



ТОКТАКУНОВ Т., ОСМОНОВ К.Т., ЧОПОЕВ А.Б.

<sup>1</sup>КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика  
<sup>2</sup>КГУСТА им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика

ТОКТАKUNOV T., OSMONOV K.T., CHOPUEV A.B.

<sup>1</sup> KSTUn.a. I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic  
<sup>2</sup>KSUSTA n.a. N Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic  
( e-mail:boss-toko@mail.ru [fdoinit@mail.ru](mailto:fdoinit@mail.ru))

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В ДОРОЖНЫХ УЧАСТКАХ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПЕРЕКРЕСТКАМИ

### SIMULATION SIMULATIONS OF CAPACITY-RAISING IN ROAD SECTIONS WITH REGULATED INTERSECTIONS

*Бишкек шаарынын жөнгө салынуучу кесилиштери бар жол бөлүктөрүндө жол-транспорттук кырсыктарынын алдын ала болтурбоо шарты бар транспорт каражаттарынын өткөрүү жөндөмдүүлүгүн жакшыртуу маселеси изилденүүдө. Тажрыйба өткөрүү, математикалык моделдөө, AnyLogic пакетин колдонуу менен имитациялык моделдөө ыкмаларынын айкалыштыруу методикасы сунушталат*

**Өзөк сөздөр:** *транспорт каражаттары, маршрут, тротуар, видеобайкоо, светофор, өткөрүү жөндөмдүүлүгү, статистикалык анализ, математикалык моделдөө, имитациялык моделдөө, интеллектуалдык транспорттук системалар, AnyLogic.*

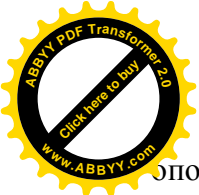
*На участках дорог г. Бишкек с регулируемыми пересечениями исследуется задача улучшения пропускной способности транспортных средств с условием предотвращения дорожно-транспортных происшествий. Предлагается методика сочетания способов проведения опыта, математического моделирования и имитационного моделирования с использованием пакета AnyLogic.*

**Ключевые слова:** *транспортные средства, маршрут, тротуар, видеонаблюдение, светофор, пропускная способность, статистический анализ, математический модель, имитационное моделирование, интеллектуальные транспортные системы, AnyLogic.*

*On sections of roads in Bishkek with regulated intersections, the task of improving the capacity of vehicles with the condition of preventing traffic accidents is being explored. The method of combining methods of experience, mathematical modeling and simulation using the AnyLogic package is offered.*

**Key words:** *vehicles, route, sidewalk, video surveillance, traffic light, bandwidth, statistical analysis, mathematical model, simulation, intelligent transport systems, AnyLogic.*

В условиях роста населения наблюдается, что парк транспортных средств в населенных пунктах Кыргызской Республики стремительно растет, соответственно наблюдается частота наполняемости движений в проезжих частях и перекрестках дорог. В последние годы в г. Бишкек и других населенных пунктах с проведением повсеместных ремонтных работ изменены и инфраструктура дорог. Установка видеонаблюдения, появление новых маршрутов, изменения режимов работ светофоров, а также



Опознавательных знаков налагают новые условия к изучению и статистическим данным входных и выходных результатов обработки в лучшую сторону.

Несмотря на это, из-за снижения пропускной способности во многих участках дорог интенсивность движений превышает нормы, снижая показатели эксплуатации транспортных средств. Во избежание увеличения вероятности наступления дорожно-транспортных происшествий следует пересмотреть [1] существующие способы организации дорожного движения. Требуется использовать современные информационные системы в: 1) **статистическом анализе**; 2) **математическом** и 3) **имитационном моделировании**, что становится более **актуальной**.

В качестве предмета и объектов исследования рассматриваются **дорожные движения** г. Бишкек КР, в частности на пересечении:

- улицы Панфилова с улицами: от ул.Токтогула до ул.Боконбаева;
- улицы Московская с улицами: от ул.Панфилова до ул.Логвиненко ;
- проспекта Чуй с улицами: от ул.Шопокова до ул.Ибраимова;
- и другие участки с пересечениями.

Транспортная планировка улиц и технические средства организации движения связанной с пропускной способностью дороги является одной из основных целей. В работе рассматриваются две оценки пропускной способности: а) на перегоне проезжей части интенсивность движения транспортного потока предполагается непрерывным; б) на перекрестках дорог предусматриваются потоки транспортных средств, которые попеременно периодически разрываются. Для характеристики пропускной способности используются: расчетная  $P_p$  и фактическая  $P_f$  наблюдаемая параметры. Данные о пропускной способности конкретной дороги получаются при различных интенсивностях дорожного движения, построения основной диаграммы и нахождения точки перегиба кривой.

Для обеспечения безопасности движения автомобилей на пересечениях дорог и улиц в одном уровне применяют средства регулирования: дорожные знаки, дорожные разметки, светофоры и систему автоматического регулирования движения с помощью компьютера. Прибытие автомобилей на пересечение во многом зависит от соотношения циклов регулирования близлежащих светофоров в отдельности. Организуется поочередная последовательность движения, предполагающую цикличность работы светофора, состоящего из понятия такта, фазы, цикла регулирования.

1. Расчет интенсивности транспортных средств, потока насыщения, регулирования производится по следующей методике определения интенсивности транспортных средств. Количество транспортных единиц по направлениям в течении часа, т.е. с  $7^{00} - 8^{00}$  ч., с  $13^{00} - 14^{00}$  ч. и с  $19^{00} - 20^{00}$  ч.

Схематично и в табличной форме представляется направления движения и результаты подсчета. Для упрощения количественных показателей, вызванные из-за различий динамических габаритов  $L_d$  транспортных средств, удобно использовать коэффициенты приведения  $K_{пр.}$  к характерному легковому автомобилю. Согласно СНиП II-60-75 и II-Д.5-72 значения  $K_{пр.}$ : легковые – 1,0; грузовые с грузоподъемностью до 8т – 2,5; автобусы – 2,0-2,5;

микроавтобусы – 1,5; троллейбусы – 3,0.

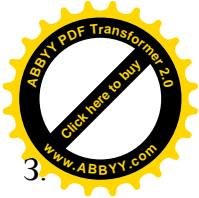
Показатель интенсивности движения в приведенных единицах (ед/ч).

$$N_{пр.а} = N_{л} \cdot 1 + N_{г} \cdot K_{пр.г} + N_{а} \cdot K_{пр.а} + N_{микро.а} \cdot K_{пр.микро.а} + N_{тр.} \cdot K_{пр.тр}, \quad (1)$$

$N_{пр.а}$  равняется сумме произведений количеств легковых, грузовых, автобусов, микроавтобусов и троллейбусов  $N_{л}$ ,  $N_{г}$ ,  $N_{а}$ ,  $N_{микро.а}$ ,  $N_{тр.}$ , умноженные на соответствующих их коэффициентов  $K_{пр.г}$ ,  $K_{пр.а}$ ,  $K_{пр.микро.а}$ ,  $K_{пр.тр.}$  приведения к легковому автомобилю, проходящий в час по  $i$ -му направлению. По данным ниже таблиц и с помощью выше формулы рассчитывается приведенные интенсивности.

Например, по ул. Московская, Ю – С:

$$N_{пр,нп} = 84 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 0 \cdot 3 = 90 \text{ ед./ч.}; \quad N_{пр,пр} = 372 \cdot 1 + 5 \cdot 2 + 12 \cdot 3 = 418 \text{ ед./ч.}; \quad N_{пр,нл} = 18 \cdot 1 + 2 \cdot 2 + 0 \cdot 3 = 22 \text{ ед./ч.}$$



Аналогично рассчитывается для направлений: С – Ю; З - В; В – З.

1) Первым этапом расчета по улице Московская является определение параметров потоков насыщения М, определяемой по формуле

$$M = 3600 / n * (m_1 / t_1 + m_2 / t_2 + m_3 / t_3 + \dots + m_n / t_n), \quad (2)$$

где n - общее количество замеров; m<sub>i</sub> – количество проходимых по типам транспортных средств за время работы зеленого сигнала светофора; t<sub>i</sub> – соответствующий промежуток времени работы зеленого сигнала светофора;

$$M_{В-З} = 3600 / 5 * (8 / 33 + 10 / 32 + 6 / 33 + 15 / 32 + 12 / 33) = 1008 \text{ ед / ч};$$

и остальных направлений.

2) По данным интенсивностям и потокам насыщения на перекрестке определяются параметры светофорного регулирования: цикл и основные такты регулирования. Фазовые коэффициенты  $Y=N/M$ , где N – приведенная интенсивность; М – поток насыщения. Ю – С:  $Y_{НП} = 156 / 4896 = 0,03$ ;  $Y_{ПР} = 693 / 4896 = 0,14$ ;  $Y_{НЛ} = 496 / 4896 = 0,1$ ; и других направлений.

Выбираются максимальные фазовые коэффициенты для каждой фазы, и определяется их сумма  $Y = Y1_{МАХ} + Y2_{МАХ}$ , (3)

где  $Y1_{МАХ}$  - максимальный фазовый коэффициент по главной дороге;

$Y2_{МАХ}$  - максимальный фазовый коэффициент по второстепенной дороге

$$Y = 0,19 + 0,65 = 0,84.$$

Рассчитываются цикл и основные такты регулирования

$$T_{ц} = (1,5 * T_{п} + 5) / (1 - Y); \quad t_{31} = (T_{ц} - T_{п} / Y) * Y1_{маx}; \quad t_{32} = (T_{ц} - T_{п} / Y) * Y1_{маx}, \quad (4)$$

где T<sub>п</sub> – время работы желтого сигнала светофора – 5 сек; t<sub>31</sub> – время работы зеленого света, по главной дороге; t<sub>32</sub> - по второстепенной дороге.

$$T_{ц} = (1,5 * 5 + 5) / (1 - 0,84) = 78 \text{ сек.}; \quad t_{31} = (78 - 5 / 0,84) * 0,19 = 16 \text{ сек.};$$

$$t_{32} = (78 - 5 / 0,84) * 0,65 = 56 \text{ сек.}$$

Таблица 1 - Расчет интенсивности транспортных средств в исходных данных

Ул.Московская - Ул.Логвиненко

Табл. 3.2. Направление Восток-Запад.

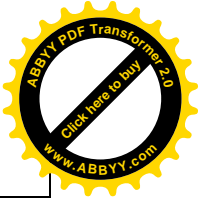
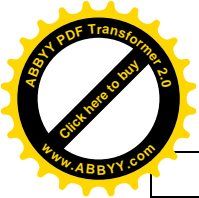
В-3

Время: 7-00 - 8-00

№ п/п	Вид транспортных средств	Направление движения транспорта					
		Поворот направо		Прямое		Поворот налево	
		На	Нпр.а.	На	Нпр.а.	На	Нпр.а.
1	Легковые		0		0		0
2	Грузовые		0		0		0
3	Автобусы		0		0		0
4	Микроавтобусы		0		0		0
5	Троллейбусы		0	8	24		0
	<b>Всего</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Время: 12-00 - 13-00

№ п/п	Вид транспортных средств	Направление движения транспорта		
		Поворот направо	Прямое	Поворот налево



	средств	Na	Nпр.а.	Na	Nпр.а.	Na	Nпр.а.
5	Троллейбусы		0	10	30		0
	<b>Всего</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

В рис.1 приведен режим работы светофорной сигнализации.

**Ул.Московская - Ул.Логвиненко**

График включения сигналов	Длительность, с		
	$t_3$	$t_ж$	$t_к$
	20	4	25
	21	4	24
1-фаза	2-фаза		

Рис. 1. Режим работы светофорной сигнализации

Некоторые результаты, нанесенные в табл.1 для определения степени сложности перекрестков в виде условных картограмм интенсивностей движения транспортных средств указаны на рис.2 – наблюдения 12<sup>00</sup>–13<sup>00</sup>ч., и на рис.3 – наблюдения 18<sup>00</sup>–19<sup>00</sup>ч.

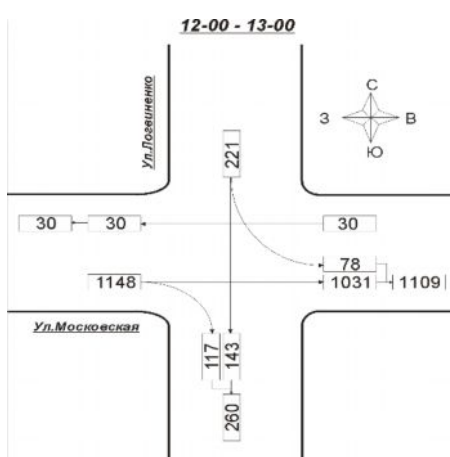


Рис. 2. Наблюдения 12<sup>00</sup>–13<sup>00</sup>ч.

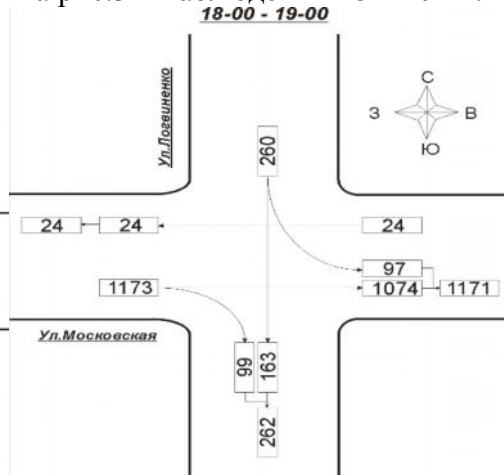
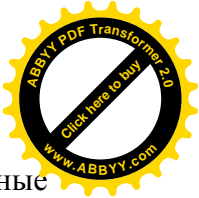
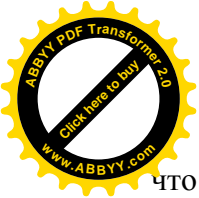


Рис. 3. Наблюдения 18<sup>00</sup>–19<sup>00</sup>ч.

**2. Математическое моделирование и определение плотности распределения движения транспортных средств с учетом эффективности организации дорожного движения.** Поток транспорта на двусторонней многополосной проезжей части между регулируемыми перекрестками удобно изучать и вполне возможно улучшить по аналогии математической модели расчета исходя из уравнения неразрывности нестационарной задачи гидромеханики. Путем получения аналитических решений в разных вариантах задаваемых значений скоростей определяются плотности распределения движения транспортных средств.

На основе ранее изученных статистических данных вполне возможно улучшить методику исследования по аналогии математической модели расчета исходя из уравнения неразрывности нестационарной задачи гидромеханики. Путем получения аналитических решений в разных вариантах задаваемых значений скоростей определяются плотности распределения движения  $i$ -го транспорта, на  $j$ -й полосе,  $m_{i,1}$  - показатель массы  $i$  транспортных средств на первой полосе. Пусть  $j = 1, 2, \dots, N$ ;  $i = 1, 2, \dots, M$  и предположим,



что  $N = 3$ . Приведенная средняя ширина транспортных средств  $h_j = h$ ; приведенные длины транспортных средств  $\bar{L}_j + \bar{d} = d_j$ , (5)

где  $\bar{L}_j$  - средние длины автомобилей на  $j$ -й полосе,  $\bar{d}$  - постоянная длина дистанции, соблюдаемые водителями по правилам дорожного движения.  $L$  - расстояние от одного конкретного перекрестка до следующего. Обозначая приведенного среднего габарита по высоте через  $b$ , максимальную плотность распределения выразим как:

$$\rho_{M,j} = \sum_{i=1}^M m_{i,j} / (b \cdot h \cdot d_j), \quad (6)$$

а именно  $\rho_{\max} = \rho_{M,j}$  при переходе к безразмерным величинам. На расстоянии  $L$  могут поместиться  $M_j^{\max} = L/d_j$  максимальное количество транспортных средств. Вместимость транспортных средств  $M_j$ -й полосы можно определить как

$$0 \leq M_j \leq L/d_j. \quad (7)$$

При  $M_j = 0$  на данной полосе движение отсутствует. Учитывая, что движения происходит в каждый момент времени  $t_0 \leq t \leq t_L$  и транспортные средства могут находиться в положении  $0 \leq x(t) \leq L$  введем обозначение для плотности распределения

$$\rho(t, x) = \rho_j = \sum_{i=1}^{M_j} \frac{m_{i,j}}{b \cdot h \cdot L} = \frac{\bar{m}_j}{L}. \quad (6a)$$

Каждый транспорт может двигаться со скоростью  $v_{i,j} = v_{i,j}(t, x)$ , в момент времени  $t$ , т.е.

$i$ -й транспорт на  $j$ -й полосе движется со скоростью  $v_{i,j}$ .

Поперечные движения транспорта из одной полосы в другую следует получить, опираясь на статистические данные. В проезжей части с двумя, тремя и более полосами в одном направлении участки дорог транспортные средства по правой полосе обычно движутся медленнее, чем по средней и левой полосе из-за остановок, стоянок и других факторов. А на перекрестках могут случаться другие темпы движения. Поворот налево обычно происходит медленнее, чем направо или прямое движение.

Некоторые признаки гидромеханического аналога, т.е. уравнения движения и особенно уравнение неразрывности дают определенные формулярные модельные решения при нескольких допущениях. Несмотря на то, что распределение скорости движения  $v = v(t, x)$  не подчиняется гидромеханическим законам, рекомендуется использовать данные статистического анализа. Решение задачи частично с успехом может опираться решению

уравнения неразрывности 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial x} = 0.$$

(8) Начальные и граничные условия для решения данного уравнения будем рассматривать далее определяя явный вид функции  $v(t, x)$ . Эти условия можно связывать с четырьмя тактами работы светофоров на перекрестках в концах проезжей части.

В [2] нами были получены аналитические решения уравнения (8) предполагая  $v(t, x)$  в разных формах: 1) пусть  $v = const$ ; выпишем полученное решение окончательно в виде

$$\rho(t, x) = \rho_0(t) \cdot e^{\frac{\rho_L(t) \cdot x}{\rho_0(t) \cdot L}}. \quad (9)$$

2) Если  $v = v(t)$ , то решение представляется в виде,

$$\rho(t, x) = \rho_0(t) \left[ \frac{\rho_L(t)}{\rho_0(t)} \right]^{\frac{x}{L}}. \quad (10)$$

3)  $v = v(x)$ , где  $v(x)$  получается полуэмпирической форме или статистическими данными, тогда решение задачи выписывается как:



$$\rho(t, x) = \rho_0(t) \left[ \frac{\rho_L(t)}{\rho_0(t)} \right]^{\int \left( \frac{1}{v(L)} - \frac{1}{v(0)} \right) dx \cdot \left[ 1 - t + \int \frac{1}{v(x)} dx \right]} \quad (11)$$

4) Если  $v = v(t, x)$  - задается в явном виде, решение может получиться разными методами.

**3. Исследование движения транспортных средств имитационными моделями** шире распространяется с развитием современных программных обеспечений. Имитационные модели транспорта могут оказывать услуги по техническому консалтингу. Модели описывают поведение всех участников движения [3]. Построение имитационных моделей связано с использованием агентного подхода. Для решения проблем дорожного движения следует пользоваться одним из наиболее перспективных способов - *интеллектуальными транспортными системами (ИТС)*. ИТС – это системная интеграция средств автоматизации и информационных систем с инфраструктурой транспортных средств и их пользователями, для повышения эффективности управления и обеспечения безопасности дорожного движения и комфорта участников.

Для многоагентного подхода поставлены задачи: создать имитационную модель расширения агента-участника движения; проектировать модель ИТС, реализовать и провести сравнительные эксперименты; на платформе Anylogic разработать имитационную модель агента, используемую при низкоуровневом имитационном моделировании транспортных систем; выработать рекомендацию моделью агента-участника движения.

Использование светофоров в обычном режиме способствует создавать огромные пробки на перекрестках дорог, а могут, напротив, поможет их избегать — зависит от того, как их следует настроить и как управлять ими. Предлагаемый ИТС включает в себе три компонента: сенсоры, которые собирают информации о ситуации дорожного движения; интеллектуальные агенты, получающие от сенсоров информации о дорожных ситуациях, которые обмениваются потоком данных с соседними агентами и автоматически принимают решения, влияющие на изменения длительности времени переключения светофора; управляемые светофоры (рис. 4). Интеллектуальным агентом-перекрестком автоматически переключаются светофоры на перекрестке, чтобы избегать конфликтных опасных дорожных ситуаций. Агент стремится не допускать превышения времени ожидания машин; предусмотрены обмены информацией между агентами о времени ожидания на сигналы в светофорах и о предстоящих действиях; агенту известны про себя и про непосредственных своих соседей.

Среди систем имитационного моделирования, предоставляющих объединенный подход, стоит выделить Система AnyLogic, объединяет возможности для создания моделей, основанной на модели системной динамики, на дискретно-событийные модели и модели агентного подхода. Пакет AnyLogic способен поддерживать различные гибридные подходы моделирования. Именно AnyLogic является уникальным инструментом быстрого создания гибких взаимодействий с агентами друг с другом. Пакет поддерживает все способы описания поведения агентов – стейтчарты (диаграммы их состояний), планирование событий в синхронном и асинхронном режимах.

В работе рассмотрено программное обеспечение, используемое для моделирования транспортных задач, а также библиотека классов, разработанная в среде пакета AnyLogic для его адаптации к данной прикладной области [4]. Рассматривается также пример модели транспортного узла, построенной с помощью разработанной библиотеки.



Рис. 4. Компоненты ИТС

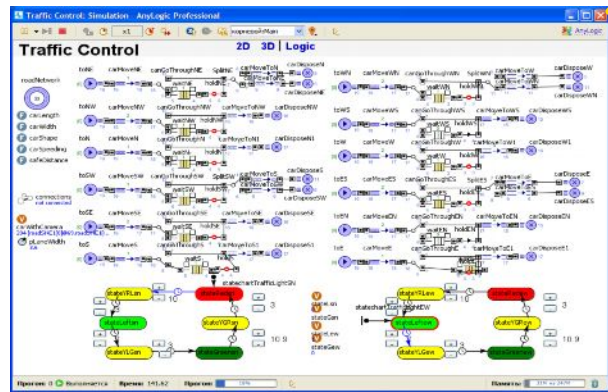


Рис. 5. Логистика всей модели



Рис. 6. Интерфейс модели

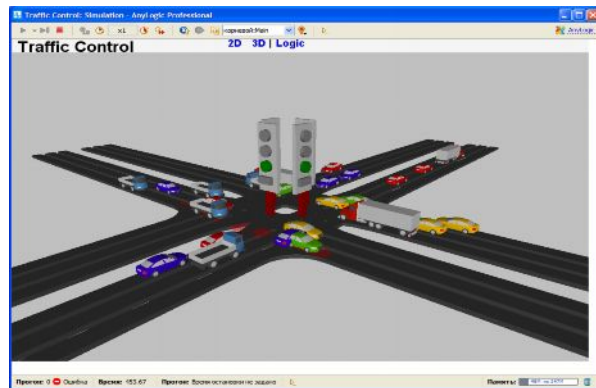


Рис. 7. 3D модель перекрестка

При работе в Anylogic создаётся новая модель в изучаемом объекте по имени «Перекресток», где загружается спутниковый снимок перекрестка, например, ул.Московская - ул.Панфилова. После добавления спутникового снимка «Перекрестка» (рис. 8) можно построить дорожную сеть. Далее масштабируется модель на основе спутникового снимка, перетаскиванием линейки задаётся соответствующие пикселя на 20 метров и можно рисовать дорожную сеть. Переходя к палитре, библиотека дорожного движения (рис. 9), выбирается элемент дороги для ее рисования. В дальнейшем можно указывать количество полос, задать ширину разделительных полос, редактировать до полной сходимости спутникового снимка и сохранить модель. При присоединении двух дорог программа автоматически создаёт перекрёсток с разрешёнными направлениями движения, которого в дальнейшем можно будет отредактировать. Для движения, на перекрестках выделяя направления можно добавить транспортный поток, с помощью «carSource» берётся из палитры дорожного движения в окно. Далее из окна дорожного движения выбирается «carMoveTo» для направления транспорта. Рассмотрим последний поток автомобилей, который устанавливает поворот с улицы Московской. Компонент библиотеки Conveyor1R задаёт определённую область движения (анимация для этого компонента - линия движения) каждого транспортного средства, и для каждого в этой области задаётся определённая скорость. Аналогично описываются оставшиеся три потока.

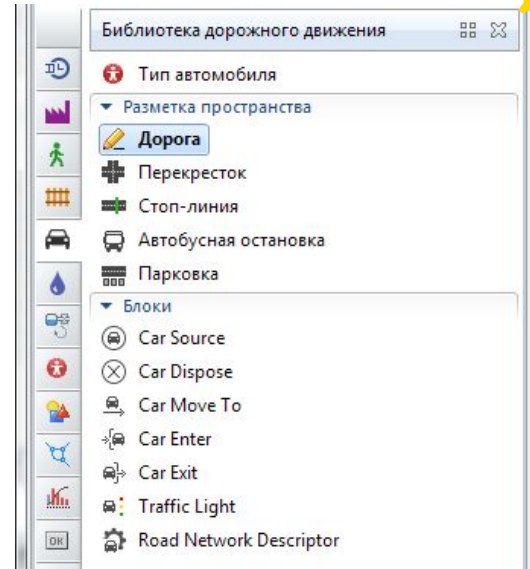
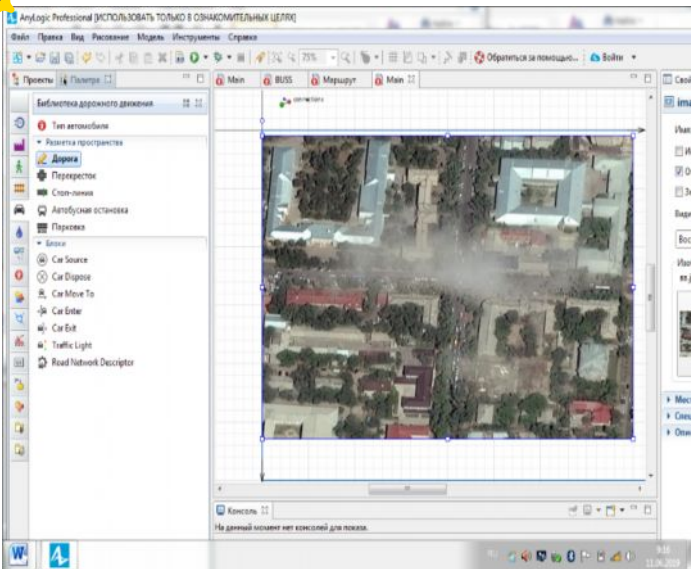


Рис. 8. После спутникового снимка «Перекрёстка» Рис. 9. Библиотека дорожных движений

Организация работы светофоров, регулирующие движения автомобилей на пересечении, может находиться в разных состояниях. В каждом состоянии светофор находится в постоянном периоде времени. Для построения светофора используются элементы

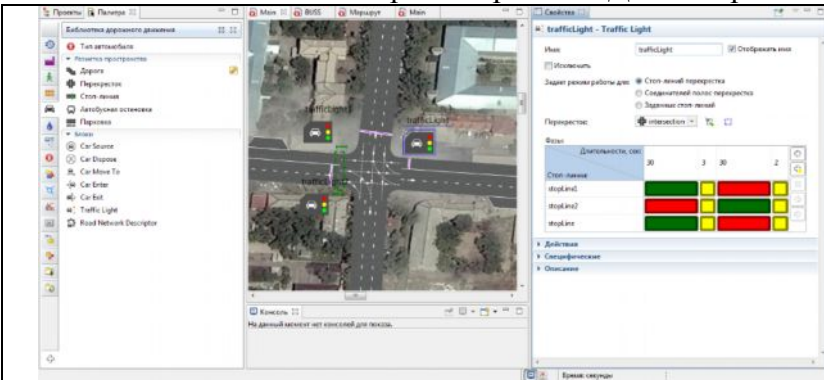


Рис. 10. Блоки «TrafficLight» светофорной регулировки.

из палитры дорожного движения, перетаскиванием из блока «TrafficLight». В соответствии с алгоритмом светофора, помимо начального состояния, в модель вводятся дополнительные состояния. Начальное состояние - движение разрешено (зелёный свет), затем светофор переходит во внимание - (мигает зелёный), поверните -

зелёная стрелка загорается, медленно - готовьтесь к остановке (жёлтый свет), остановить движение - (красный свет) и подготовиться - подготовиться к следующему движению. Переходы в автоматических светофорах истекают по истечении времени ожидания. Для условия начала переходов, таймер устанавливается для каждого состояния перехода, и он определяется для каждого отдельного состояния и настраивается с использованием жёлтых, красных, зелёных дополнительных параметров, которые являются логическими переменными и переходят в истинное состояние в определённое состояние системы.

Диаграмма состояний необходима для контроля значений этих параметров, каждое состояние отвечает за зажигание собственного света или их комбинации. Далее рассчитывается средний поток движения. Необходимо собрать соответствующие статистические данные. Для начала создается новый тип параметра под названием «время Появления» и дается некая анимация. Соответствующий тип автомобиля указывается во всех источниках «carSource». Требуется также популяция из машин на агенте main называемой популяцией на «авто». После создание популяции агента выбирается его в блоке carSource.

Можно построить гистограмму из палитры «Статистики», «Данные гистограммы».



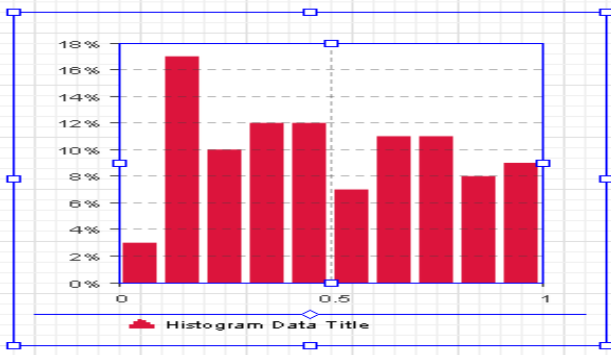
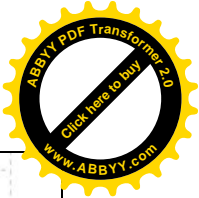
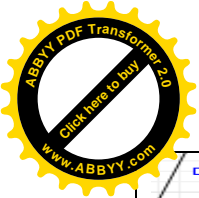


Рис. 11. Данные гистограммы «времяПроезда».

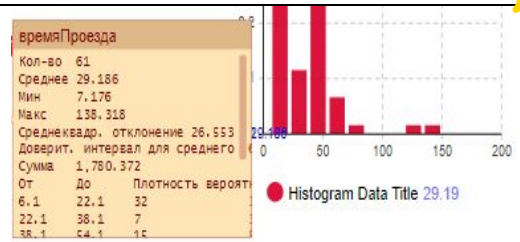


Рис.12. Статистика «времяПояления». Данные были получены путем наблюдения съемки и подсчета и на мобильном телефоне в 2019 г. по вышеизложенной методике расчета.

### Список литературы

1. Самойлов Д.С. Организация и безопасность городского движения [Текст] Д.С. Самойлов, В.А. Юдин, П.В. Рушевский. - М.: Транспорт, Высшая школа, 1981. – 256с. с.
2. Осмонов К.Т. Теоретическое определение плотности распределения движения транспортных средств на участке дороги с регулируемыми перекрестками на концах [Текст] / К.Т.Осмонов // Вестник КГУСТА.. - Бишкек 2012. - вып. 2(36). - С. 146-152.
3. Фишельсон М.С. Транспортная планировка городов [Текст] / М.С.Фишельсон. - М.: Выс.шк., 1985. - 239 с.
4. Токтакунов Т. Имитационное моделирование экономических процессов [Текст] / Т.Токтакунов, С.Т.Алиева. - Бишкек: 2016. – 193 с.