

# ЗАДАЧИ И СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ МНОГОПОЛОСНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Соловьев А.А., Валуев А.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
aa.solovjev@yandex.ru, valuev.online@gmail.com

*Аннотация:* Обеспечение эффективного функционирования городских дорожных сетей требует динамического, адаптивного регулирования, в особенности на пересечениях многополосных магистралей. Это регулирование может быть не только параметрическим, но и структурным. Рассматриваются вопросы его информационного обеспечения на основе обработки данных мониторинга транспортных потоков. Другим важнейшим аспектом является информирование водителей о текущей локальной организации движения, которое в настоящее время не обеспечивается с необходимой подробностью ни печатными изданиями, ни Интернет-ресурсами. Рассматриваются возможные средства такого информирования, а также доведения до водителей рекомендаций по выбору трассы движения в зоне перекрестка. Последние могут обеспечить не только более высокую вероятность достижения водителями своих целей, но и повышение полноты использования ресурсов транспортной сети.

Ключевые слова: регулируемый перекресток, организация дорожного движения, схема пофазного разъезда, пропускная способность, безопасность дорожного движения, мониторинг, информирование водителей.

## Введение

Для крупных городов характерно наличие системы многополосных магистралей [1, 2] — каркаса городской дорожной сети (ГДС). Эти магистрали несут значительную долю, зачастую основной объем автотранспортного потока (АТП). Важнейшую роль с точки зрения эффективности ГДС и безопасности движения играют сопряжения этих магистралей. При наличии возможности и экономической целесообразности эти сопряжения выполняются в виде сложных транспортных сооружений, исключающих или минимизирующих пересечения на одном уровне. Однако дороговизна таких сооружений и ограничения для их возведения в городской среде препятствуют их широкому распространению. Остальные сопряжения являются регулируемыми перекрестками, обеспечивающими поочередный проезд транспортных средств (ТС) в различных направлениях.

Два фактора определяют эффективность использования перекрестка: с одной стороны, устройство перекрестка и организация движения (ОДД) через него, включая использование светофорного регулирования, — а с другой — адаптация водителей к ОДД на перекрестке. И то, и другое нуждается в сильной информационной поддержке. ОДД должна адаптироваться к текущей транспортной ситуации, что требует оперативного получения и обработки данных о ней. С другой стороны, водители для достижения своих целей имеют определенный набор вариантов действий, в частности, в отношении перестроения между полосами. Но для правильного индивидуального выбора каждого водителя он должен быть осведомлен о своих возможностях и ожидаемых результатах при любом выборе. Информационная поддержка водителей, помимо предоставления информации о статических и динамических элементах ОДД и текущей транспортной ситуации может и должна включать также прогноз результатов того или иного выбора. Она может включать и рекомендации, следуя которым индивидуальный выбор водителей обеспечивает и общие интересы.

## 1 Информационная поддержка ОДД на перекрестке

Существует два уровня управления прохождением транспортных потоков через перекресток — структурный и параметрический. Первый состоит в разделении направлений прохождения перекрестка между фазами светофорного цикла — определении *схемы пофазного разъезда* [3]. В настоящее время схемы пофазного разъезда меняются редко, однако технические средства позволяют изменять их в зависимости от транспортной ситуации. Для этой цели достаточно согласованно изменить последовательность смен фаз для отдельных направлений на обслуживающих перекресток светофорах.

Второй заключается в определении продолжительностей фаз светофорного цикла, которые также могут быть зафиксированы на длительный срок, либо изменяться по определенной программе в зависимости от времени суток, либо определяться адаптивно, по текущей локальной транспортной

ситуации. Закономерные изменения интенсивности потоков в зависимости от времени суток, дня недели, сезона определяют лишь тренд. Отклонения от тренда значительны и определяются неконтролируемыми причинами, среди которых могут быть погодные явления, влияющие на видимость и сцепление шин с дорожным покрытием, серьезные аварии, перекрывающие движения на некоторых полосах, проведение крупных разовых общественных мероприятий типа футбольных матчей. В связи с этим для эффективного параметрического управления необходимо оценивать текущее поступление ТС с разных входов и текущее распределение входящих ТС по направлениям прохождения перекрестка, что требует соответствующего информационного обеспечения, объединяющего средства непрерывного мониторинга транспортного потока с обработкой его результатов в текущем времени.

Основным элементом мониторинга является распознавание событий пересечения транспортными средствами условных границ перекрестка. При этом можно идентифицировать проезжающие ТС и устанавливать отдельно моменты пересечения рубежей их передними и задними бамперами. На основе объединения этих данных приближенно определяются также скорости движения ТС. Собственно фиксация пересечения движущимся объектом некоторого рубежа известна давно и применяется уже несколько десятилетий в турникетах, оснащенных фотоэлементами; для рассматриваемого применения основным вопросом является два: 1) расположение следящих приборов, обеспечивающее минимизацию процента ошибок типа пропуска события и ложного срабатывания и 2) сочетание аппаратных и программных средств, минимизирующих искажения

Средствами мониторинга АТП в настоящее время являются радары и видеокамеры. Компьютерная обработка видеопотока на основе методов распознавания образов позволяет фиксировать различные события и состояния наблюдаемого процесса, имеющие видимое выражение, включая текущее положение транспортного средства и момент пересечения его передним или задним бампером некоторого рубежа. Для уменьшения ошибки при выделении в снимке плотного транспортного потока отдельных транспортных средств целесообразно наблюдать его сверху. В настоящее время для этой цели, помимо стационарного размещения средств мониторинга, используется их размещение на мультикоптерах [4]. В статье [4] отмечается: «В сентябре 2016 года Ставропольский край стал первым регионом в России, который взял на вооружение квадрокоптеры в структуру ГИБДД... Сейчас мультикоптеры осуществляют несколько задач: проводят мониторинг состояния загруженности дорог, фиксируют факты нарушений ПДД и госномера автомобилей-нарушителей». Для целей построения системы управления квадрокоптером при мониторинге и контроле состояния объектов предлагаются специальные технические решения [5]. В [5] для решения рассматриваемой задачи «осуществляется подбор актуаторов и компонент, разрабатывается структурная схема системы управления. Предложенная концепция реализована в виде полетного контроллера, изготовленного по современным стандартам».

При мониторинге АТП в первом приближении не учитываются индивидуальные размерные и динамические характеристики ТС во входящем потоке, а лишь их количество в единицу времени. Фиксация последовательности событий в наблюдаемом транспортном потоке является лишь начальным звеном для получения информации, которая может непосредственно использоваться при светофорном регулировании. Прежде всего, следует отметить, что его параметры — продолжительности фаз — связываются с усредненными характеристиками потока, выражаемыми интенсивностями входных потоков и пропорциями, в которых они разделяются между направлениями движения на перекрестке. Количество транспортных средств, подъезжающих к определенному входу за единицу времени, в силу дискретного характера трафика и различий между отдельными ТС, колеблется относительно среднего значения, которое, кроме того, имеет определенный (но в точности неизвестный) временной тренд. Еще в большей степени испытывают колебания количества ТС, проезжающих в единицу времени от определенного входа по некоторому направлению. В силу этого как интенсивности входящих потоков, так и пропорции, в которых входящие потоки разделяются по направлениям, принципиально могут быть более или менее достоверно определены за промежутки времени, составляющие несколько светофорных циклов.

Оптимальный период усреднения может быть найден лишь эмпирически, путем сопоставления относительного отклонения, вызванного случайными факторами, и закономерного изменения во времени. Определение продолжительностей светофорных фаз в соответствии с найденным распределением потоков по направлениям [3] не может совершенно выровнять длины очередей и задержки при прохождении перекрестка (в силу действия многообразных случайных факторов), но, несомненно, должно улучшить ситуацию в этом отношении.

Использование усредненной актуальной информации по входным потокам и их прохождению через перекресток позволяет обеспечить *в среднем* наиболее благоприятные условия (при существующих возможностях) для проезда перекрестка в разных направлениях путем адаптации продолжительности фаз к этим данным. Вместе с тем, для дальнейшего совершенствования параметрического управления прохождением перекрестков можно использовать и более детальную информацию, основанную на учете текущего состава входящих потоков, т.е. разделения ТС по категориям. Невозможно точно знать динамические характеристики проезжающих ТС, т.к. они определяются не только их моделями (и тем более не только размерами ТС), но и техническим состоянием и поведенческими характеристиками их водителей. Однако средние значения динамических характеристик для различных (эмпирически выявляемых) типов ТС различны, и, учитывая эти различия в расчетах, можно, с учетом массового характера транспортного процесса, повысить эффективность управления.

Возможное решение здесь состоит в том, что при наличии в текущей очереди на конкретном входе преобладания более медленных (и медленнее ускоряющихся и тормозящих), менее маневренных машин по сравнению со средним составом потока, целесообразно увеличить длину светофорной фазы для их прохождения, а при преобладании более маневренных машин — наоборот, уменьшить при условии сохранения достаточного уровня безопасности движения. Для этого должны использоваться ускоренные (с опережением реального процесса дорожного движения) расчеты на основе математического моделирования [6, 7].

## **2 Информационное обеспечение для водителей**

Эффективность любых мер по регулированию транспортного потока через перекресток, однако, зависит и от того, насколько водители адаптируются к ним. Для начала нужно сказать, что информация для водителей об организации движения через перекрестки, предоставляемая как в печатных изданиях, так и на Интернет-ресурсах, неполна; в особенности для пересечений многополосных магистралей. Показываются, за редкими исключениями, лишь принципиальные разрешенные направления движения (движение прямо, правый и левый поворот), но не конкретные дорожные полосы, на которых эти направления реализуются. Как это изображается, можно увидеть ниже из рис. 1–3.

Таким образом, водитель, ошибочно заняв на въезде в перекресток полосу, на которой движение в нужном ему направлении не осуществляется, вынужден будет изменить свой маршрут. Другая возможная ошибка — пропустить требуемый поворот. Каждая такая ошибка приводит к перепробегу этого конкретного ТС, а для транспортной сети — к дополнительной нагрузке. Но и водитель, знающий, какую полосу ему занять, может не добиться желаемой цели из-за маневров других автомобилей.

В условиях постоянства схемы пофазного разъезда на конкретном перекрестке преимущества в выборе правильных маршрутов, обеспечивающих достижения их целей, имеют водители, регулярно проезжающие через него. То же самое относится и к случаю, когда организация дорожного движения (ОДД) через перекресток изменяется закономерно, в зависимости от времени суток. Прочие водители для того, чтобы их водительское поведение было целенаправленным, должны быть проинформированы на подъезде к перекрестку, поскольку смена полос требует заблаговременной готовности к ней, особенно в условиях достаточно плотного потока. В современных условиях массовое информирование о локальной организации движения с помощью программируемых световых табло является достаточно просто организуемой возможностью, не требующей значительных финансовых вложений. Вместе с тем, учитывая невнимательность части водителей, подобное информирование должно быть продублировано на специализированных Интернет-ресурсах, обеспечивающих навигацию в ГДС.

Определенную проблему вызывает отсутствие однозначного соответствия между направлениями движения на перекрестке и входными полосами, обычное для пересечений многополосных магистралей. Для Москвы количество входных полос на таких пересечениях может быть от 3 до 5, количество же направлений 2 или 3. При этом некоторые направления реализуются для нескольких входных полос и некоторые входные полосы в области перекрестка расщепляются на две, обеспечивая тем самым прохождение ТС в двух направлениях. Кроме того, и на подъезде к перекрестку количество полос может увеличиваться. Так, для участка Нахимовского проспекта между Новочеремушкинской и Профсоюзной улицей первоначальное количество полос с трех (одна из которых — выделенная) увеличивается сначала до четырех, а перед самым пересечением с

магистралью — до пяти. То же самое имеет место для Севастопольского проспекта в окрестности рассматриваемого далее пересечения.

Особенно непроста задача выбора рационального выбора полосы при проезде сложных перекрестков. Часто для проезда в требуемом направлении нужно неоднократно менять полосу. Рассмотрим эту ситуацию на примере перекрестка, соединяющего Севастопольский проспект с улицами Дмитрия Ульянова, Ремизова и Академика Векшинского. На рис. 1 и 2 показана схема участков ГДС с этим перекрестком на ресурсе Яндекс.Карты с разной степенью подробности. Как видно, даже в самом крупном масштабе изображение фрагмента перекрестка не обеспечивает подробной навигации, поскольку отдельные полосы не показаны. Невозможно ясно понять, что при движении в центр по нечетной стороне Севастопольского проспекта при правом повороте можно в дальнейшем выехать не только на улицу Ремизова, но также на улицы Дмитрия Ульянова и Академика Векшинского.

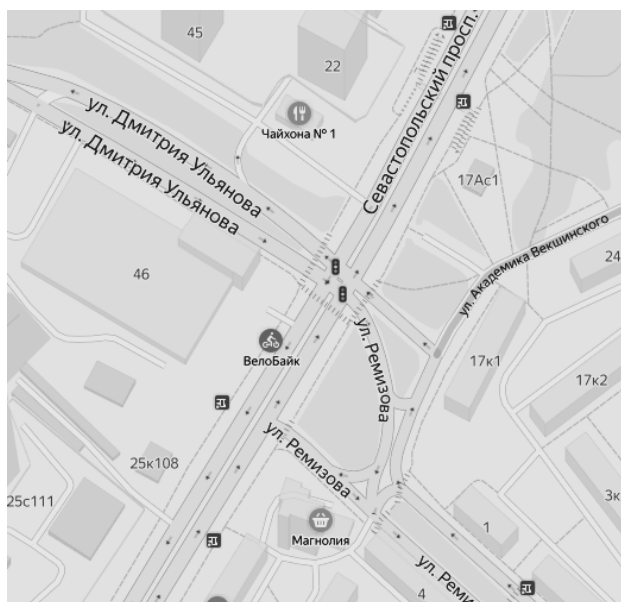


Рис. 1. Изображение рассматриваемого перекрестка в целом на ресурсе Яндекс.Карты

В печатном атласе 2013 г. [2] (рис. 3) для водителей показано количество полос и направление движения на них, хотя и в этом случае для выбора локального маршрута, требующего двух поворотов водителю нужно обладать известной проницательностью.

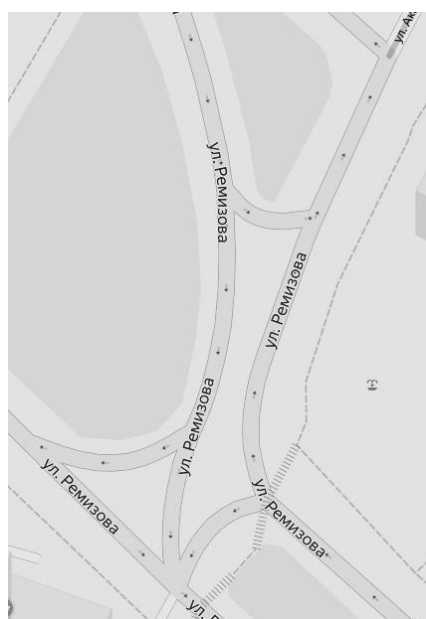


Рис. 2. Изображение фрагмента рассматриваемого перекрестка на ресурсе Яндекс.Карты с максимальной подробностью

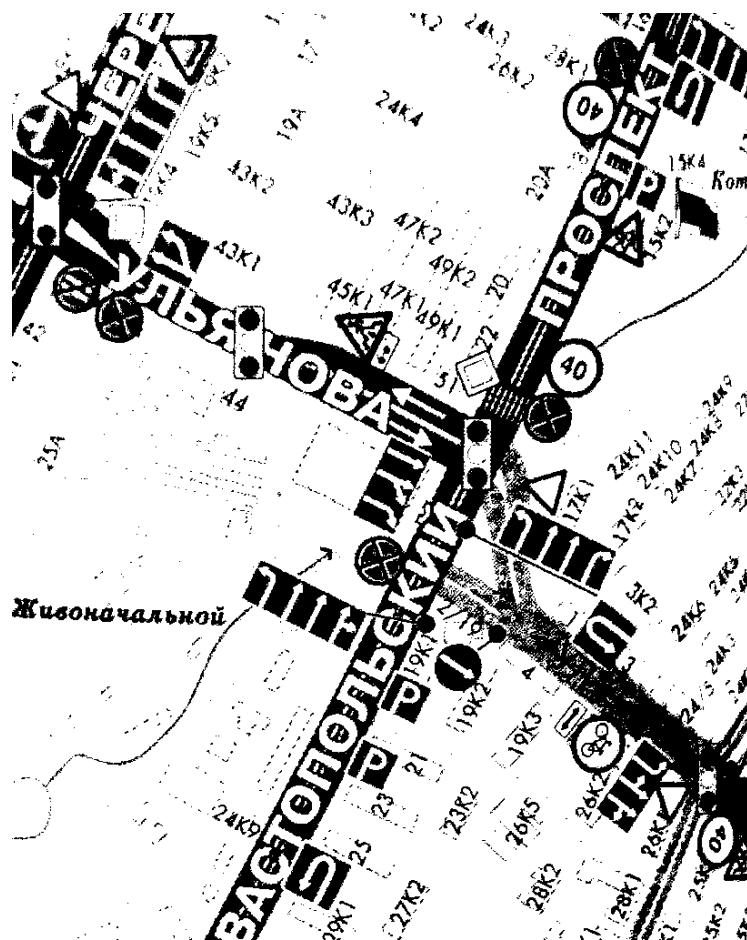


Рис. 3. Изображение зоны перекрестка в атласе для водителей [2]

Но, во-первых, и здесь показаны далеко не все въезды и направления — нет информации о полосах и направления при подъезде к перекрестку со стороны улицы Ремизова, поворот на улицу Академика Векшинского вообще никак не обозначен, а он возможен при подъезде по Севастопольскому проспекту по обоим направлениям и по улицам Ремизова и Дмитрия Ульянова. Во-вторых, не показано изменение количества полос и их назначения при приближении к перекрестку с обеих сторон Севастопольскому проспекту. А между тем крайние правые полосы используются до ближайших окрестностей перекрестка как выделенные и только в этих окрестностях обслуживают правый поворот всех АТС.



Рис. 4. Организация движения при повороте с Севастопольского проспекта на улицу Ремизова

Из рис. 4 видно, что, если автомобиль не успел заранее занять правую полосу для поворота, он может сделать это непосредственно перед поворотом на участке длиной не более 30 м, для чего он должен быть заранее подготовлен. Кроме того, при подъезде к перекрестку происходит увеличение количества полос — для нечетной стороны проспекта (движение в центр) на довольно большом расстоянии порядка 500 м, а для четной — на очень коротком участке. Увеличение количества полос принципиально способствует увеличению пропускной способности перекрестка, но оно происходит не автоматически, а в результате рациональных маневров АТС по занятию более свободных полос. *Можно предположить*, что навигаторы дают — даже заблаговременно — некоторую информацию об ОДД в области перекрестка, но вовремя осознать и, главное, применить ее в условиях цейтнота водителем непросто. По существу, для большинства водителей — в особенности для тех, кто проезжает по данному участку впервые или редко, — предпочтительней было бы получать прямую команду начать определенный маневр. Но такое управление, подобное управлению движением самолетов со стороны авиадиспетчеров, будет способствовать выбору локальных маршрутов, выгодных как для самих водителей, так и для прохождения транспортных потоков лишь в том случае, если будет опираться на достоверную актуальную информацию о локальном состоянии ТП.

Прежде чем рассмотреть возможности выдачи прямых рекомендаций водителям, рассмотрим вопросы организации текущего информирования о локальной ОДД и загруженности полос. Для этой цели возможные траектории движения через перекресток при въезде с определенного входа могут быть показаны на световых табло конкретно, в виде ближайших участков полос с поворотами, разветвлениями и слияниями. Те же схемы должны дублироваться и на Интернет-ресурсах, но отображаться, во избежание избыточной нагрузки на информационную систему, только в режиме навигатора — для водителей АТС, движущихся в данном месте и данном направлении. При этом, для наилучшего восприятия и использования, отображение должно быть максимально лаконичным, подробно отражающим лишь ближайший участок ГДС и лишь указывающим на возможные направления дальнейшего движения. Вместе с тем, должны сообщаться в наглядном виде скорость движения АТП по каждой полосе и ближайшие моменты переключения светофора.

В условиях плотного движения, затрудняющего смен у полос, желательно информировать водителей о перспективах проезда в заданном направлении, которые связаны с вероятностями совершения необходимых маневров. В элементарном представлении можно показать уровни затрудненности смены полос цветом (зеленый, желтый, красный). Проблема здесь состоит не в отображении текущей ситуации, а в ее оценивании по данным мониторинга. По-видимому, для этой цели необязательно отслеживать процесс перехода АТС с одной полосы на другую в данное время и в данном месте, что потребовало бы значительно больших ресурсов, чем для других задач. Удовлетворительные оценки могут быть получены путем использования зависимостей, основанных на исторических данных, в которые нужно подставить текущие значения плотности потоков на полосах. Последние прямо вычисляются, исходя из оцениваемых данных: скорости пересечения границ перекрестка  $v$  и промежутка времени между двумя последовательными пересечениями  $T$ . величина  $vT$  есть не что иное, как текущее расстояние между последовательными АТС, а величина, обратная среднему текущему расстоянию — среднее количество АТС на единицу длины полосы. Естественно предположить, что при определенных значениях плотности потока на соседних полосах и определенной доле водителей, мотивированных к перестроению, количество АТС, которым удастся перестроиться на участке дороге известной длины, будет примерно одинаковым независимо от места и времени. Необходимые зависимости всё равно должны быть получены на основе эмпирических данных, но эти данные достаточно будет собрать на нескольких специально оборудованных средствах наблюдения многополосных дорогах, не повторяя наблюдения во всех остальных местах.

### **3 Информирование водителей в целях повышения обеспечения эффективности работы перекрестка**

Для эффективной работы перекрестка требуется определенное распределение въезжающих автомобилей между въездными полосами, которое при изменении числа полос должно дополняться перераспределением между ними. Это распределение (перераспределение) не может быть обеспечено лишь за счет самоорганизации входного потока. Здесь возможны разные подходы для поддержания. Добиться желательного распределения можно разными способами.

Первый состоит в информировании всех водителей подъезжающих ТС о перспективах того или иного выбора. В организациях, ведущих массовое обслуживание посетителей, в т.ч. и с набором разных услуг (например, в отделениях банков) системы электронной очереди обычно не только

присваивают клиенту номер в очереди, но и сообщают ожидаемое время получения услуги. На этой основе посетитель может принять решение, имеет ли смысл ему ожидать своей очереди или лучше прийти в другой раз. Аналогичное решение может быть предложено и в данном случае. А именно, на определенном рубеже на световом табло сообщается ожидаемое время проезда в разрешенном направлении для транспортных средств, подъезжающих по определенной въездной полосе. Информация на табло может и должна обновляться, исходя не только из смены транспортной обстановки, но и из цели такого информирования. Такие рекомендации должны побудить часть водителей к маневрам по смене полосы. Что же касается системы ОДД, для нее такая адаптация водителей к ситуации полезна для более эффективного использования пропускной способности перекрестка, независимо от того, кто именно воспользуется предлагаемыми рекомендациями. Кроме того, в перспективе, возможно вычислять и сообщать водителям показатели безопасности прохождения определенной трассы [8, 9] и «надежности» данного выбора [10]. Под последним мы понимаем вероятность того, что водителю представится возможность для совершения маневров, обеспечивающих необходимые для этого безопасные переходы между полосами, если они требуются.

Во-вторых, в перспективе может идти речь об индивидуальной навигации для участников дорожного движения. При этом рекомендации, вырабатываемые соответствующей информационной системой для обеспечения нужного распределения ТС с определенным направлением прохождения перекрестка между входными полосами, не должны быть для всех водителей одинаковыми — они должны распределяться между предлагаемыми вариантами случайным образом в требуемых пропорциях. Для этого необходима идентификация каждого получателя данной услуги, что позволит разделить множество получателей на несколько подмножеств и выдавать рекомендации адресно — в зависимости от отнесенности водителя к тому или иному подмножеству. Это разделение притом может учитывать хранящиеся в базе данных характеристики, управляемых водителями ТС — размеры и маневренность. Последнее позволит выдавать рекомендации с более высокой вероятностью их осуществления.

## Заключение

Происходящее в настоящее время интенсивное развитие инфокоммуникационных технологий создает возможности для решения задач, которые по отдельности были поставлены и даже отчасти решены порой несколько десятилетий назад, но до недавнего времени не могли быть решены в комплексе. Примером такой области, в которой усилия и отдельные достижения в области автоматизации оперативного учета и управления известны более 40 лет, но целостные системы появляются лишь в последнее время, является добыча полезных ископаемых. В настоящее время даже в шахтах, где обеспечение радиосвязи сталкивается с большими трудностями и где имеются объективные препятствия в виде быстрого изменения системы горных выработок и помехи, вызываемые регулярно производимыми взрывными работами, стало возможным детально отслеживать процессы погрузки, движения и разгрузки горных машин и использовать эти данные при оперативном управлении [11]. В этом отношении городские транспортные потоки имеют иные, в ряде отношений меньшие затруднения для мониторинга и управления (в частности, носители транспортного процесса меняются гораздо реже), и поэтому еще не решенные задачи его информационного обеспечения имеют хорошие перспективы для решения.

## Литература

1. Europe: Atlas routier et touristique. Paris: Michelin – Editions des Voyages, 2006. – 234 p. ISBN 978-2-06-711233-9.
2. АвтоАтлас Москвы с дорожными знаками средний. – Вып. 13. – М.: ООО «АГТ Геоцентр», 2013. – 104 с. ISBN 5-94050-003-X.
3. *Валуев А.М., Соловьев А.А.* Оптимизация структуры и параметров светофорного цикла в целях повышения безопасности // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018): труды Одиннадцатой междунар. конфер., 1–3 окт. 2018 г. Москва: в 3 т. М.: ИПУ РАН, 2018. – Т. 2. – С. 143–148.
4. *Самутина А.В.* Мультикоптеры как способ решения проблем городской инфраструктуры // Города и местные сообщества. 2017. Т. 1. – С. 140–152.
5. *Ермаченков Д.И., Фазли Т.Г., Петренко Е.О.* Мониторинг и контроль состояния объекта квадрокоптером с воздуха. Разработка управляющей платы // Автоматизация и управление в машиностроении. 2016. № 2 (24). – С. 58–62.

6. *Валуев А.М., Соловьев А.А.* Моделирование зависимостей, характеризующих динамику автотранспортных потоков // Информатизация и связь. – 2018. – №2. – С. 106–113.
7. *Valuev A.M.* Modeling of the Transport Flow Through Crossroads with Merging and Divergence Points // Proceedings of 2018 Eleventh International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD). Russia, Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, October 1-3, 2018. Ed. by Anatoly Tsvirkun. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551915. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551915>. – P 1–3.
8. Вибрационные процессы, виброзащита в машиноведении: Отчет о НИР за 2015 г. по теме 6-13 (промежуточный). Часть 2. Динамика транспортных потоков, научные основы проектирования оптимальных дорожных сетей / Перминов М.Д., Соловьёв В.О., Панкова Н.В., Соловьев А.А., Кельнер М.С., Бармина О.В., Валуев А.М., Евин И.А., Воробьев А.Э., Тищенко В.С. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. 2015. – 57 с.
9. *Vasconcelos L., Neto L., Seco A., Silva, A.* Validation of the Surrogate Safety Assessment Model for Assessment of Intersection // Safety. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2014, № 2432. – P. 1–9.
10. Вибрационные процессы, виброзащита в машиноведении. Отчет о НИР за 2018г. по теме 6-13 (промежуточный). Часть 2. Динамика мехатронных робототехнических комплексов, динамика транспортных потоков. /Перминов М.Д., Соловьёв В.О., Овчинников Н.М. и др. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2018. – 126 с.
11. Сайт компании Newtrax Technologies Inc, Montreal (Quebec), Canada: <https://www.newtrax.com>