., Холодов Я.А., Холодов А.С. и др.* Разработка, калибровка и верификация модели движения трафика в городских условиях. Ч. I // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7. № 6. С. 1185–1203.
5. *Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А. и др.* Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: Litres, 2015. С. 89.
6. *Guo Hong-Wei, Gao Zi-You, Zhao Xiao-Mei, Xie Dong-Fan.* Dynamics of motorized vehicle flow under mixed traffic circumstance // Communications in Theoretical Physics, 2011. V. 55. № 4. P. 719.
7. *Gundaliya P.J., Mathew T.V., and Dhingra S.L.* Heterogeneous traffic flow modelling for an arterial using grid based approach // J. Advanced Transport. 2008. V. 42. № 4. P. 467–491.
8. *Lan L.W., Chang C.-W., Gangopadhyay S.* Inhomogeneous cellular automata modeling for mixed traffic with cars and motorcycles // J. Advanced Transport. 2005. V. 39. № 3. P. 323–349.
9. *Payne H.J.* Models of freeway traffic and control // Math. Models Public Syst. 1998. № 4. P. 51–61.
10. *Zhang M.* Anisotropic property revisited — does it hold in multi-lane traffic? // Transport. Res. B Meth. 2003. V. 37. № 6. P. 561–577.
11. *Siebel F., Mauser W.* On the fundamental diagram of traffic flow // SIAM J. Appl. Math. 2006. V. 66. № 4. P. 1150–1162.

12. *Холодов Я.А., Алексеенко А.Е., Холодов А.С. и др.* Разработка, калибровка и верификация модели движения трафика в городских условиях. Ч. II // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7. № 6. С. 1205–1219.
13. *Alekseenko A.E., Kholodov Y.A., Kholodov A.S. et. al.* Adaptive traffic light control on highway entrances // 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE. 2017. P. 1–6.
14. *El-Tantawy S., Abdulhai B., Abdelgawad H.* Multiagent reinforcement learning for integrated network of adaptive traffic signal controllers (MARLIN-ATSC): methodology and large-scale application on downtown Toronto // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2013. Т. 14. № 3. P. 1140–1150.
15. *Mannion P., Duggan J., Howley E.* An experimental review of reinforcement learning algorithms for adaptive traffic signal control // Autonomic road transport support systems. 2016. P. 47–66.
16. *Gayah V.V., Gao X.S., Nagle A.S.* On the impacts of locally adaptive signal control on urban network stability and the macroscopic fundamental diagram // Transportation Research Part B: Methodological. Elsevier. 2014. Т. 70. P. 255–268.
17. *Han K., Liu H., Gayah V.V., Friesz T.L., Tao T.* A robust optimization approach for dynamic traffic signal control with emission considerations // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Elsevier. 2016. Т. 70. P. 3–26.
18. *Oskarbski J., Kaszubowski D.* Applying a Mesoscopic Transport Model to Analyse the Effects of Urban Freight Regulatory Measures on Transport Emissions—An Assessment // Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2018. V. 10. № 7. P. 2515.
19. *Tordeux A., Lämmel G., Hänseler F., Steffen B.* A mesoscopic model for large-scale simulation of pedestrian dynamics // Transportation research part C: emerging technologies. Elsevier. 2018. V. 93. P. 128–147.
20. Центр организации дорожного движения, число АТС на МКАД.
<https://twitter.com/gucodd/status/1135591064453222401>.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 21.01.2021

После доработки 04.06.2021

Принята к публикации 30.06.2021