

DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.70.86

Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечеткой кластеризации

А.Л. Бекларян^{a, b} 

E-mail: abeklaryan@hse.ru

Л.А. Бекларян^b 

E-mail: beklar@cemi.rssi.ru

А.С. Акопов^b 

E-mail: akopovas@umail.ru

^a Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Адрес: Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

^b Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук
Адрес: Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47

Аннотация

В данной статье представлена новая имитационная модель интеллектуальной транспортной системы (ИТС) «умного города» с адаптивным управлением светофорами. Предложенная транспортная модель, реализованная в AnyLogic, позволяет изучать поведение взаимодействующих агентов: транспортных средств (ТС) и пешеходов (П) в рамках многоагентной ИТС типа «Манхэттенской решетки». Пространственная динамика агентов в подобной ИТС описывается с использованием систем конечно-разностных уравнений с переменной структурой с учетом регулирующего воздействия «умных» светофоров. Исследованы различные способы управления светофорами, направленные на максимизацию суммарного трафика выходного потока ИТС, в частности, посредством формирования требуемой длительности фаз с использованием генетического оптимизационного алгоритма, с помощью локального («слабоадаптивного») управления переключениями и на основе предложенного алгоритма нечеткой кластеризации. Исследуются возможности оптимизации характеристик систем индивидуального управления

поведением светофоров при различных сценариях, в частности, для ИТС с пространственно-однородными и периодическими характеристиками. Для определения наилучших значений индивидуальных параметров систем управления светофорами, таких как, длительности фаз, радиусы наблюдений за транспортными и пешеходными потоками, пороговые коэффициенты, количество кластеров и др., применяется ранее предложенный параллельный генетический оптимизационный алгоритм с вещественным кодированием (класса RCGA). Предложенный метод адаптивного управления светофорами на основе нечеткой кластеризации демонстрирует большую эффективность в сравнении с известными методами коллективного воздействия и локального («слабоадаптивного») управления. Результаты работы могут быть рассмотрены как компонента системы принятия решений в управления городскими службами.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система, «умный город», «умные светофоры», агентное моделирование, адаптивное управление, нечеткая кластеризация, AnyLogic

Цитирование: Бекларян А.Л., Бекларян Л.А., Акопов А.С. Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечеткой кластеризации // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 3. С. 70–86. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.70.86

Введение

В настоящее время наблюдается рост потребностей в проектировании и внедрении интеллектуальных транспортных систем (ИТС) для «умного города», обусловленный постоянно увеличивающимся трафиком, обуславливающим формирование множественных дорожных заторов. При этом одним из наиболее перспективных направлений эволюционного развития ИТС является использование «умных» светофоров, анализирующих динамику и структуру транспортных и пешеходных потоков [1].

Известны различные подходы к рациональному управлению светофорами, в частности, на основе информационного обмена [2], с использованием методов машинного обучения с подкреплением [3], на основе смешанного целочисленного программирования [4, 5], с помощью генетических и роевых оптимизационных алгоритмов [6–8], а также искусственных нейронных сетей (ИНС), нечеткой логики, кластеризации и адаптивного управления в ИТС [11–13].

Для изучения поведения и оптимизации характеристик ИТС применяются различные комбинированные подходы, например, методы агентного и дискретно-событийного моделирования, поддерживаемые в AnyLogic [14, 15], совместное управление сигналами светофоров и траекториями

движения транспортных средств [16], адаптивное управление на основе прогнозной модели и обучения с подкреплением [17]. Вместе с тем, большинство подобных подходов применяется для ИТС с упрощенной конфигурацией, например, для двух последовательно расположенных перекрестков [15], одного перекрестка, состоящего из двух дорог и т.д. [17]. Различные сценарии, определяющие периодическую динамику взаимодействующих транспортных и пешеходных, при этом не учитываются.

Как правило, существенные трудности возникают при управлении характеристиками ИТС с более сложной геометрией типа «Манхэттенская решетка» [18, 19]. В подобных ИТС, несогласованное управление состояниями хотя бы одного светофора, как правило, приводит к изменению скорости ТС и плотности дорожного движения на всех связанных маршрутах. При этом, для максимизации трафика выходного потока необходимо осуществлять эффективное управление светофорами, обеспечивая периодическую приоритизацию между ТС и пешеходами. Так, например, при скоплении значительного числа людей на регулируемом пешеходном переходе, обосновано включение разрешающего сигнала светофора (подобный подход, в частности, уже успешно применяется в уличной дорожной сети некоторых городов в Австрии¹). При этом, основное назначение «умных светофо-

¹ <https://www.wien.gv.at/english/transportation-urbanplanning/diversity-themed-traffic-lights.html>

ров» состоит в мониторинге транспортных потоков и выборе оптимальных моментов времени для переключения регулирующих сигналов. Наибольшие трудности при управлении транспортными потоками обусловлены эффектом «волнового снижения скорости» [20], когда в результате торможения ТС у светофора, все последующие за ним водители непреднамеренно стремятся к увеличению безопасной дистанции, способствуя формированию дорожных заторов. Поэтому необходимо изучать неоднородную пространственную динамику агентов и использовать данные о структуре транспортных и пешеходных потоков для адаптивного управления светофорами.

В данной статье, предложена новая имитационная модель гетерогенных транспортных потоков в «умном городе» с адаптивным управлением поведением светофоров на основе нечеткой кластеризации. В рамках подобной модели, принятие индивидуальных решений о переключении регулирующих сигналов светофоров основано на нечеткой оценке дорожной ситуации, включающей эволюционную динамику как транспортных, так и пешеходных потоков (т.е. при равном приоритете по отношению к автомобилям и пешеходам). При этом, решается важная задача по максимизации суммарного трафика выходного потока при различных сценариях, в частности, для ИТС с пространственно-однородными и периодическими характеристиками потоков.

Представленные в работе сценарии, соответствующие оптимальные управления, а также, в целом, предложенная универсальная имитационная модель с возможностью дальнейшей модификации изучаемой геометрии перекрестков, как видится авторам, может быть рассмотрена как элемент комплексной системы принятия решений в управлении городскими службами.

1. Описание модели

Рассматривается ключевой фрагмент многоагентной транспортной системы типа «Манхэттенская решетка», состоящий из четырех взаимосвязанных узлов-перекрестков, допускающих произвольную смену направлений движения ТС, т.е. движение по прямой, повороты налево и направо, а также разворот и движение в обратном направлении (рис. 1).

Ранее, в [18, 19], исследована динамика транспортных потоков в системах класса «Манхэттенская решетка» и предложены различные способы

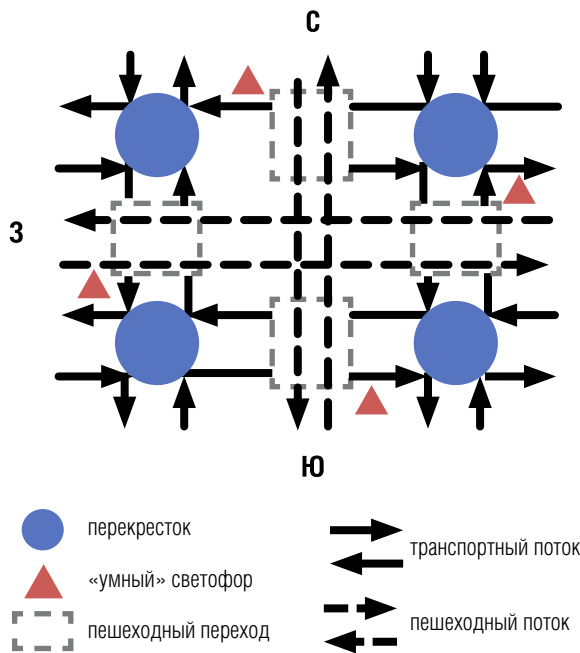


Рис. 1. Общая схема многоагентной транспортной системы типа «Манхэттенская решетка» с регулируемым движением на пешеходных переходах.

их оптимизации, преимущественно основанные на управлении маршрутами ТС, т.е. поиске и назначении оптимальных маршрутов для каждого агента-ТС [18], в том числе, с использованием генетических алгоритмов [19]. При этом, одним из важных способов снижения нагрузки на ИТС, является улучшение маневренности ТС, в том числе за счет выбора наименее загруженных полос движения, определение которых реализуется с использованием алгоритма нечеткой кластеризации [21, 22]. Существующие методы улучшения трафика дорожного потока реализуемы преимущественно для беспилотных транспортных средств (БТС), которым можно «назначить» оптимальный маршрут в зависимости от текущей ситуации. На пространственную динамику обычных транспортных средств (ОТС), наибольшее влияние оказывают «умные» светофоры, регулирующие движение транспортных и пешеходных потоков. В частности, они позволяют эффективно перераспределять потоки ТС на перекрестках и пешеходных переходах, препятствуя формированию дорожных заторов.

Подобные дорожные заторы, образуются в основном в результате «волнового снижения скорости»,

впервые исследованного в [20] и проиллюстрированного на рисунке 2. При торможении ТС, например, у стоп-линии регулируемого пешеходного перехода или перед ближайшим препятствием в виде другого ТС (рис. 2), следующий за ним автомобиль, из-за психологических особенностей реакции водителя, как правило, затормозит сильнее, чтобы сохранить безопасную дистанцию увеличив радиус своего личного пространства. Далее, эффект нарастающего увеличения «безопасной» дистанции («расширения» личного пространства) распространяется по цепочке, уменьшая скорость потока по мере удаления от первоначального источника затора (светофора), вплоть до полной остановки.

Для моделирования пространственной динамики агентов в ИТС (ТС и пешеходов) можно использовать системы конечно-разностных уравнений с переменной структурой [21, 23], что позволяет учесть различные сценарии взаимодействия ТС друг с другом и с внешней средой (типа V2V, V2P, V2I и т.д.) и влияние радиуса личного пространства каждого агента.

Приведем краткое формальное описание разработанной имитационной модели движения ТС с учетом влияния «умных» светофоров, регулирующих трафик транспортного и пешеходного потока в ИТС.

Пусть

$T = \{t_0, t_1, \dots, |T|\}$ – набор временных моментов (в мин.), где $|T|$ – общее количество временных моментов, $t_0 \in T, t_{|T|} \in T$ – начальные и конечные моменты времени;

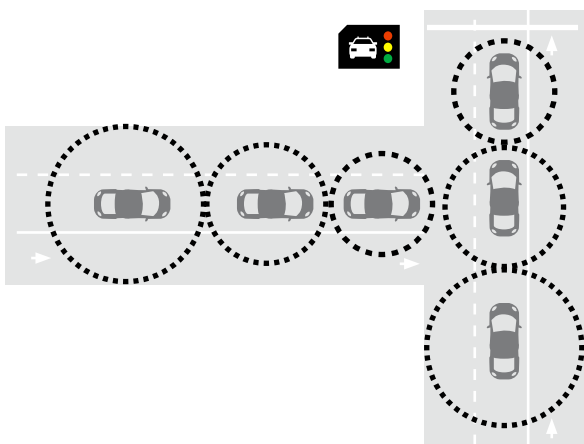


Рис. 2. Иллюстрация эффекта «волнового снижения скорости» в дорожной сети с регулируемым пешеходным переходом.

$L = \{l_0, l_1, \dots, l_{|L|}\}$ – набор индексов «умных» светофоров, где $|L|$ – общее количество «умных» светофоров;

$s_l(t_{k-1}) \in \{1, 2, 3\}, l \in L$ – состояния фаз l -го «умного» светофора в момент $t_{k-1} (t_{k-1} \in T)$: $s_l(t_{k-1}) = 1$ – запрещающий (для агентов-ТС) сигнал светофора («красный»), $s_l(t_{k-1}) = 2$ – предупреждающий сигнал светофора («желтый»), $s_l(t_{k-1}) = 3$ – разрешающий (для агентов-ТС) сигнал светофора («зеленый»);

$\{\tau_{l1}, \tau_{l2}, \tau_{l3}\} \in T, l \in L$ – длительности фаз l -го «умного» светофора (в сек.) (управляющий параметр модели);

$\tilde{\tau}_l$ – минимально необходимая (для обеспечения безопасного трафика) длительность основной фазы («красного» или «зеленого») для «умных» светофоров (в сек.) (управляющий параметр модели);

$\{P_l(t_{k-1}), V_l(t_{k-1})\}$ – суммарное количество пешеходов и ТС, соответственно, находящихся в зонах мониторинга l -го «умного» светофора в момент $t_{k-1} (t_{k-1} \in T)$;

$\{\tilde{V}_l(t_{k-1}), \tilde{D}_l(t_{k-1})\}$ – суммарное количество ТС в кластерах и среднее межкластерное расстояние, вычисляемые с использованием алгоритма нечеткой кластеризации применительно к агентам, находящимся в зонах мониторинга l -го «умного» светофора в момент $t_{k-1} (t_{k-1} \in T)$;

$\delta_l, l \in L$ – пороговое соотношение между количеством пешеходов на переходе, регулируемым l -м «умным» светофором и суммарным числом агентов-ТС, планирующих переехать данный переход (в любом направлении), при котором необходимо включить разрешающий сигнал светофора (управляющий параметр модели);

$\alpha_l, l \in L$ – коэффициент значимости среднего межкластерного расстояния (для ТС), оцениваемого с использованием алгоритма нечеткой кластеризации при управлении транспортными потоками, регулируемые l -м «умным» светофором (управляющий параметр модели).

Состояние фазы l -го «умного» светофора ($l \in L$) в момент $t_k (t_k \in T)$ задается в соответствии со следующими правилами:

$$s_l(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется I, II, или III,} \\ 2, & \text{если выполняется IV,} \\ 3, & \text{если выполняется V, VI, или VII,} \end{cases} \quad (1)$$

при условиях:

I. $(t_k \leq t_{k-1} + \tau_{11}$ и $s_l(t_{k-1}) = 1$) или $(t_k > t_{k-1} + \tau_{12} + \tau_{13}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$) – при **первом способе** управления длительностью фаз, на основе **коллективного воздействия на светофоры**;

II. $((t_k \leq t_{k-1} + \tau_{11}$ и $s_l(t_{k-1}) = 1$) или $(t_k > t_{k-1} + \tau_{12} + \tau_{13}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$)) или

$$\left(\frac{P_l(t_{k-1})}{V_l(t_{k-1})} > \delta_l \text{ и } s_l(t_{k-1}) = 3 \text{ и } t_k > t_{k-1} + \tilde{\tau}_l \right) - \text{ при}$$

втором способе управления длительностью фаз на основе локального («слабоадаптивного») управления переключениями светофоров с учетом **приоритетизации трафика пешеходного потока**;

III. $((t_k \leq t_{k-1} + \tau_{11}$ и $s_l(t_{k-1}) = 1$) или

$$(t_k > t_{k-1} + \tau_{12} + \tau_{13} \text{ и } s_l(t_{k-1}) = 3)) \text{ или}$$

$$\left(\frac{P_l(t_{k-1})}{\tilde{V}_l(t_{k-1})(\tilde{D}_l(t_{k-1}))^{-\alpha_l}} > \delta_l \text{ и } s_l(t_{k-1}) = 3 \text{ и } t_k > t_{k-1} + \tilde{\tau}_l \right) -$$

при **третьем (адаптивном) способе** управления длительностью фаз на основе алгоритма нечеткой кластеризации с учетом **приоритетизации трафика пешеходного потока**;

IV. $((t_k > t_{k-1} + \tau_{11}$ и $s_l(t_{k-1}) = 1$) или $(t_k > t_{k-1} + \tau_{13}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$)) или $(t_k \leq t_{k-1} + \tau_{12}$ и $s_l(t_{k-1}) = 2$) – что означает, что истекло время действия одного из основных сигналов светофора («красного» или «зеленого») или продолжает действовать, ранее включенный предупреждающий («желтый») сигнал;

V. $(t_k \leq t_{k-1} + \tau_{13}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$) или $(t_k > t_{k-1} + \tau_{12} + \tau_{11}$ и $s_l(t_{k-1}) = 1$) – при **первом способе** управления длительностью фаз, на основе **коллективного воздействия на светофоры**;

VI. $((t_k \leq t_{k-1} + \tau_{13}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$) или

$$(t_k > t_{k-1} + \tau_{12} + \tau_{11} \text{ и } s_l(t_{k-1}) = 1)) \text{ или}$$

$$\left(\frac{P_l(t_{k-1})}{V_l(t_{k-1})} < \delta_l \text{ и } s_l(t_{k-1}) = 1 \text{ и } t_k > t_{k-1} + \tilde{\tau}_l \right) - \text{ при}$$

втором способе управления длительностью фаз на основе локального («слабоадаптивного») управления переключениями светофоров с учетом **приоритетизации трафика транспортного потока**;

VII. $((t_k \leq t_{k-1} + \tau_{11}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$) или

$$(t_k > t_{k-1} + \tau_{12} + \tau_{11} \text{ и } s_l(t_{k-1}) = 1)) \text{ или}$$

$\left(\frac{P_l(t_{k-1})}{\tilde{V}_l(t_{k-1})(\tilde{D}_l(t_{k-1}))^{-\alpha_l}} < \delta_l \text{ и } s_l(t_{k-1}) = 1 \text{ и } t_k > t_{k-1} + \tilde{\tau}_l \right) -$
при **третьем (адаптивном) способе** управления длительностью фаз, на основе **алгоритма нечеткой кластеризации с учетом приоритетизации трафика транспортного потока**.

Суммарное количество ТС и пешеходов, находящихся в зонах мониторинга l -го «умного» светофора ($l \in L$) в момент t_k ($t_k \in T$) вычисляемые при втором способе локального («слабоадаптивного») управления переключениями равны

$$V_l(t_k) = \sum_{i=1}^{|I|} v_{il}(t_k), \quad P_l(t_k) = \sum_{i=1}^{|\tilde{I}|} p_{i\tilde{l}}(t_k), \quad (2)$$

где

$$v_{il}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } d_{il}(t_k) \leq R_{11}, \\ 0, & \text{если } d_{il}(t_k) > R_{11}, \end{cases} \quad (3)$$

$$p_{i\tilde{l}}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{d}_{i\tilde{l}}(t_k) \leq R_{11}, \\ 0, & \text{если } \tilde{d}_{i\tilde{l}}(t_k) > R_{12}, \end{cases}$$

где

$I = \{i_1, i_2, \dots, i_{|I|}\}$ – набор индексов агентов-транспортных средств (ТС), где $|I|$ – общее количество транспортных средств;

$\tilde{I} = \{\tilde{i}_1, \tilde{i}_2, \dots, \tilde{i}_{|\tilde{I}|}\}$ – набор индексов агентов-пешеходов, где $|\tilde{I}|$ – общее количество пешеходов;

$\{R_{11}, R_{12}\}$, $l \in L$ – радиусы зон мониторинга трафика дорожного и пешеходного потока, соответственно, для l -го «умного» светофора (*управляющий параметр модели*);

$\{d_{il}(t_k), \tilde{d}_{i\tilde{l}}(t_k)\}$, $i \in I$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$, $l \in L$ – расстояния от i -го агента-ТС и \tilde{i} -го агента-пешехода до l -го «умного» светофора в момент t_k ($t_k \in T$).

Суммарное количество ТС в кластерах и среднее межкластерное расстояние для транспортных потоков, находящихся в зонах мониторинга l -го «умного» светофора ($l \in L$) в момент t_k ($t_k \in T$) вычисляемые при третьем способе адаптивного управления переключениями с использованием алгоритма нечеткой кластеризации равны

$$\tilde{V}_l(t_k) = \sum_{i=1}^{|I|} \sum_{c_j=1}^{|C_j|} \tilde{v}_{ic_j}(t_k), \quad \tilde{D}_l(t_k) = \frac{1}{|C_l|} \sum_{c_j=1}^{|C_l|} \sum_{\tilde{c}_j=1}^{\hat{c}_{c_j}} \hat{d}_{c_j \tilde{c}_j}(t_k), \quad (4)$$

где

$C_l = \{c_{1l}, c_{2l}, \dots, c_{|C_l|l}\}$, $l \in L$ – набор индексов кластеров определяемых для анализа дорожной ситуации в районе расположения l -го «умного»

светофора с использованием алгоритма нечеткой кластеризации, где $|C_l|$ – общее количество кластеров (*управляющий параметр модели*);

$\tilde{v}_{c_i}(t_k)$, $i \in I$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$, $l \in L$ – суммарное количество ТС, принадлежащих c_l -му кластеру в момент t_k ($t_k \in T$);

$\hat{d}_{c_i \tilde{c}_i}(t_k)$, $c_l, \tilde{c}_l \in C_l$, $c_l \neq \tilde{c}_l$, $l \in L$ – попарные расстояния между центрами кластеров, относящихся к l -му «умному» светофору в момент t_k ($t_k \in T$).

Пространственная динамика агентов-ТС и пешеходов может быть смоделирована с использованием систем конечно-разностных уравнений с переменной структурой с учетом регулирующего воздействия «умных» светофоров.

Пусть

$\{x_{il}(t_k), y_{il}(t_k)\}$, $\{\tilde{x}_{\tilde{i}l}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}l}(t_k)\}$, $i \in I$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$, $l \in L$ – координаты i -го агента-ТС и \tilde{i} -го агента-пешехода находящегося в зоне мониторинга l -го «умного» светофора в момент t_k ($t_k \in T$);

$\{v_i(t_{k-1}), \tilde{v}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\}$, $i \in I$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$ – предпочитаемая скорость i -го агента-ТС и \tilde{i} -го агента-пешехода в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

$\{r_i(t_{k-1}), \tilde{r}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\}$, $i \in I$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$, $l \in L$ – радиусы личных пространств i -го агента-ТС и \tilde{i} -го агента-пешехода, значения которых зависят от плотности транспортного (пешеходного) потока, состоящего из агентов, снижающих свою скорость и расположенных по ходу движения (см. *рис. 2*) в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

$\{m_{ib}(t_k), \tilde{m}_{\tilde{i}b}(t_k)\}$, $i \in I$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$, $b \in I \cup \tilde{I}$ – расстояния от i -го агента-ТС и \tilde{i} -го агента-пешехода до ближайшего b -го агента-препятствия в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

$\{w_i(t_{k-1}), \tilde{w}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\}$, $\{q_i(t_{k-1}), \tilde{q}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\} \in \{-1, 0, 1\}$, $i \in I$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$ – параметры, определяющие направления движения i -го агента-ТС и \tilde{i} -го агента-пешехода в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

$w_i(t_{k-1}), \tilde{w}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = -1$ – при движении в направлении **ВЗ** (см. *рис. 1*),

$w_i(t_{k-1}), \tilde{w}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = 0$ – при движении в направлении **СЮ** или **ЮС**,

$w_i(t_{k-1}), \tilde{w}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = 1$ – при движении в направлении **ЗВ**, $q_i(t_{k-1}), \tilde{q}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = -1$ – при движении в направлении **ЮС**,

$q_i(t_{k-1}), \tilde{q}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = 0$ – при движении в направлении **ЗВ** или **ВЗ**,

$q_i(t_{k-1}), \tilde{q}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = 1$ – при движении в направлении **ЮС**;

λ – коэффициент задающий соотношение масштабов реального и модельного времени.

Пространственная динамика i -го агента-ТС ($i \in I$) и \tilde{i} -го агента-пешехода ($i \in I$), находящихся в зоне мониторинга l -го «умного» светофора ($l \in L$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) без учета внутреннего маневрирования (связанного с обгоном, сменой полос движения и т.д.) задается следующей системой конечно-разностных уравнений с переменной структурой:

$$x_{il}(t_k) = \begin{cases} x_{il}(t_{k-1}) + w_i(t_{k-1})\lambda v_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется VIII,} \\ x_{il}(t_{k-1}), & \text{если выполняется IX,} \end{cases} \quad (5)$$

$$y_{il}(t_k) = \begin{cases} y_{il}(t_{k-1}) + q_i(t_{k-1})\lambda v_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется VIII,} \\ y_{il}(t_{k-1}), & \text{если выполняется IX,} \end{cases} \quad (6)$$

$$\tilde{x}_{\tilde{i}l}(t_k) = \begin{cases} \tilde{x}_{\tilde{i}l}(t_{k-1}), & \text{если выполняется X,} \\ \tilde{x}_{\tilde{i}l}(t_{k-1}) + \tilde{w}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\lambda \tilde{v}_{\tilde{i}}(t_{k-1}), & \text{если выполняется XI,} \end{cases} \quad (7)$$

$$\tilde{y}_{\tilde{i}l}(t_k) = \begin{cases} \tilde{y}_{\tilde{i}l}(t_{k-1}), & \text{если выполняется X,} \\ \tilde{y}_{\tilde{i}l}(t_{k-1}) + \tilde{q}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\lambda \tilde{v}_{\tilde{i}}(t_{k-1}), & \text{если выполняется XI,} \end{cases} \quad (8)$$

$i \in I, \tilde{i} \in \tilde{I}, b \in I \cup \tilde{I}, l \in L$,
где

VIII. $s_i(t_{k-1}) = 3$ и $m_{ib}(t_{k-1}) > (r_i(t_{k-1}) + r_b(t_{k-1}))$ для ближайшего агента ($b \in I \cup \tilde{I}$), что означает, что действует разрешающий (для агентов-ТС) сигнал светофора («зеленый») и у i -го агента-ТС ($i \in I$) на пути нет препятствий в виде других ТС или пешеходов;

IX. $s_i(t_{k-1}) = 1$ или $m_{ib}(t_{k-1}) \leq (r_i(t_{k-1}) + r_b(t_{k-1}))$ для ближайшего агента ($b \in I \cup \tilde{I}$), что означает, что действует запрещающий (для агентов-ТС) сигнал светофора («красный») или у i -го агента-ТС ($i \in I$) на пути нет есть препятствие в виде другого ТС или пешехода;

X. $s_i(t_{k-1}) = 1$ и $\tilde{m}_{\tilde{i}b}(t_{k-1}) > (\tilde{r}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) + r_b(t_{k-1}))$ для ближайшего агента ($b \in I \cup \tilde{I}$), что означает, что действует запрещающий (для агентов-ТС) сигнал светофора («красный») и у \tilde{i} -го агента-пешехода ($\tilde{i} \in \tilde{I}$) на пути нет препятствий в виде других пешеходов или ТС;

XI. $s_i(t_{k-1}) = 1$ или $\tilde{m}_{\tilde{i}b}(t_{k-1}) \leq (\tilde{r}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) + r_b(t_{k-1}))$ для ближайшего агента ($b \in I \cup \tilde{I}$), что означает, что действует разрешающий (для агентов-ТС) сигнал светофора («зеленый») или у \tilde{i} -го агента-

пешехода ($\tilde{i} \in \tilde{I}$) на пути есть препятствие в виде другого пешехода или ТС.

Суммарный трафик выходного потока, который должен быть максимизирован равен

$$N = \sum_{t_k=0}^{|T|} \left(\sum_{i=1}^{|I|} n_i + \sum_{\tilde{i}=1}^{|\tilde{I}|} \tilde{n}_{\tilde{i}} \right), \quad (9)$$

где

$$n_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \{x_i(t_{k-1}), y_i(t_{k-1})\} \notin \{X, Y\}, \\ 0, & \text{если } \{x_i(t_{k-1}), y_i(t_{k-1})\} \in \{X, Y\}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\tilde{n}_{\tilde{i}}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_{k-1}), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\} \notin \{X, Y\}, \\ 0, & \text{если } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_{k-1}), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\} \in \{X, Y\}, \end{cases} \quad (11)$$

где

$\{x_i(t_{k-1}), y_i(t_{k-1})\}, \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_{k-1}), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_{k-1})\}, i \in I, \tilde{i} \in \tilde{I}$ – координаты i -го агента-ТС и \tilde{i} -го агента-пешехода в ИТС в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

$\{X, Y\}$ – множество всех координат цифровой дорожной сети ИТС.

Тогда, можно сформулировать следующую оптимизационную задачу, решаемую с учетом выбранного способа управления «умными» светофорами.

Задача А. Требуется максимизировать суммарный трафик выходного потока по набору управляющих параметров $\{\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tilde{\tau}_l, \delta_l, R_{1l}, R_{2l}, |C_l|, \alpha_l\}$:

$$\max_{\{\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tilde{\tau}_l, \delta_l, R_{1l}, R_{2l}, |C_l|, \alpha_l\}} N \quad (12)$$

при ограничениях

$$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tilde{\tau}_l \in [\underline{\tau}, \bar{\tau}], \delta_l \in [\underline{\delta}, \bar{\delta}], R_{1l} \in [\underline{R}_1, \bar{R}_1], R_{2l} \in [\underline{R}_2, \bar{R}_2], |C_l| \in [\underline{C}, \bar{C}], \alpha_l \in [\underline{\alpha}, \bar{\alpha}],$$

где $\{\underline{\tau}, \underline{\delta}, \underline{R}_1, \underline{R}_2, \underline{C}, \underline{\alpha}\}, \{\bar{\tau}, \bar{\delta}, \bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{C}, \bar{\alpha}\}$ – нижние и верхние граничные значения управляющих параметров модели.

Для решения **Задачи А** используется ранее предложенный генетический оптимизационный алгоритм вещественного кодирования (класса RCGA) [20, 25], агрегированный по целевому функционалу с разработанной имитационной моделью транспортной системы, реализованной в AnyLogic.

2. Алгоритм нечеткой кластеризации

Для оценки структуры транспортного потока и адаптивного управления «умными «светофорами» предлагается использовать алгоритм нечеткой кластеризации (Fuzzy C-means) [21, 22, 26, 27]. Вы-

бор данного алгоритма обусловлен, прежде всего, возможностью принятия во внимание различных характеристик движущихся ТС формировании кластеров, в частности, плотности, скорости, удаленности от светофора, регулирующего движение на переходном переходе и др. Включение подобных характеристик в кластерный анализ, позволяет достичь максимального «правдоподобия» при оценке структуры транспортного потока. В отличие от классических алгоритмов, Fuzzy C-means не относит объект однозначно к какому-нибудь кластеру, а сопоставляет каждому кластеру вероятность отнесения к нему наблюдаемых объектов, формируя так называемую матрицу принадлежности.

Укрупненная схема предложенного алгоритма нечеткой кластеризации представлена на *рисунке 3*. Важным отличием разработанного алгоритма от ранее известных, является то, что его ключевые характеристики (например, количество кластеров, радиус зоны мониторинга трафика дорожного потока и др.), вычисляются с использованием генетического оптимизационного алгоритма (класса RCGA) в рамках решения основной задачи по максимизации трафика выходного потока. В результате, результаты нечеткой кластеризации непосредственно влияют на возможности поиска оптимальных решений для изучаемой ИТС.

На *рисунке 3* используются следующие обозначения:

- ♦ $z \in [0, 1]$ – мера нечеткости;
- ♦ $M(k)$ – матрица принадлежности на k -м шаге алгоритма, $k = 1, 2, \dots, |K|$, где $|K|$ – максимальное число итераций;
- ♦ ε – малый параметр, являющийся критерием остановки алгоритма.

Таким образом, предложенный алгоритм нечеткой кластеризации агрегирован по целевому функционалу (суммарному трафику выходного потока ИТС), с генетическим алгоритмом вещественного кодирования (*рис. 3*). RCGA использует эвристические операторы кроссинговера и мутации (например, LX, SBX, SNUM, см. [21, 24, 25]) для формирования новых потенциальных решений с лучшими характеристиками. Алгоритм Fuzzy C-means был встроен в имитационную модель ИТС, реализованную в AnyLogic и выполняется на каждом шаге модельного времени, обеспечивая оценку структуры транспортного потока, находящегося в зоне мониторинга каждого «умного» светофора.

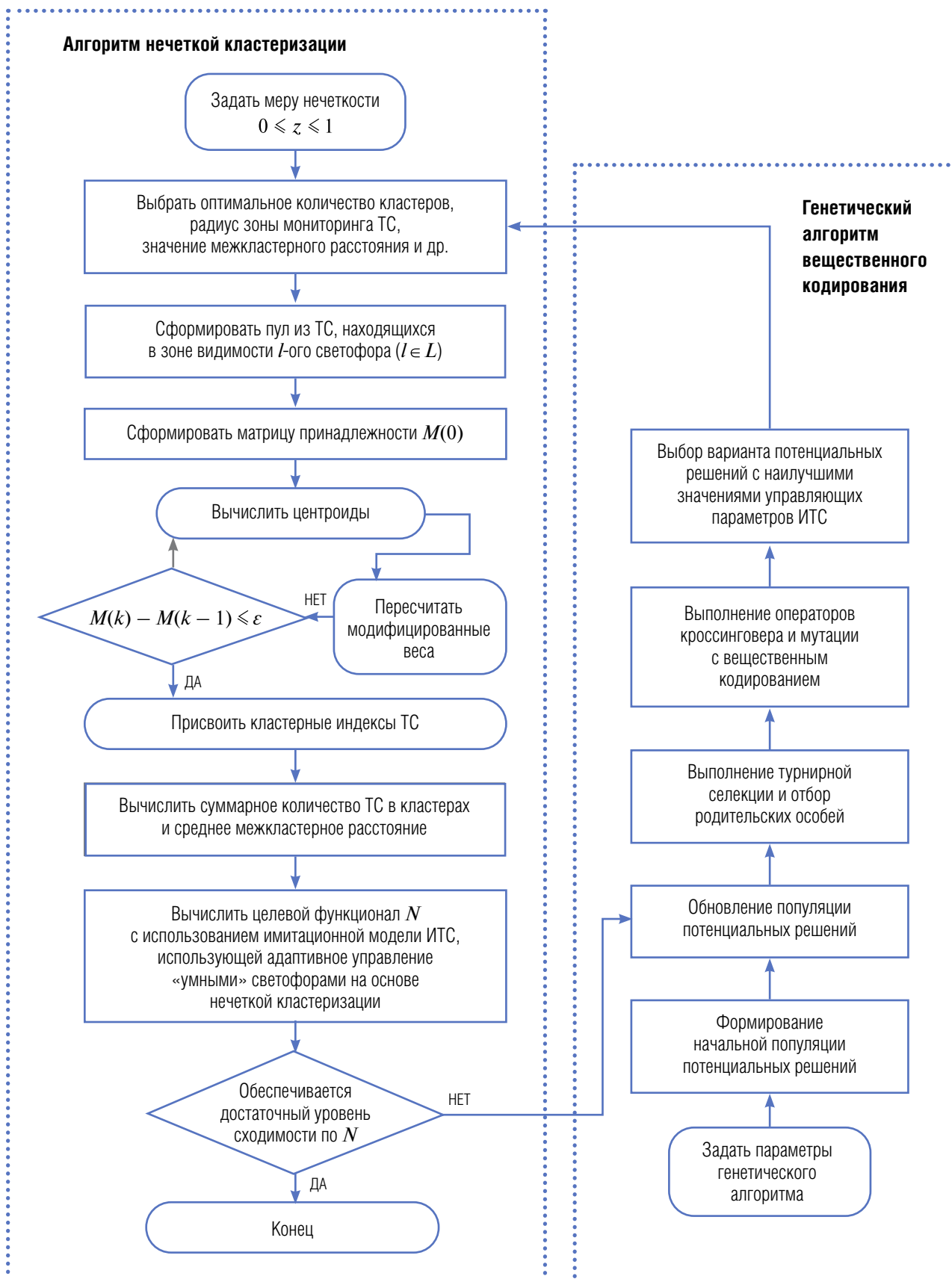


Рис. 3. Алгоритм нечеткой кластеризации для адаптивного управления светофорами.

3. Программная реализация модели

Ключевой фрагмент программной реализации приложенной имитационной модели ИТС, выполненной в среде AnyLogic, представлен на *рисунке 4*.

Важной особенностью программной реализации модели (*рис. 4*) является комбинированное использование методов дискретно-событийного и агентного моделирования, в том числе, поддерживаемых в библиотеке дорожного движения AnyLogic [28, 29]. В частности, элементы типа **carSource** и **pedSource** обеспечивают генерацию новых аген-

тов их добавление в соответствующие популяции ТС и пешеходов, элементы типа **SelectOutput** (s1, s2 на *рис. 4б*) используются для распределения транспортного потока по возможным маршрутам при достижении ТС перекрестков, элементы **carMoveTo** и **pedGoTo** перемещают агентов-ТС и пешеходов к заданной цели, в соответствии с их предопределенными характеристиками (предпочитаемой скоростью, интенсивностью прибытия и др.), **carDispose** и **pedSink** обеспечивают удаление агентов из соответствующих популяций и расчет трафика выходного потока.

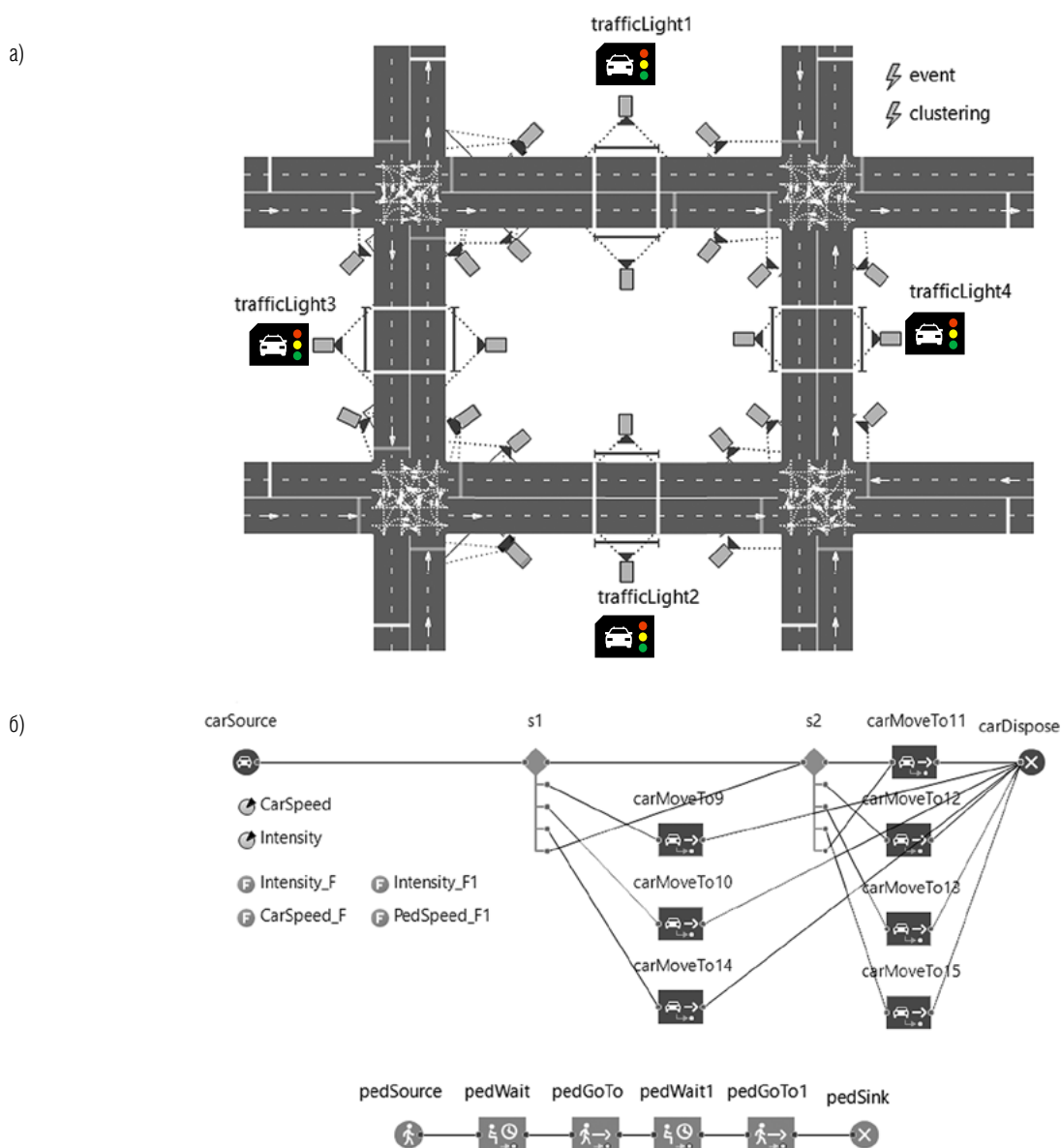


Рис. 4. Программная реализация имитационной модели ИТС в AnyLogic:
 а) схема цифровой дорожной сети с «умными» светофорами
 б) фрагмент дискретно-событийной модели движения агентов-ТС и пешеходов по заданным маршрутам.

4. Результаты оптимизационных экспериментов

Оптимизационные эксперименты были проведены для ИТС с пространственно-однородными и периодическими характеристиками при трех способах управления «умными светофорами»:

- ◆ посредством формирования требуемой длительности фаз с использованием генетического оптимизационного алгоритма;
- ◆ с помощью локального («слабоадаптивного») управления переключениями;
- ◆ на основе предложенного алгоритма нечеткой кластеризации.

Для системы с пространственно-однородными характеристиками потоков, интенсивности прибытия агентов и их предпочтительные скорости являются константами.

Интенсивность прибытия агентов в ИТС с периодическими характеристиками, имитирующей наличие и отсутствие пиковых нагрузок, вычисляется в каждый момент времени t_k ($t_k \in T$):

$$\theta(t_k) = \begin{cases} \text{truncnormal}(\hat{\theta}, \sigma, \underline{\theta}, \bar{\theta}), & \text{если } t_k \leq \frac{1}{4}|T|, \\ \tilde{\theta}, & \text{если } \frac{1}{4}|T| < t_k < \frac{3}{4}|T|, \\ \text{truncnormal}(\hat{\theta}, \sigma, \underline{\theta}, \bar{\theta}), & \text{если } t_k \geq \frac{3}{4}|T|, \end{cases} \quad (13)$$

где

$\text{truncnormal}(\hat{\theta}, \sigma, \underline{\theta}, \bar{\theta})$ – случайное значение интенсивности прибытия агентов, задаваемое с использованием усеченного нормального распределения с математическим ожиданием $\hat{\theta}$, стандартным отклонением σ , нижними и верхними граничными значениями $\underline{\theta}$, $\bar{\theta}$, соответствующее условиям экстремального трафика;

$\tilde{\theta}$ – интенсивность прибытия, соответствующее условиям нормального трафика.

Аналогичным способом задаются средние скорости движения агентов.

Основные модельные допущения (исходные данные) представлены в *таблице 1*.

На первом этапе, с использованием метода класса Монте-Карло [30], были проведены численные эксперименты для оценки чувствительности целевого функционала (суммарного трафика выходного потока) по отношению к значениям управляющих параметров ИТС с пространственно-однородными и периодическими характеристиками потоков (*рис. 5*).

Таблица 1.

Исходные данные имитационной модели

№	Параметры модели	Значения	
		ТС	пешеходы
1	Длина и ширина дорог, м.	155	
2	Количество перекрестков	4	
3	Расстояние между соседними перекрестками, м.	65	
4	Количество полос дорожного движения для каждой дороги	2	
5	Ширина разделительной полосы, м.	2	
6	Количество пешеходных переходов, регулируемых «умными» светофорами	4	
7	Период моделирования, мин.	20	
8	Интенсивность прибытия ТС и пешеходов в ИТС с пространственно-однородными характеристиками на каждый вход дорожной сети (агентов в час)	ТС	1000
		пешеходы	500
9	Предпочитаемая скорость ТС и пешеходов в ИТС с пространственно-однородными характеристиками (км/час для ТС и м/с для пешеходов)	100	0,75
10	Параметры для вычисления интенсивности прибытия ТС и пешеходов в ИТС с периодическими характеристиками потоков (агентов в час)	$\hat{\theta}$	500
		σ	100
		$\underline{\theta}$	100
		$\bar{\theta}$	1500
		$\tilde{\theta}$	100
11	Параметры для вычисления предпочитаемой скорости ТС и пешеходов в ИТС с периодическими характеристиками потоков (км/час для ТС и м/с для пешеходов)	$\hat{\theta}$	1,3
		σ	0,5
		$\underline{\theta}$	1
		$\bar{\theta}$	1,5
		$\tilde{\theta}$	100

Из *рисунка 5* следует, что суммарный трафик выходного потока чувствителен по отношению к значениям управляющих параметров ИТС, как при пространственно-однородных, так и периодических характеристиках потоков. При этом, наиболее вероятные диапазоны значений суммарного трафика выходного потока: 1800–1900 агентов (ТС и пешеходов).

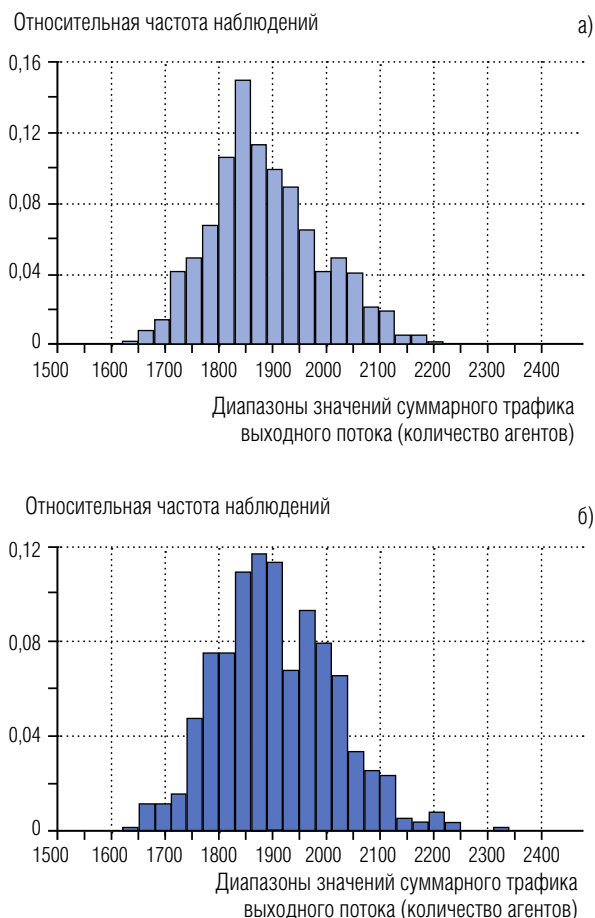


Рис. 5. Оценка чувствительности (плотность вероятности) суммарного трафика выходного потока для ИТС: а) с пространственно-однородными и б) периодическими характеристиками потоков.

На рисунке 6 представлена динамика сходимости целевой функции, полученная с использованием разработанной имитационной модели, агрегированной по целевому функционалу с генетическим алгоритмом (RCGA).

Максимально возможные значения суммарного выходного потока для ИТС с периодическими характеристиками потоков, в среднем, меньше, чем для ИТС с пространственно-однородными характеристиками (рис. 5). Полученные субоптимальные значения управляющих параметров модели, соответствующие рассмотренным выше сценариям реализации ИТС в укрупненном виде, представлены в таблице 2.

Из рисунка 6 и таблицы 2 следует, что наиболее перспективным способом управления «умными» светофорами, является адаптивное управление переключениями на основе нечеткой кластеризации.

Предложенный подход демонстрирует свою эффективность даже для ИТС с периодическими характеристиками потоков, обеспечивая лучшее конечное значение целевой функции.

Заключение

В данной статье представлена новая имитационная модель интеллектуальной транспортной системы (ИТС) «умного города» с адаптивным управлением светофорами. Предложена модель движения ансамбля ТС с использованием систем конечно-разностных уравнений с переменной структурой с учетом регулирующего воздействия «умных» светофоров. Для оценки структуры транспортного потока и адаптивного управления «умными светофорами» предложен алгоритм нечеткой кластеризации, ключевые характеристики которого, вычисляются с использованием генетического оптимизационного алгоритма (класса RCGA) в рамках решения основной

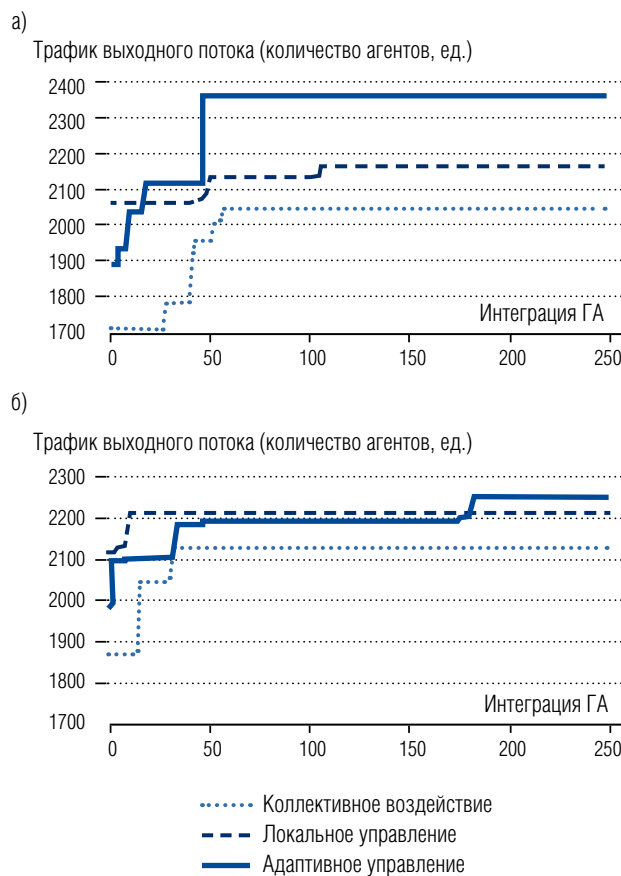


Рис. 6. Динамика сходимости целевой функции (суммарного трафика выходного потока) для ИТС: а) с пространственно-однородными и б) периодическими характеристиками потоков.

Таблица 2.

Полученные субоптимальные значения управляющих параметров модели

			Система с пространственно-однородными характеристиками потоков	Система с периодическими характеристиками потоков	
Коллективное воздействие					
Суммарный трафик, агентов			2392	2125	
Длительность фаз светофоров, сек.	первый и второй светофоры	«красный»	11,327	22,675	
		«зеленый»	25,816	18,061	
	третий и четвертый светофоры	«красный»	10,136	18,768	
		«зеленый»	11,933	103,071	
	все светофоры		«желтый»	1,098	1,874
	Локальное управление				
Суммарный трафик, агентов			2166	2209	
Минимально необходимая длительность основной фазы, мин.			1,839	4,918	
Радиус зоны мониторинга трафика дорожного потока, м.			31,59	12,25	
Радиус зоны мониторинга трафика пешеходного потока, м.			19,13	2,56	
Пороговое соотношение между количеством пешеходов на переходе и суммарным числом ТС			88,5	241,7	
Адаптивное управление на основе нечеткой кластеризации					
Суммарный трафик, агентов			2357	2246	
Минимально необходимая длительность основной фазы, мин.			1,514	3,555	
Радиус зоны мониторинга трафика дорожного потока, м.			26,11	17,89	
Радиус зоны мониторинга трафика пешеходного потока, м.			20,21	25,01	
Пороговое соотношение между количеством пешеходов на переходе и суммарным числом ТС (с поправкой на межкластерное расстояние)			162,5	255,1	
Коэффициент значимости среднего межкластерного расстояния			0,602	1	
Количество кластеров (ТС)			3	3	

задачи по максимизации трафика выходного потока. С помощью разработанной имитационной модели исследованы возможности рационального управления «умными» светофорами, в частности, для ИТС с пространственно-однородными и периодическими характеристиками. В результате, на модельном примере продемонстрирована большая эффективность адаптивного управления переключениями на основе нечеткой кластеризации.

Дальнейшие исследования будут направлены на проектирование крупномасштабной агентной модели ИТС «умного города» с использованием FLAME GPU. ■

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-11-00080).

Литература

1. Li L., Wen D., Yao D. A survey of traffic control with vehicular communications // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014. Vol. 15. No. 1. P. 425–432. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2277737>
2. Tang C., Wei X., Hao M., Zhu C., Wang R., Chen W. Traffic signal phase scheduling based on device-to-device communication // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 47636–47645. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2867553>
3. Tong W., Pan Z., Liu K., Yali Y., Xiumin W., Huawei H., Wu D.O. Multi-agent deep reinforcement learning for urban traffic light control in vehicular networks // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69. No. 8. P. 8243–8256. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2997896>
4. Lin W-H., Wang C. An enhanced 0-1 mixed-integer LP formulation for traffic signal control // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2004. Vol. 5. No. 4. P. 238–245. <https://doi.org/10.1109/TITS.2004.838217>
5. Gartner N.H., John D.C., Gabbay L.H. Optimization of traffic signal settings by mixed-integer linear programming // *Transportation Science*. 1975. Vol. 9. No. 4. P. 321–343. <https://doi.org/10.1287/trsc.9.4.321>
6. Davydov I., Tolstykh D., Kononova P., Legkih I. Genetic based approach for Novosibirsk traffic light scheduling // *Proceedings of the 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), Novosibirsk, Russia, 2019*. P. 31–36. <https://doi.org/10.1109/OPCS.2019.8880158>
7. Turkey A.M., Ahmad M.S., Yusoff M.Z.M., Sabar N.R. Genetic algorithm application for traffic light control // *Information Systems: Modeling, Development, and Integration. UNISCON 2009. Lecture Notes in Business Information Processing*. Vol. 20. (eds. J. Yang, A. Ginige, H.C. Mayr, R.D. Kutsche). Berlin: Springer, Heidelberg, 2009. P. 115–120. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01112-2_12
8. García-Nieto J., Alba E., Carolina Olivera A. Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2012. Vol. 25. No. 2. P. 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.04.011>
9. Royani T., Haddadnia J., Alipoor M. Control of traffic light in isolated intersections using fuzzy neural network and genetic algorithm // *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2013. Vol. 5. No. 1. P. 142–146. <https://doi.org/10.7763/IJCEE.2013.V5.682>
10. Agramelal F., Sadik M., Hannani A.E., Moubarak Y. A traffic-aware street lighting system based on fuzzy logic controller // *Proceedings of the 2022 IEEE 18th International Colloquium on Signal Processing & Applications (CSPA), Selangor, Malaysia, 2022*. P. 132–137. <https://doi.org/10.1109/CSPA55076.2022.9782045>
11. Rashid H., Ashrafi M.J.F., Azizi M., Heydarinezhad M.R. Intelligent traffic light control based on clustering using Vehicular Ad-hoc Networks // *Proceedings of the 2015 7th Conference on Information and Knowledge Technology (IKT), Urmia, Iran, 2015*. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IKT.2015.7288801>
12. Sachan A., Kumar N. SDN control-enabled and time-quantum-driven max-pressure approach for intersection management in smart city // *IEEE Systems Journal*. 2023. Vol. 17. No. 1. P. 1694–1702, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2022.3211933>
13. Marino F., Leccese F., Pizzuti S. Adaptive street lighting predictive control // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 111. P. 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.241>
14. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. Agent-based modeling for a complex world. Moscow: Scientific publications department, GAUGN, 2022. <https://doi.org/10.18254/978-5-604-5843-5-4>
15. Веремчук Н.С. Элементы имитационного моделирования в вопросах оптимизации дорожного движения // *Вестник кибернетики*. 2022. Т. 4. № 48. С. 23–28. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-4-23-28>
16. Agafonov A., Yumaganov A., Myasnikov V. Cooperative control for signalized intersections in intelligent connected vehicle environments // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. No. 6. 1540. <https://doi.org/10.3390/math11061540>
17. Мясников В.В., Агафонов А.А., Юмаганов А.С. Детерминированная прогнозная модель управления сигналами светофоров в интеллектуальных транспортных и геоинформационных системах // *Компьютерная оптика*. 2021. Т. 45. № 6. С. 917–925. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1031>
18. Sarma S.S., Sinha K., Sub-r-pa C., Chakraborty G., Sinha B.P. Optimal distribution of traffic in Manhattan road networks for minimizing routing-time // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 22. No. 11. P. 6799–6820. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2994836>
19. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L. Simulation-based optimisation for autonomous transportation systems using a parallel real-coded genetic algorithm with scalable nonuniform mutation // *Cybernetics and Information Technologies*. 2021. Vol. 21. No. 3. P. 127–144. <https://doi.org/10.2478/cait-2021-0034>
20. Sugiyama Y., Fukui M., Kikuchi M., Hasebe K., Nakayama A., Nishinari K., Tadaki S., Yukawa S. Traffic jams without bottlenecks – experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam // *New Journal of Physics*. 2008. Vol. 10. No. 3. 033001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/10/3/033001>

21. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Thakur M. Improvement of maneuverability within a multiagent fuzzy transportation system with the use of parallel biobjective real-coded genetic algorithm // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23. No. 8. P. 12648–12664. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3115827>
22. Акопов А.С., Хачатрян Н.К., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л. Система управления беспилотными транспортными средствами на основе нечеткой кластеризации. Часть 2. Нечеткая кластеризация и программная реализация // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2020. Т. 17. № 10(196). С. 21–29. <https://doi.org/10.14489/vkit.2020.10.pp.021-029>
23. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Моделирование динамики дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей в транспортной системе «умного города» // *Бизнес-информатика*. 2022. Т. 16. № 4. С. 19–35. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.4.19.35>
24. Herrera F., Lozano M., Verdegay J.L. Tackling real-coded genetic algorithms: Operators and tools for behavioural analysis // *Artificial Intelligence Review*. 1998. Vol. 12. No. 4. P. 265–319. <https://doi.org/10.1023/A:1006504901164>
25. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Thakur M., Verma B.D. Parallel multi-agent real-coded genetic algorithm for large-scale black-box single-objective optimisation // *Knowledge-Based Systems*. 2019. Vol. 174. P. 103–122. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2019.03.003>
26. Bezdek J.C. Cluster validity with fuzzy sets // *Journal of Cybernetics*. 1974. Vol. 3. No. 3. P. 58–73. <https://doi.org/10.1080/01969727308546047>
27. Beklaryan A.L., Akopov A.S. Simulation of agent-rescuer behaviour in emergency based on modified fuzzy clustering // *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS '16)*. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC, 2016. P. 1275–1276.
28. Kuklová J. Highway modeling in anylogic for multi-agent approach to smart city management // *Proceedings of the 2021 Smart City Symposium Prague (SCSP)*. Prague, Czech Republic, 2021. P. 1–6, <https://doi.org/10.1109/SCSP52043.2021.9447402>
29. Оо Т.М., Lupin S., Khaing M.T., Thu A. Using hybrid modeling for estimation of the efficiency of service systems // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021. P. 2277–2280. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396596>
30. Metropolis N. The beginning of the Monte Carlo method // *Los Alamos Science Special Issue*. 1987. Vol. 15. P. 125–130.

Об авторах

Бекларян Армен Левонович

кандидат технических наук;

доцент, департамент бизнес-информатики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20;

старший научный сотрудник, лаборатория социального моделирования, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: abeklaryan@hse.ru

ORCID: 0000-0001-5141-5140

Бекларян Левон Андреевич

доктор физико-математических наук, профессор;

главный научный сотрудник, лаборатория динамических моделей экономики и оптимизации, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: beklar@cemi.rssi.ru

ORCID: 0000-0001-5695-4450

Акопов Андраник Сумбатович

доктор технических наук, профессор; профессор Российской Академии Наук;

главный научный сотрудник, лаборатория динамических моделей экономики и оптимизации, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: akopovas@umail.ru

ORCID: 0000-0003-0627-3037

Simulation model of an intelligent transportation system for the “smart city” with adaptive control of traffic lights based on fuzzy clustering

Armen L. Beklaryan^{a, b}

E-mail: abeklaryan@hse.ru

Levon A. Beklaryan^b

E-mail: beklar@cemi.rssi.ru

Andranik S. Akopov^b

E-mail: akopovas@umail.ru

^a HSE University
Address: 20, Myasnitskaya Street, Moscow 101000, Russia

^b Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences
Address: 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia

Abstract

This article presents a new simulation model of an intelligent transportation system (ITS) for the “smart city” with adaptive traffic light control. The proposed transportation model, implemented in the AnyLogic, allows us to study the behavior of interacting agents: vehicles (V) and pedestrians (P) within the framework of a multi-agent ITS of the “Manhattan Lattice” type. The spatial dynamics of agents in such an ITS is described using the systems of finite-difference equations with the variable structure, considering the controlling impact of the “smart traffic lights.” Various methods of traffic light control aimed at maximizing the total traffic of the ITS output flow have been studied, in particular, by forming the required duration phases with the use of a genetic optimization algorithm, with a local (“weakly adaptive”) switching control and based on the proposed fuzzy clustering algorithm. The possibilities of optimizing the characteristics of systems for individual control of the behavior of traffic lights under various scenarios, in particular, for the ITS with spatially homogeneous and periodic characteristics, are investigated. To determine the best values of individual parameters of traffic light control systems, such as the phases’ durations, the radius of observation of traffic and pedestrian flows, threshold coefficients, the number of clusters, etc., the previously proposed parallel real-coded genetic optimization algorithm (RCGA type) is used. The proposed method of adaptive control of traffic lights based on fuzzy clustering demonstrates greater efficiency in comparison with the known methods of collective impact and local (“weakly adaptive”) control. The results of the work can be considered a component of the decision-making system in the management of urban services.

Keywords: intelligent transportation system, “smart city”, “smart traffic lights”, agent-based modeling, adaptive control, fuzzy clustering, AnyLogic

Citation: Beklaryan A.L., Beklaryan L.A., Akopov A.S. (2023) Simulation model of an intelligent transportation system for the “smart city” with adaptive control of traffic lights based on fuzzy clustering. *Business Informatics*, vol. 17, no. 3, pp. 70–86. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.70.86

References

1. Li L., Wen D., Yao D. (2014) A survey of traffic control with vehicular communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 425–432. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2277737>
2. Tang C., Wei X., Hao M., Zhu C., Wang R., Chen W. (2018) Traffic signal phase scheduling based on device-to-device communication. *IEEE Access*, vol. 6, pp. 47636–47645. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2867553>
3. Tong W., Pan Z., Liu K., Yali Y., Xiumin W., Huawei H., Wu D.O. (2020) Multi-agent deep reinforcement learning for urban traffic light control in vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 8, pp. 8243–8256. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2997896>
4. Lin W-H., Wang C. (2004) An enhanced 0-1 mixed-integer LP formulation for traffic signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 238–245. <https://doi.org/10.1109/TITS.2004.838217>
5. Gartner N.H., John D.C., Gabbay L.H. (1975) Optimization of traffic signal settings by mixed-integer linear programming. *Transportation Science*, vol. 9, no. 4, pp. 321–343. <https://doi.org/10.1287/trsc.9.4.321>
6. Davydov I., Tolstykh D., Kononova P., Legkih I. (2019) Genetic based approach for Novosibirsk traffic light scheduling. Proceedings of the *15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS)*, Novosibirsk, Russia, pp. 31–36. <https://doi.org/10.1109/OPCS.2019.8880158>
7. Turky A.M., Ahmad M.S., Yusoff M.Z.M., Sabar N.R. (2009) Genetic algorithm application for traffic light control. *Information Systems: Modeling, Development, and Integration. UNISCON 2009. Lecture Notes in Business Information Processing*, vol. 20. (eds. J. Yang, A. Ginige, H.C. Mayr, R.D. Kutsche). Berlin: Springer, Heidelberg, pp. 115–120. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01112-2_12
8. García-Nieto J., Alba E., Carolina Olivera A. (2012) Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 2, pp. 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.04.011>
9. Royani T., Haddadnia J., Alipoor M. (2013) Control of traffic light in isolated intersections using fuzzy neural network and genetic algorithm. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 142–146. <https://doi.org/10.7763/IJCEE.2013.V5.682>
10. Agramamel F., Sadik M., Hannani A.E., Moubarak Y. (2022) A traffic-aware street lighting system based on fuzzy logic controller. Proceedings of the 2022 *IEEE 18th International Colloquium on Signal Processing & Applications (CSPA)*, Selangor, Malaysia, pp. 132–137. <https://doi.org/10.1109/CSPA55076.2022.9782045>
11. Rashid H., Ashrafi M.J.F., Azizi M., Heydarinezhad M.R. (2015) Intelligent traffic light control based on clustering using vehicular ad-hoc networks. Proceedings of the 2015 *7th Conference on Information and Knowledge Technology (IKT)*, Urmia, Iran, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IKT.2015.7288801>
12. Sachan A., Kumar N. (2023) SDN control-enabled and time-quantum-driven max-pressure approach for intersection management in smart city. *IEEE Systems Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 1694–1702. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2022.3211933>
13. Marino F., Leccese F., Pizzuti S. (2017) Adaptive street lighting predictive control. *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.241>
14. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. (2022) *Agent-based modeling for a complex world*. Moscow: Scientific publications department, GAUGN. <https://doi.org/10.18254/978-5-604-5843-5-4>
15. Veremchuk N.S. (2022) Elements of simulation modeling in issues of traffic optimization. *Vestnik kibernetiki*, vol. 4, no. 48, pp. 23–28 (in Russian). <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-4-23-28>
16. Agafonov A., Yumaganov A., Myasnikov V. (2023) Cooperative control for signalized intersections in intelligent connected vehicle environments. *Mathematics*, vol. 11, no. 6, 1540. <https://doi.org/10.3390/math11061540>
17. Myasnikov V.V., Agafonov A.A., Yumaganov A.S. A deterministic predictive traffic signal control model in intelligent transportation and geoinformation systems. *Computer Optics*, vol. 45, no. 6, pp. 917–925 (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1031>
18. Sarma S.S., Sinha K., Sub-r-pa C., Chakraborty G., Sinha B.P. (2021) Optimal distribution of traffic in Manhattan road networks for minimizing routing-time. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 11, pp. 6799–6820. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2994836>
19. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L. Simulation-based optimisation for autonomous transportation systems using a parallel real-coded genetic algorithm with scalable nonuniform mutation. *Cybernetics and Information Technologies*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 127–144. <https://doi.org/10.2478/cait-2021-0034>
20. Sugiyama Y., Fukui M., Kikuchi M., Hasebe K., Nakayama A., Nishinari K., Tadaki S., Yukawa S. (2008) Traffic jams without bottlenecks – experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics*, vol. 10, no. 3, 033001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/10/3/033001>
21. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Thakur M. (2022) Improvement of maneuverability within a multiagent fuzzy transportation system with the use of parallel biobjective real-coded genetic algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. vol. 23, no. 8. pp. 12648–12664. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3115827>

22. Akopov A.S., Khachatryan N.K., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L. (2020) Unmanned vehicle control system based on fuzzy clustering. Part 2. Fuzzy clustering and software implementation. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, vol. 17, no. 10(196), pp. 21–29. <https://doi.org/10.14489/vkit.2020.10.pp.021-029>
23. Akopov A.S., Beklaryan L.A. (2022) Simulation of rates of traffic accidents involving unmanned ground vehicles within a transportation system for the 'smart city'. *Business Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 19–35. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.4.19.35>
24. Herrera F., Lozano M., Verdegay J.L. (1998) Tackling real-coded genetic algorithms: Operators and tools for behavioural analysis. *Artificial Intelligence Review*, vol. 12, no. 4, pp. 265–319. <https://doi.org/10.1023/A:1006504901164>
25. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Thakur M., Verma B.D. (2019) Parallel multi-agent real-coded genetic algorithm for large-scale black-box single-objective optimisation. *Knowledge-Based Systems*, vol. 174, pp. 103–122. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.03.003>
26. Bezdek J.C. (1974) Cluster validity with fuzzy sets. *Journal of Cybernetics*, vol. 3, no. 3, pp. 58–73. <https://doi.org/10.1080/01969727308546047>
27. Beklaryan A.L., Akopov A.S. (2016) Simulation of agent-rescuer behaviour in emergency based on modified fuzzy clustering. Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS'16). *International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC*, pp. 1275–1276.
28. Kuklová J. (2021) Highway modeling in anylogic for multi-agent approach to smart city management. Proceedings of the 2021 Smart City Symposium Prague (SCSP), Prague, Czech Republic, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCSP52043.2021.9447402>
29. Oo T.M., Lupin S., Khaing M.T., Thu A. (2021) Using hybrid modeling for estimation of the efficiency of service systems. Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Moscow, Russia, pp. 2277–2280. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396596>
30. Metropolis N. (1987) The beginning of the Monte Carlo method. *Los Alamos Science Special Issue*, vol. 15, pp. 125–130.

About the authors

Armen L. Beklaryan

Cand. Sci. (Tech.);

Associate Professor, Department of Business Informatics, HSE University, 20, Myasnikskaya Street, Moscow 101000, Russia;

Senior Researcher, Laboratory of Social Modeling, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

Email: abeklaryan@hse.ru

ORCID: 0000-0001-5141-5140

Levon A. Beklaryan

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor;

Chief Researcher, Laboratory of Dynamic Models of Economy and Optimization, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: beklar@cemi.rssi.ru

ORCID: 0000-0001-5695-4450

Andranik S. Akopov

Dr. Sci. (Tech.), Professor; Professor of the Russian Academy of Sciences;

Chief Researcher, Laboratory of Dynamic Models of Economy and Optimization, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: akopovas@umail.ru

ORCID: 0000-0003-0627-3037