

[DOI: 10.17323/2587-814X.2022.4.19.35](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.4.19.35)

Моделирование динамики дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей в транспортной системе «умного города»

А.С. Акопов 

E-mail: akopovas@umail.ru

Л.А. Бекларян 

E-mail: beklar@cemi.rssi.ru

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

Аннотация

В данной статье представлен подход к моделированию динамики дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей в многоагентной интеллектуальной транспортной системе «умного города». Разработана новая имитационная модель интеллектуальной транспортной системы, позволяющая существенно уменьшить количество потенциальных дорожно-транспортных происшествий и реализующая концепцию социально-ориентированного менеджмента городского хозяйства. Программная реализация подобной крупно-масштабной агентной модели выполнена с использованием платформы FLAME GPU, позволяющей эффективно распараллелить логику поведения агентов и учесть их индивидуальные системы принятия решений при моделировании пространственной динамики ансамбля наземных беспилотных транспортных средств, взаимодействующих с другими участниками дорожного движения: обычными транспортными средствами, неожиданно возникающими препятствиями (например, пешеходами и др.). Исследованы различные сценарии поведения подобных агентов в интеллектуальной транспортной системе, обуславливающие возникновение дорожно-транспортных происшествий при определенных условиях (например, при высокой скорости и интенсивности движения беспилотных транспортных средств и др.) и различных конфигурациях цифровой дорожной сети. Определены значения параметров, при которых индивидуальная система принятия решений беспилотных транспортных средств сохраняет устойчивость по отношению к характеристикам внешней среды (в том числе, в условиях экстремальных ситуаций), обеспечивая безопасность другим участникам дорожного движения в масштабе «умного города».

Ключевые слова: социально-ориентированный менеджмент городского хозяйства, агентное моделирование, интеллектуальные транспортные системы, умный город, моделирование дорожно-транспортных происшествий, беспилотные транспортные системы, FLAME GPU

Цитирование: 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. DOI: 10.17323/2587-814X.2022.4.19.35

Введение

В настоящее время актуализируется переход к социально-ориентированному менеджменту городским хозяйством в рамках развития «умного города» [1] как комплексной городской экосистемы, объединяющей ряд взаимосвязанных подсистем. Среди них выделим интеллектуальные транспортные системы как важнейший фактор, обеспечивающий безопасное и комфортное состояние населению города. Важность рационального управления системой «умный город» обусловлена необходимостью трансформации городской среды в направлении, обеспечивающим принципиальное улучшение безопасности городского движения и дорожного трафика. Так, например, в настоящее время уровень транспортной загруженности Московской агломерации по различным экспертным оценкам составляет от 60 до 70% и продолжает ежегодно расти (что обусловлено ростом количества средств личного автотранспорта, недостатками характеристик действующих дорожных сетей и другими факторами). Ухудшение дорожной обстановки приводит к множеству негативных последствий: возникновению дорожно-транспортных происшествий (ДТП), увеличению времени и стоимости доставки товарной продукции, более быстрому износу дорожного покрытия, ухудшению экологической ситуации и другим негативным социальным последствиям. Поэтому необходима разработка интеллектуальной информационно-аналитической системы управления городским хозяйством, обеспечивающей возможность внедрения наземных беспилотных транспортных средств (БТС)¹ и соответствующей транспортной инфраструктуры. Явным преимуществом БТС является возможность организации эффективного «каршеринга», т.е. совместного пользования людьми бес-

пилотными автомобилями. Количество требуемых БТС находящихся в подобном совместном пользовании может быть относительно невелико, а уровень безопасности при определенных условиях достаточно высоким. В перспективе это позволит существенно снизить количество транспортных средств (ТС) на дорогах и улучшить качество городской среды. Вместе с тем, как известно, в Москве и других крупных мегаполисах регулярно случаются ДТП, в том числе, с участием БТС. Подобные ситуации являются существенным препятствием для широкого распространения и внедрения БТС в городской среде, так как, помимо высокой стоимости ущерба от ДТП, возникают риски жизни и здоровья всем участникам дорожного движения. Поэтому разработка индивидуальной системы принятия решений БТС, сохраняющей устойчивость по отношению к характеристикам внешней среды (например, при неожиданном появлении пешеходов, автомобилей с аномальным поведением и др.) является важнейшей целью интеллектуальной транспортной системы «умного города».

Ранее в работах [2–4], было продемонстрировано существование сценариев безаварийного движения ансамбля БТС, взаимодействующих с обычными транспортными системами (ОТС), при различной конфигурации цифровой дорожной сети и других характеристиках окружающего пространства. В частности, в работе [2] с помощью разработанной агентной модели [5, 6] были определены общие условия, при которых возникают подобные ДТП, обусловленные в основном маневрированием ТС в условиях интенсивного дорожного потока. Таким образом, с увеличением плотности БТС и ОТС, возникают эффекты «турбулентности» и «давки», когда некоторые водители стремятся увеличить свое личное пространство посредством частого маневрирования (смены полосы движения, обгона

¹ Источники: <https://www.m24.ru/news/proisshestiya/27042021/163077>
<https://www.autonews.ru/news/60435f909a79476771200782>

и торможения). Как правило, это приводит к еще большему замедлению трафика, возникновению трудностей у других участников дорожного движения, их «выталкиванию» со своего первоначального маршрута, ошибкам при вынужденном маневрировании и возникновению ДТП [7–9]. Вместе с тем, наибольший интерес представляют частные условия возникновения аварий с участием различных агентов: БТС, ОТС, ОТС с аномальным поведением, пешеходов, велосипедистов и т.д., а также возможности разработки индивидуальной системы принятия решений БТС, максимально устойчивой по отношению к характеристикам внешней среды. Подобная система может быть основана на моделировании и решении возникающих проблемных ситуаций [10, 11], использовании нечетких правил при маневрировании [2], применении феноменологического подхода для управления радиусом личного пространства агента-БТС при маневрировании и неожиданном появлении препятствий в виде пешеходов [4], оптимальной маршрутизации БТС, позволяющей избежать возможных нежелательных взаимодействий с другими участниками дорожного движения [12–16] и др.

Отметим, что ранее нами был предложен феноменологический подход [17] для моделирования поведения толпы с учетом влияния «эффекта толпы» и других характеристик (в частности, конфигурации) окружающего пространства. На основе такого подхода была разработана многоагентная система управления наземными беспилотными транспортными средствами [5, 6]. При этом использовалась платформа крупномасштабного агент-ориентированного имитационного моделирования FLAME GPU [5, 18, 19], позволяющая эффективно распараллелить логику поведения агентов и учесть их индивидуальные системы принятия решений при моделировании пространственной динамики ансамбля взаимодействующих транспортных средств. В свою очередь, феноменологический подход основан на исследованиях Д. Хелбинга [20, 21], в которых моделируется поведение людей и пешеходов под воздействием социальных сил.

В рамках концепции развития «умного города» большой интерес представляет также системы управления беспилотными средствами железнодорожного транспорта [22, 23], которые могут быть использованы для формирования оптималь-

ных планов маршрутизации грузовых вагонов (под управлением беспилотных локомотивов) при заданном парке грузовых вагонов и списке заявок на транспортировку грузов. Также перспективным направлением исследования является применение методов нечеткой [4, 5] и иерархической кластеризации [24] для выявления проблемных участков городской дорожной сети [25] (например, пробок, мест возникновения ДТП и т.д.).

В данной работе предложен подход к моделированию динамики ДТП и улучшению безопасности дорожного движения в масштабе «умного города», позволяющий сочетать расчетные и экспертные методы принятия решений. Подобный подход также используется в системах стратегического менеджмента [26, 27], и его преимуществом является возможность оценки и обобщения альтернативных решений экспертами, полученных, в частности, в результате оптимизационных экспериментов с разработанной имитационной моделью. Применительно к рассматриваемым задачам «умного города», подобная экспертная оценка позволяет учесть внемоделльные особенности интеллектуальной транспортной системы, например, финансовые и технологические ограничения, влияющие на возможность реконфигурирования уличных дорожных сетей, законодательные требования, предъявляемые к характеристикам беспилотных автомобилей и др.

Цель данной статьи состоит в разработке нового социально-ориентированного подхода к управлению городским хозяйством на основе моделирования динамики дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей в многоагентной интеллектуальной транспортной системе «умного города» и реализацией на платформе FLAME GPU², а также определении условий, при которых индивидуальная система принятия решений БТС сохраняет устойчивость по отношению к факторам риска, обеспечивая безопасность другим участникам дорожного движения. На основе предложенной модели может быть создана информационно-аналитическая система рационального управления городским хозяйством и сформулированы рекомендации по повышению трансформации городской среды (в частности, транспортной инфраструктуры), что является одним из важных направлений исследований в области бизнес-информатики.

¹ Источники: <https://flamegpu.com/>

1. Описание модели

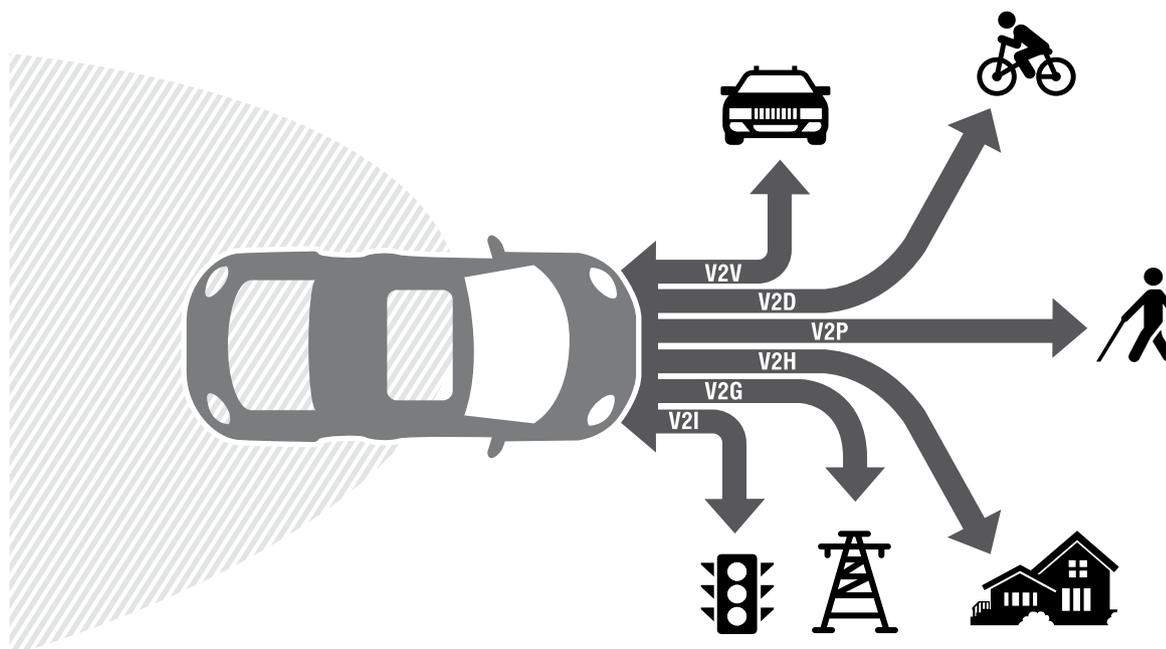
Ранее была разработана агент-ориентированная имитационная модель поведения БТС, во взаимодействии с ОТС и другими агентами интеллектуальной транспортной системы [2, 3]. Данная модель использует систему конечно-разностных уравнений с переменной структурой для реализации различных сценариев коммуникаций ТС друг с другом (V2V), с пешеходами (V2P), с внешней средой (V2I) и др. (рис. 1). Подобный подход позволяет учесть множественные сценарии взаимодействия БТС с другими участниками цифровой дорожной сети (ЦДС), например, ОТС, пешеходами, стационарными препятствиями и т.д., существенно различающиеся по скорости движения и габаритам, что непосредственно влияет на скорость принятия решений со стороны БТС.

При этом рассматривались цифровые дорожные сети типа «кольцевые развязки» [2] и «Манхэттенская решетка» [3] с ограниченном набором возможных конфигураций. В данной работе предлагается существенно усложнить геометрию цифровых до-

рожных сетей, приблизив ее к масштабу «умного города», а также разработать индивидуальную систему принятия решений БТС максимально устойчивую по отношению к факторам риска, таким как неожиданное появление статичных препятствий, пешеходов, велосипедистов и др. (рис. 2).

Подобная устойчивость обеспечивается за счет торможения посредством увеличения радиуса личного пространства БТС (с последующим постепенным уменьшением до нормального уровня) при появлении объектов-препятствий, имеющих различную линейную скорость, если длина пути от БТС до объекта достаточна для торможения (рис. 2а), либо маневрирования в виде объезда возникающих препятствий в пределах своей полосы движения в сочетании с экстренным торможением (рис. 2б), в случае дистанция между БТС и возникшим препятствием не позволяет избежать столкновения посредством торможения.

В случае, если перед БТС, движущимся со средней скоростью 60 км/час, неожиданно возникает стационарное препятствие (например, знак дорожных работ), то скорость принятия решений доста-



- V2V** – взаимодействие типа «ТС–ТС»
- V2D** – взаимодействие типа «ТС–механизм» (т.е. движущийся объект)
- V2P** – взаимодействие типа «ТС–пешеход»
- V2H** – взаимодействие типа «ТС–дом» (т.е. стационарный объект)
- V2G** – взаимодействие типа «ТС–энергосеть» (например электрозаправка)
- V2I** – взаимодействие типа «ТС–инфраструктура» (например «умный светофор»)

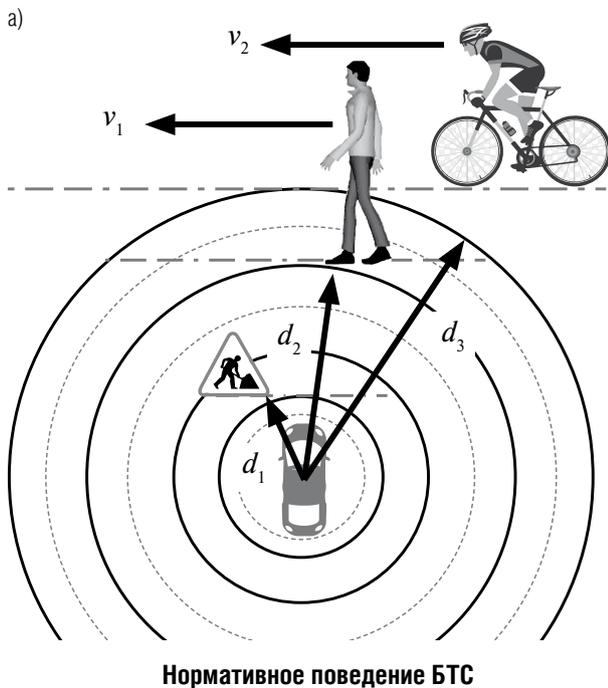
Рис. 1. Иллюстрация взаимодействия транспортного средства (ТС) с различными агентами интеллектуальной транспортной системы.

точно высока, что позволяет избежать ДТП минимально увеличив радиус личного пространства БТС до уровня d_1 (примерно 20 метров в при сухом дорожном покрытии, 30 – при мокром и 60 – при обледеневшем), если неожиданно возникает пешеход (со средней скоростью $v_1 = 4-7$ км/ч), то, для того чтобы избежать аварии, БТС необходимо увеличить радиус личного пространства до уровня d_2 (примерно 30 метров в при сухом дорожном покрытии, 50 – при мокром и 70 – при обледеневшем), и, наконец, если неожиданно возникает быстро движущийся велосипедист (со средней скоростью $v_2 = 10-15$ км/ч), то радиус личного пространства БТС должен быть увеличен до уровня d_3 (примерно 40 метров в при сухом дорожном покрытии, 60 – при мокром и 80 – при обледеневшем). Увеличение радиуса личного пространства БТС обусловлено в данном случае снижением скорости реакции на появление движущегося препятствия и увеличением временных затрат БТС на корректное распознавание соответствующего события.

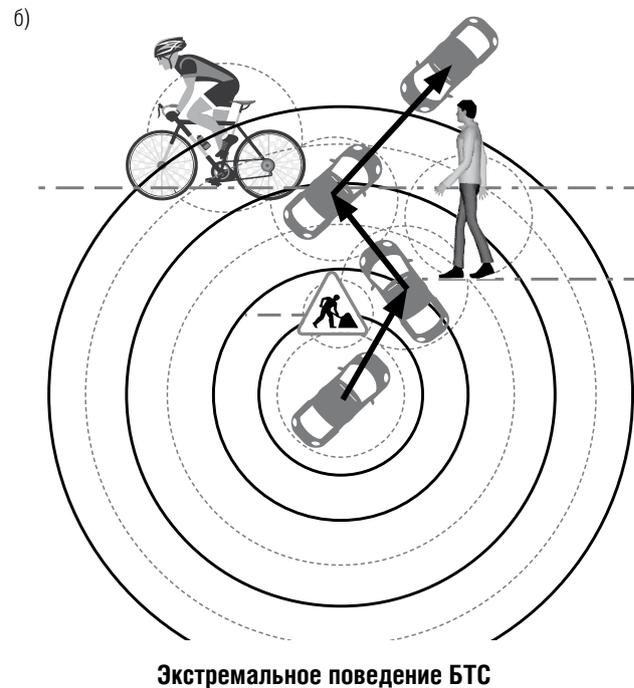
При этом возможны различные конфигурации (схемы) уличной дорожной сети [25], среди которых следует выделить радиально-кольцевую в качестве примера (рис. 3). Отметим, что возможные и конфигурации уличной дорожной сети, например, расширенная радиально-кольцевая, прямоугольная, прямоугольно-диагональная, прямоугольно-кольцевая и др.

Стрелками на рис. 3 показаны направления транспортных потоков. В подобной схеме у каждого ТС при входе в ЦДС и нахождении в зонах принятия решения (т.е. на перекрестках) имеется два альтернативных маршрута перемещения (например, слева-направо либо в объезд), обеспечивающих реализацию трафика выходного потока.

Далее приведем формальное описание разработанной модели поведения БТС, пространственная динамика которой соответствует конфигурации простой радиально-кольцевой схеме уличной дорожной сети (рис. 3).



Торможение БТС посредством увеличения радиуса личного пространства определяющего длину тормозного пути при наличии безопасной дистанции



Маневрирование БТС (объезд возникающих препятствий) в сочетании с экстренным торможением при отсутствии безопасной дистанции

Рис. 2. Иллюстрация процесса взаимодействия БТС с различными агентами интеллектуальной транспортной системы:
 а) в случае безопасной дистанции между БТС и препятствием,
 б) при недостаточной длине пути для экстренного торможения.

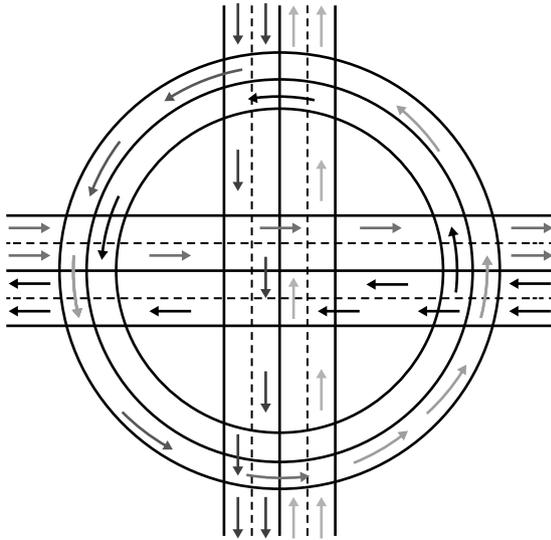


Рис. 3. Простая радиально-кольцевая схема уличной дорожной сети.

Пусть

- ◆ $T = \{t_0, t_1, \dots, |T|\}$ – набор временных моментов (по минутам), $|T|$ – общее количество временных моментов; $t_0 \in T, t_{|T|} \in T$ – начальные и конечные моменты времени;
- ◆ $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{|I|}\}$ – набор индексов беспилотных наземных транспортных средств (БТС), где $|I|$ – общее количество БТС;
- ◆ $B = \{1, 2, \dots, |B|\}$ – набор индексов типов препятствий: $b = 1$ – агент-ОТС, $b = 2$ – стационарное препятствие (знак дорожных работ, яма и др.), $b = 3$ – пешеход, $b = 4$ – велосипедист и др.), которые могут неожиданно возникнуть на дороге, где $|B|$ – общее количество типов возможных препятствий;
- ◆ $J_b = \{j_{b1}, j_{b2}, \dots, j_{|J_b|}\}, b \in B$ – набор индексов агентов-препятствий, относящихся к b -му типу, где $|J_b|$ – общее количество агентов-препятствий;
- ◆ $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{|U|}\}$ – набор индексов характеристик ЦДС, существенно влияющих на динамику и маневренность агентов-БТС, в частности, состояние дорожного покрытия, уровень освещенности и др., где $|U|$ – общее количество характеристик ЦДС.

Тогда плотность потока транспортных средств относительно некоторого \tilde{i} -го агента-БТС ($\tilde{i} \in I$) в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$) равна:

$$\rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = \sum_{i=1}^{|I|} m_{\tilde{i}}(t_{k-1}) + \sum_{b=1}^{|B|} \sum_{j_b=1}^{|J_b|} \tilde{m}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}), \quad (1)$$

где

$$m_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = \begin{cases} 1, & \text{если } d_{\tilde{i}}(t_{k-1}) \leq R, \\ 0, & \text{если } d_{\tilde{i}}(t_{k-1}) > R, \end{cases} \quad (2)$$

$$\tilde{m}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) \leq R, \\ 0, & \text{если } \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) > R, \end{cases}$$

$$i \in I, b \in B, j_b \in J_b.$$

Здесь $\{d_{\tilde{i}}(t_{k-1}), \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1})\}$ – евклидово расстояния между данным \tilde{i} -ым агентом-БТС ($\tilde{i} \in I$) и каждым другим i -ым агентом-БТС ($i \in I$), а также между \tilde{i} -ым агентом-БТС и j_b -ым агентом-препятствием ($b \in B, j_b \in J_b$) соответственно, в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$), R – фиксированный радиус обзора, выбранный для оценки плотности размещения транспортных средств.

Радиус личного пространства агента-БТС зависит от плотности окружающего пространства, а также от расстояния до агента-препятствия.

Радиус личного пространства \tilde{i} -го агента-БТС в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$) равен

$$\tilde{r}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = \begin{cases} \hat{r}_1, & \text{если } \rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = 1 \text{ и } \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) > l_{bu}, \\ \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) & \text{если } \rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = 1 \text{ и } \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) \leq l_{bu}, \\ \frac{\hat{r}_1}{(\rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}))^\eta}, & \text{если } 1 < \rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}) < \bar{\rho} \\ \text{и } \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) > l_{bu}, \\ \min \left[\tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}), \frac{\hat{r}_1}{(\rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}))^\eta} \right], & \\ \text{если } 1 < \rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}) < \bar{\rho} \text{ и } \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) \leq l_{bu}, \\ \hat{r}_2, & \text{если } \bar{\rho} \leq \rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}) < \bar{\bar{\rho}} \text{ и } \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) > l_{bu}, \\ \min(\tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}), \hat{r}_2), & \text{если } \bar{\rho} \leq \rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}) < \bar{\bar{\rho}} \\ \text{и } \tilde{d}_{\tilde{i}j_b}(t_{k-1}) \leq l_{bu}, \\ 0, & \text{если } \bar{\bar{\rho}} \leq \rho_{\tilde{i}}(t_{k-1}), \end{cases} \quad (3)$$

$$\tilde{i} \in I, b \in B, j_b \in J_b, u \in U.$$

Здесь, \hat{r}_1 – начальное значение радиуса личного пространства агента, соответствующее нормальному состоянию плотности окружающего пространства (т.е. при отсутствии паники); $0 \leq \eta \leq 1$ – некоторый фиксированный коэффициент ($\eta = 0,2$); $\hat{r}_2 \gg \hat{r}_1$ – значение радиуса личного пространства агента, соответствующее состоянию высокой плотности окружающего пространства; $\{\bar{\rho}, \bar{\bar{\rho}}\}$ – поро-

говые значения плотностей окружающего пространства; l_{bu} , $b \in B$ – минимально необходимое расстояние от БТС до j_b -го препятствия для безопасного торможения с учетом состояния дорожно-го покрытия и уровня освещенности $u \in U$.

Скорость движения агента-БТС зависит от радиуса его личного пространства и наличия препятствий.

Линейная скорость \tilde{i} -го агента-БТС при движении на прямом участке уличной дорожной сети в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$) равна

$$\tilde{v}_i(t_{k-1}) = \begin{cases} \lambda \tilde{v}_1, & \text{если } \tilde{r}_i(t_{k-1}) \in [\hat{r}_1, \hat{r}_2], \\ \lambda \psi \tilde{v}_i(t_{k-2}), & \text{если } \tilde{d}_{j_b}(t_{k-1}) \leq l_{bu}, \\ 0, & \text{если } \tilde{r}_i(t_{k-1}) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{i} \in I, b \in B, j_b \in J_b, u \in U.$$

Здесь \tilde{v}_1 – базовая скорость БТС, задаваемая с помощью логнормального распределения в фиксированном диапазоне; $0 \leq \psi \leq 1$ – коэффициент (экстремального) торможения ($\psi = 0,01$); λ – коэффициент, определяющий соотношения масштабов реального и виртуального модельного времени (и соответственно реальных и виртуальных скоростей движения БТС).

Угловая скорость \tilde{i} -ого агента-БТС ($\tilde{i} \in I$) при движении на кольцевой развязке уличной дорожной сети в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$) равна

$$\tilde{v}_i^*(t_{k-1}) = \frac{\tilde{v}_i(t_{k-1})}{\tilde{d}_{iO}(t_{k-1})}. \quad (5)$$

Здесь $\tilde{d}_{iO}(t_{k-1})$ – евклидово расстояние от \tilde{i} -го агента-БТС ($\tilde{i} \in I$) до центра зоны кругового движения (рис. 2а) в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$).

Дирекционный угол для углового перемещения \tilde{i} -го агента-БТС ($\tilde{i} \in I$), находящегося в состоянии кругового движения в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$), равен

$$\alpha_i(t_{k-1}) = \arctan \frac{y_i(t_{k-1}) - \hat{y}_O}{x_i(t_{k-1}) - \hat{x}_O} - \lambda \tilde{v}_i^*(t_{k-1}). \quad (6)$$

Здесь $\{\tilde{x}_i(t_{k-1}), \tilde{y}_i(t_{k-1})\}$ – координаты \tilde{i} -го агента-БТС ($\tilde{i} \in I$) в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$); $\{\hat{x}_O, \hat{y}_O\}$ – координаты центра зоны кругового движения (кольцевой развязки).

Угол смещения \tilde{i} -го агента-БТС ($\tilde{i} \in I$) для объезда ближайшего j_b -го агента-препятствия ($j_b \in J_b$, $b \in B$) в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$) равен

$$\omega_{j_b}(t_{k-1}) = \frac{\pi}{4} + \left| \arctan \frac{y_{j_b}(t_{k-1}) - \tilde{y}_i(t_{k-1}) + (r_{j_b}(t_{k-1}) + \tilde{r}_i(t_{k-1})) \sin \frac{\pi}{4}}{x_{j_b}(t_{k-1}) - \tilde{x}_i(t_{k-1}) + (r_{j_b}(t_{k-1}) + \tilde{r}_i(t_{k-1})) \cos \frac{\pi}{4}} \right|. \quad (7)$$

Здесь $\{x_{j_b}(t_{k-1}), y_{j_b}(t_{k-1})\}$, $r_{j_b}(t_{k-1})$ – координаты и радиус личного пространства j_b -го препятствия ($j_b \in J_b$, $b \in B$) в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$).

Угол, определяющий направление движения \tilde{i} -го агента-БТС ($\tilde{i} \in I$) на ближайшего соседа (для обгона), в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$) равен

$$\gamma_{j_b}^*(t_{k-1}) = \left| \arctan \frac{y_{j_b}(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1})}{x_{j_b}(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1})} \right|. \quad (8)$$

Угол «отскока» \tilde{i} -го агента-БТС ($\tilde{i} \in I$) от ближайшего j_b -го агента-препятствия ($j_b \in J_b$) в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$) равен

$$\gamma_{j_b}^{\ddagger}(t_{k-1}) = \pi + \gamma_{j_b}^*(t_{k-1}). \quad (9)$$

Пусть,

- ♦ $\tilde{s}_i(t_k) \in \{1, 2, 3, 4\}$ – состояние БТС: $\tilde{s}_i(t_k) = 1$ – БТС в аварийном состоянии, $\tilde{s}_i(t_k) = 2$ – начальное состояние БТС при въезде в ЦДС и сохраняющееся при движении на прямолинейном участке дороги, $\tilde{s}_i(t_k) = 3$ – состояние движения БТС на кольцевой развязке (в зоне кругового движения) в момент времени t_k ($t_k \in T$), $\tilde{s}_i(t_k) = 4$ – состояние выезда БТС из ЦДС с использованием прямолинейного участка дороги;
- ♦ $\tilde{c}_i(t_0) \in \{1, 2, 3, 4\}$ – тип БТС: $\tilde{c}_i(t_0) = 1$ – движение слева-направо, $\tilde{c}_i(t_0) = 2$ – движение справа-налево, $\tilde{c}_i(t_0) = 3$ – движение снизу-вверх, $\tilde{c}_i(t_0) = 4$ – движение сверху-вниз заданным в начальный момент времени ($t_0 \in T$).

Тогда направление движения БТС в ЦДС в момент времени t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$) может быть вычислено следующим образом:

$$\tilde{w}_i(t_{k-1}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{c}_i(t_0) \in \{1, 3\} \text{ и } \tilde{s}_i(t_{k-1}) \neq 1, \\ -1, & \text{если } \tilde{c}_i(t_0) \in \{2, 4\} \text{ и } \tilde{s}_i(t_{k-1}) \neq 1, \\ 0, & \text{если } \tilde{s}_i(t_{k-1}) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

С учетом вышеизложенного, для рассматриваемой радиально-кольцевой схемы цифровой дорожной сети пространственная динамика \tilde{i} -го агента-БТС ($\tilde{i} \in \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) задается следующей системой разностных уравнений с переменной структурой:

$$\tilde{x}_i(t_k) = \begin{cases} \tilde{x}_i(t_{k-1}) + \tilde{w}_i(t_{k-1})\lambda\tilde{v}_i(t_{k-1}), \\ \text{если выполняется I,} \\ \tilde{x}_i(t_{k-1}) + \tilde{v}_i(t_k) \cos(\pm\tilde{\omega}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{d_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})} \cos \tilde{\gamma}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}), \\ \text{если выполняется II,} \\ \tilde{x}_i(t_{k-1}) + \frac{c_1}{d_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})} \cos \tilde{\gamma}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}), \\ \text{если выполняется III,} \\ \hat{x}_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \cos(\lambda\tilde{v}_i^*(t_{k-1}) + \tilde{\alpha}_i(t_{k-1})), \\ \text{если выполняется IV,} \\ \left(\tilde{x}_i(t_{k-1}) + \cos \left(\lambda\tilde{v}_i^*(t_{k-1}) + \right. \right. \\ \left. \left. \tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) \pm \tilde{\omega}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) \right) + \right. \\ \left. \frac{c_2}{d_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})} \cos \tilde{\gamma}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) \right) + \\ \text{если выполняется V,} \\ \tilde{x}_i(t_{k-1}) + \frac{c_2}{d_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})} \cos \tilde{\gamma}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}), \\ \text{если выполняется VI,} \\ \tilde{x}_i(t_{k-1}), \text{ если выполняется VII,} \end{cases} \quad (11)$$

$$\tilde{y}_i(t_k) = \begin{cases} \tilde{y}_i(t_{k-1}), \text{ если выполняется I,} \\ \tilde{y}_i(t_{k-1}) + \tilde{v}_i(t_k) \sin(\pm\tilde{\omega}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{d_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})} \sin \tilde{\gamma}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}), \\ \text{если выполняется II,} \\ \tilde{y}_i(t_{k-1}) + \frac{c_1}{d_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})} \sin \tilde{\gamma}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}), \\ \text{если выполняется III,} \\ \hat{y}_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \sin(\lambda\tilde{v}_i^*(t_{k-1}) + \tilde{\alpha}_i(t_{k-1})), \\ \text{если выполняется IV,} \\ \left(\tilde{y}_i(t_{k-1}) + \sin \left(\lambda\tilde{v}_i^*(t_{k-1}) + \right. \right. \\ \left. \left. \tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) \pm \tilde{\omega}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) \right) + \right. \\ \left. \frac{c_2}{d_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})} \sin \tilde{\gamma}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) \right) + \\ \text{если выполняется V,} \\ \tilde{y}_i(t_{k-1}) + \frac{c_2}{d_{\tilde{j}_b}(t_{k-1})} \sin \tilde{\gamma}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}), \\ \text{если выполняется VI,} \\ \tilde{y}_i(t_{k-1}) + \tilde{w}_i(t_{k-1})\lambda\tilde{v}_i(t_{k-1}), \\ \text{если выполняется VII,} \end{cases} \quad (12)$$

$$\tilde{i} \in I, b \in B, j_b \in J_b,$$

где

- I. $s_i(t_{k-1}) \in \{2, 4\}$ и $\tilde{c}_i(t_0) \in \{1, 2\}$ и $\tilde{d}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) > \tilde{r}_i(t_{k-1}) + r_{j_b}(t_{k-1})$ для всех $j_b \in J_b$, что соответствует условиям движения БТС на линейном участке ЦДС в направлении **слева-направо** или **справа-налево** (при въезде или выезде из ЦДС) и отсутствии препятствий, т.е. когда расстояние между данным БТС и другими агентами превышает сумму длин радиусов их личных пространств;
- II. $s_i(t_{k-1}) \in \{2, 4\}$ и $\tilde{d}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) \leq \tilde{r}_i(t_{k-1}) + r_{j_b}(t_{k-1})$ для ближайшего $j_b \in J_b$ и $\gamma_{\tilde{j}_b}^*(t_{k-1}) = 0$, что соответствует условиям движения БТС на линейном участке ЦДС (в любом направлении) и **наличии (появления) препятствия**, находящегося впереди относительно данного БТС (т.е. занимающего ту же полосу движения на критически близком расстоянии), что обуславливает маневрирование в виде обгона или объезда данного препятствия;
- III. $s_i(t_{k-1}) \in \{2, 4\}$ и $\tilde{d}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) \leq \tilde{r}_i(t_{k-1}) + r_{j_b}(t_{k-1})$ для ближайшего $j_b \in J_b$ и $\gamma_{\tilde{j}_b}^*(t_{k-1}) > 0$, что соответствует условиям движения БТС на линейном участке ЦДС (в любом направлении) и наличии препятствия, **не находящегося впереди** относительно данного БТС (т.е. расположенного сзади или сбоку на критически близком расстоянии), что обуславливает маневрирование в виде увеличения дистанции относительно данного препятствия (т.е. ускорения, торможения или уклонения от столкновения);
- IV. $s_i(t_{k-1}) = 3$ и $\tilde{d}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) > \tilde{r}_i(t_{k-1}) + r_{j_b}(t_{k-1})$ для всех $j_b \in J_b$, что соответствует условиям перемещения БТС **в зоне кругового движения ЦДС** и отсутствию препятствий;
- V. $s_i(t_{k-1}) = 3$ и $\tilde{d}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) \leq \tilde{r}_i(t_{k-1}) + r_{j_b}(t_{k-1})$ для ближайшего $j_b \in J_b$ и $\gamma_{\tilde{j}_b}^*(t_{k-1}) = 0$, что соответствует условиям перемещения БТС в зоне кругового движения ЦДС и **наличии (появлении) препятствия**, находящегося впереди относительно данного БТС, что обуславливает маневрирование в виде обгона или объезда данного препятствия;
- VI. $s_i(t_{k-1}) = 3$ и $\tilde{d}_{\tilde{j}_b}(t_{k-1}) \leq \tilde{r}_i(t_{k-1}) + r_{j_b}(t_{k-1})$ для ближайшего $j_b \in J_b$ и $\gamma_{\tilde{j}_b}^*(t_{k-1}) > 0$, что соответствует условиям перемещения БТС в зоне кругового движения ЦДС и наличии препятствия, **не находящегося впереди** относительно данного БТС, что обуславливает необходимость маневрирования в виде увеличения дистанции относительно данного препятствия;

VII. $s_i(t_{k-1}) \in \{2, 4\}$ и $\tilde{c}_i(t_0) \in \{3, 4\}$ и $\tilde{d}_{j_b}(t_{k-1}) > \tilde{r}_i(t_{k-1}) + r_{j_b}(t_{k-1})$ для всех $j_b \in J_b$ или $s_i(t_{k-1}) = 1$, что соответствует условиям движения БТС на **линейном участке ЦДС** в направлении **снизу-вверх** или **сверху-вниз** (при въезде или выезде из ЦДС) и **отсутствии препятствий**.

Далее будет представлена программная реализация предложенной модели (11)–(12) с использованием FLAME GPU.

2. Программная реализация

Программная реализация модели движения БТС взаимодействующих с другими участниками дорожного движения позволяет исследовать динамику ДТП при различных конфигурациях цифровой дорожной сети (ЦДС) (рис. 4).

Выбор наилучшей конфигурации уличной дорожной сети должен быть основан на сочетании расчетных и экспертных методов принятия решений. Использование разработанной имитационной модели позволяет сформировать набор альтерна-

тивных вариантов реализации интеллектуальной транспортной системы «умного города» и режимов ее функционирования. При этом, могут применяться генетические оптимизационные алгоритмы [2, 3], методы сценарного анализа [4, 5] и др., позволяющие улучшить значения целевых функционалов системы: суммарного трафика выходного потока и количества потенциальных ДТП. Далее на основе методов экспертной оценки [26, 27] могут быть получены практические рекомендации по трансформации конфигурации ЦДС и использованию БТС с характеристиками, обеспечивающими требуемый уровень безопасности «умного города».

Программная реализация подобной модели выполнена с использованием платформы FLAME GPU (<https://flamegpu.com/>), обеспечивающей эффективное распараллеливание логики поведения взаимодействующих агентов и их индивидуальных систем принятия решений.

В *таблице 1* представлено описание функций, разработанных на языке C++ с использованием и FLAME GPU.

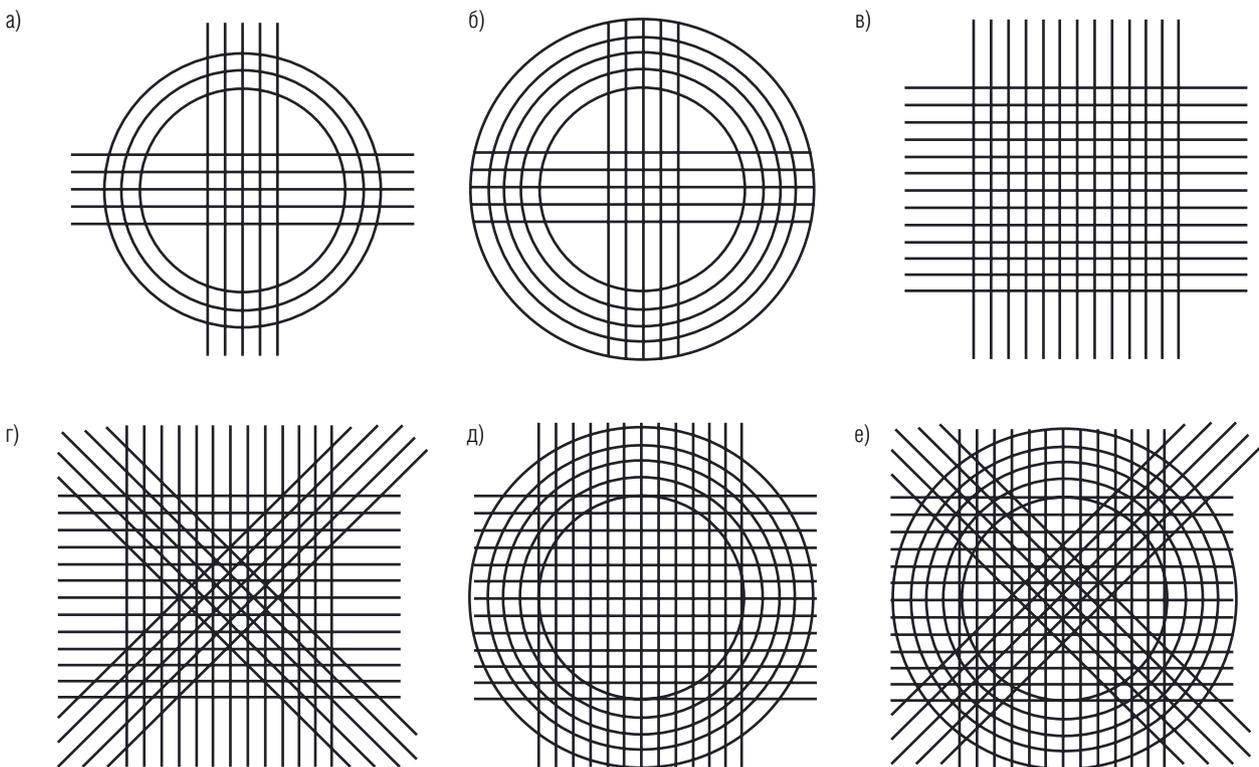


Рис. 4. Конфигурации ЦДС:

- а) простая радиально-кольцевая, б) расширенная радиально-кольцевая, в) прямоугольная,
- г) прямоугольно-диагональная, д) прямоугольно-кольцевая, е) прямоугольно-диагонально-кольцевая.

**Основные вычислительные процедуры
и функции имитационной модели**

Название функции	Назначение	Входные сообщения	Выходные сообщения
FLAMEGPU_INIT_FUNCTION (init_function)	Инициализация модели. Формирование конфигурации ЦДС в соответствии с заданным значением управляющего параметра модели. Генерация начальной популяции агентов (БТС и ОТС).	Нет	Нет
FLAMEGPU_STEP_FUNCTION (BasicOutput)	Генерация новых агентов (БТС и ОТС) и их прибытие в ЦДС с заданной интенсивностью. Формирование агентов-препятствий (например, пешеходов) на проезжих участках ЦДС.	Нет	Нет
FLAMEGPU_STEP_FUNCTION (agents_data Updating)	Выполнение алгоритма иерархической кластеризации для выявления проблемных участков ЦДС и объезда БТС возникающих пробок. Сохранение данных о пространственном расположении агентов и их характеристиках для последующей визуализации с использованием OpenGL.	Нет	Нет
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (density_estimation, flamegpu::MessageSpatial2D, flamegpu::MessageNone)	Оценка плотности потока вокруг агента-ТС, изменение радиуса личного пространства агента и его скорости при взаимодействии с другими агентами (например, уменьшение радиуса личного пространства агента в плотном дорожном потоке и увеличение при возникновении препятствий). Определение угла направления и расстояния до ближайшего агента с целью последующего маневрирования (обгона или торможения). Регистрация аварийных ситуаций (ДТП).	Данные по агентам	Нет
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (update_agent_state, flamegpu::MessageNone, flamegpu::MessageSpatial2D)	Вычисление результирующих характеристик модели (количества ДТП, трафика выходного потока). Передача данных об агенте-ТС другим участникам дорожного движения.	Нет	Данные по агентам
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (agent_move, flamegpu::MessageNone, flamegpu::MessageNone)	Пространственное перемещение агента в ЦДС в соответствии с заданными правилами принятия индивидуальных решений, например, въезд (или выезд) в (или из) ЦДС при прямолинейном, круговом движении, маневрировании и др.	Нет	Нет
void display()	Визуализация ЦДС и пространственной динамики агентов с использованием OpenGL для каждого момента модельного времени.	Нет	Нет

В таблице 1 в основном представлены два типа функций: FLAMEGPU_STEP_FUNCTION и FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION. Функции первого типа выполняются в каждый момент модельного времени на уровне центрального процессора CPU, а функции второго типа – выполняются в режиме параллельных вычислений с использованием графических процессоров (GPUs). Таким образом, обеспечивается распараллеливание логики поведения каждого агента (в том числе, изменение скорости, маневрирование и др.). В результа-

те разработанная имитационная модель позволяет исследовать поведение ансамбля БТС, ОТС и других агентов в масштабе «умного города» (т.е. симулировать трафик, включающий десятки и сотни тысяч взаимодействующих участников дорожного движения). Визуализация пространственной динамики агентов осуществляется с использованием OpenGL – специального интерфейса (API), обеспечивающего возможность программной отрисовки множественных объектов, как стационарных, так и динамических (см. рис. 5).

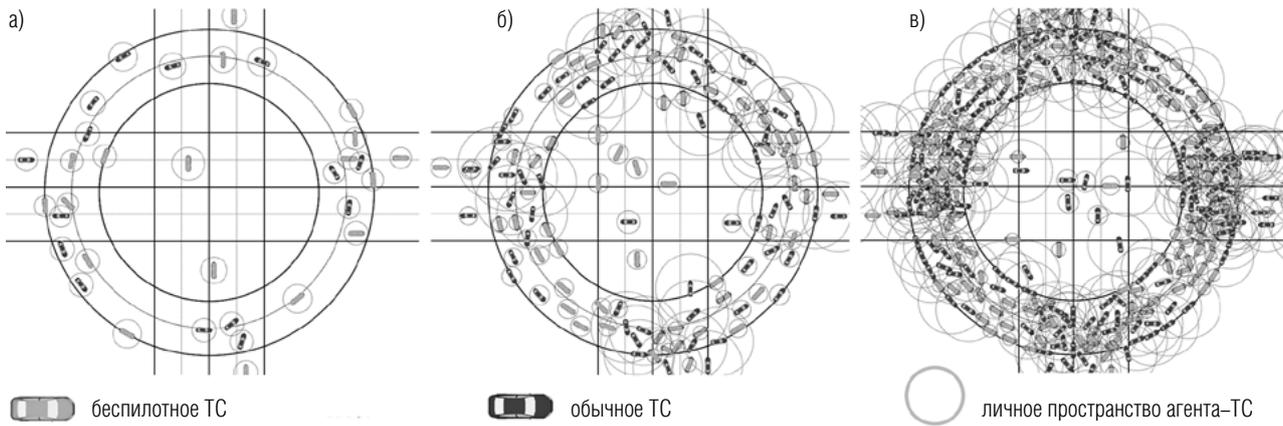


Рис. 5. Пространственная динамика агентов в простой радиально-кольцевой ЦДС: а) малоинтенсивный трафик, б) среднеинтенсивный трафик, в) высокоинтенсивный трафик.

В результате можно визуализировать пространственное распределение агентов в ЦДС и оценить состав и состояние участников дорожного движения (БТС, ОТС, ТС находящихся в аварийном состоянии и др.), что существенно упрощает процесс валидации разработанной модели.

3. Результаты численных экспериментов

В *таблице 2* представлены результирующие характеристики имитационной модели: трафик выходного потока (ТВП) и количество ТС, находящихся в аварийном состоянии (ДТП), вычисленные для конечного момента времени (60 мин.) при различных сценариях и отсутствии экстремальных

ситуаций, т.е. в условиях достаточной видимости, при сухом дорожном покрытии, отсутствии неожиданных препятствий в виде пешеходов и др.:

- ◆ **Сценарий 1.** Малоинтенсивное и низкоскоростное движение БТС. Базовая скорость БТС и ОТС: 45–65 км/час, интенсивность прибытия ТС в ЦДС: 1 ТС каждые 10 сек.
- ◆ **Сценарий 2.** Среднеинтенсивное и среднескоростное движение БТС. Базовая скорость БТС и ОТС: 65–90 км/час, интенсивность прибытия ТС в ЦДС: 5 ТС каждые 10 сек.
- ◆ **Сценарий 3.** Высокоинтенсивное и высокоскоростное движение БТС. Базовая скорость БТС и ОТС: 100–120 км/час, интенсивность прибытия ТС в ЦДС: 10 ТС каждые 10 сек.

Таблица 2.

Трафик выходного потока и количество потенциальных ДТП при отсутствии чрезвычайных ситуаций

Конфигурации ЦДС	Сценарий 1		Сценарий 2		Сценарий 3	
	ТВП	ДТП	ТВП	ДТП	ТВП	ДТП
Простая радиально-кольцевая	706	0	905	2	2810	6
Расширенная радиально-кольцевая	851	0	1321	2	3100	6
Прямоугольная	1010	0	1532	2	3520	8
Прямоугольно-диагональная	1205	0	1720	2	3610	8
Прямоугольно-кольцевая	1305	0	1850	2	3750	10
Прямоугольно-диагонально-кольцевая	1530	0	2120	2	4111	12

**Трафик выходного потока и количество потенциальных ДТП
при наличии экстремальных условий**

Конфигурации ЦДС	Сценарий 1		Сценарий 2		Сценарий 3	
	ТВП	ДТП	ТВП	ДТП	ТВП	ДТП
Простая радиально-кольцевая	655	2	870	2	2800	12
Расширенная радиально-кольцевая	760	2	1210	4	3100	14
Прямоугольная	980	0	1310	6	3462	14
Прямоугольно-диагональная	1110	0	1622	8	3423	16
Прямоугольно-кольцевая	1210	2	1780	8	3554	18
Прямоугольно-диагонально-кольцевая	1400	2	2100	10	3780	20

В таблице 3 представлены результирующие характеристики имитационной модели при наличии экстремальных условий (т.е. в условиях недостаточной видимости, мокрого дорожного покрытия, неожиданного появления пешеходов, велосипедистов и других препятствий на проезжей части дороги и др.).

На рис. 6 представлена динамика ДТП (накопительным итогом) для сценария 3 (табл. 3), т.е. при высокоинтенсивном и высокоскоростном движении БТС в условиях экстремальных ситуаций. При этом на рис. 6 показаны количественные характеристики дорожных заторов, возникающих вследствие эффектов «турбулентности» и «давки», описанных ранее в работах [6, 17].

Из рис. 6 видно, что динамика ДТП (т.е. количество ТС, находящихся в аварийном состоянии) связана с увеличением числа и средней плотности дорожных заторов. Таким образом, рост общего количества и масштаба пробок в ЦДС в условиях высокоинтенсивного и высокоскоростного транспортного потока является важнейшим фактором, обуславливающим возникновение аварийных ситуаций, в том числе с участием БТС, перед которыми периодически возникают неожиданные препятствия. Подобный феномен объясняется попытками маневрирования (например, резкого торможения, обгона и др.) со стороны ТС, что в условиях дорожных заторов часто приводит к ДТП. Вместе с тем, из табл. 3 следует, что снижение скоростного режима (до 45–65 км/час) и интенсивности прибытия ТС в ЦДС (до 0,1 ТС в сек.) обеспечивает высокий уровень безопасности дорожного движения даже в экстремальных условиях.

Заключение

В статье представлен подход к моделированию динамики дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей в многоагентной интеллектуальной транспортной системе «умного города» (рис. 1). Предложена модель движения ансамбля БТС в цифровой дорожной сети (ЦДС) с реализацией на примере простой радиально-кольцевой схемы уличной дорожной сети (рис. 3). Подобная модель, использующая систему конечно-разностных уравнений с переменной структурой (11)–(12), позволяет исследовать пространственную динамику агентов-БТС, взаимодействующих с различными препятствиями, например, ОТС, неожиданно возникающими пешеходами и др. при различных конфигурациях ЦДС (рис. 4). При этом, каждый агент-БТС имеет индивидуальную систему принятия решений по маневрированию, нацеленную на предотвращение возникновения аварийных ситуаций, в частности, посредством изменения радиуса личного пространства агента-БТС, снижения скорости, объезда неожиданно возникающих препятствий и др. (рис. 2). Предложенная имитационная модель была реализована с использованием платформы крупномасштабного агент-ориентированного моделирования FLAME GPU, что позволило изучить поведение ансамбля БТС, взаимодействующих с другими агентами, в том числе в условиях высокоинтенсивного трафика (рис. 5). Полученные численные результаты (рис. 6, табл. 2–3) подтверждают возможность достижения необхо-

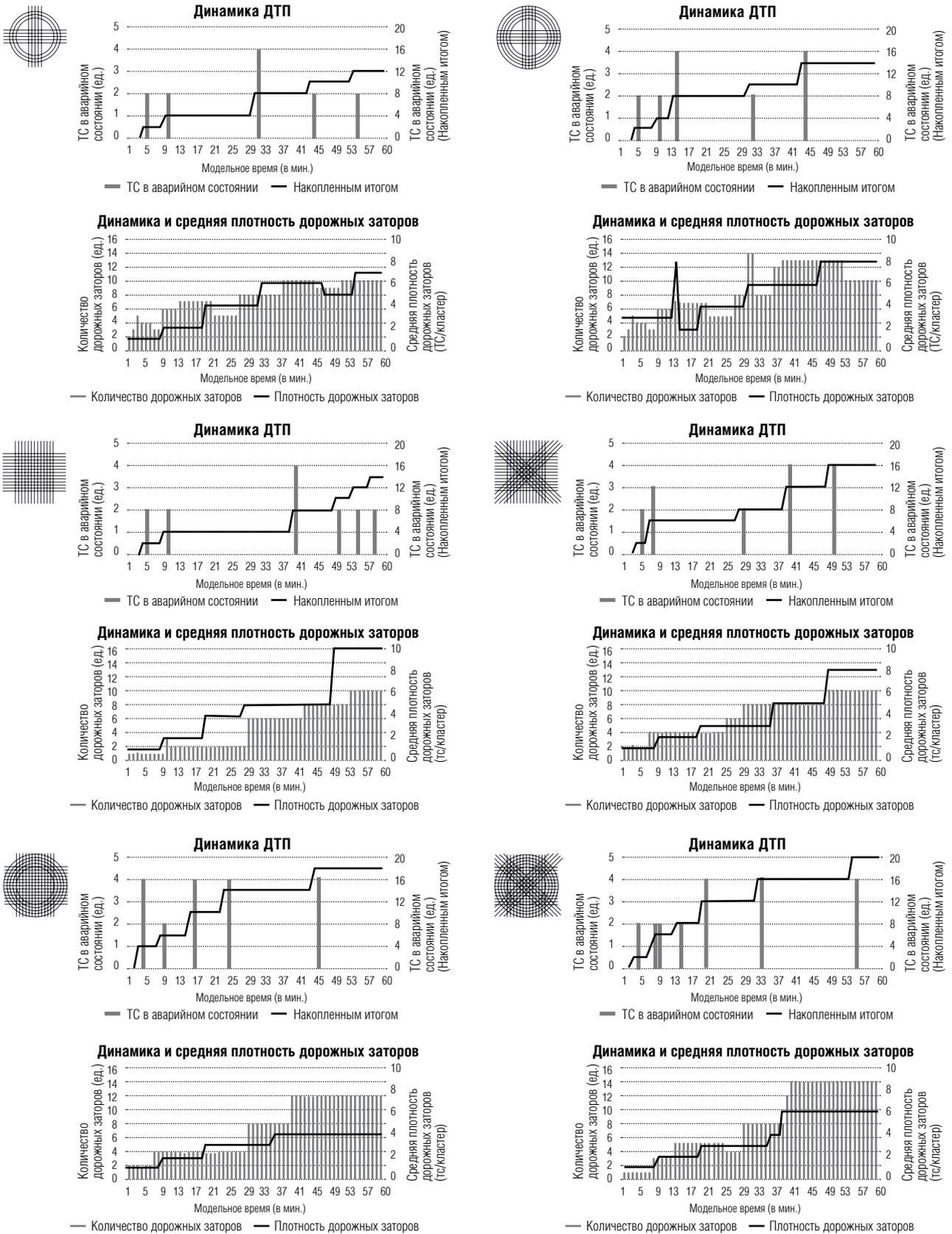


Рис. 6. Динамика ДТП и характеристики дорожных заторов при различной конфигурации цифровой дорожной сети (ЦДС): возникновение новых аварий взаимосвязано с появлением пробок и увеличением их средней плотности и зависит от геометрии ЦДС.

димого уровня безопасности дорожного движения даже в экстремальных условиях.

Дальнейшие исследования будут направлены на решение задач оптимальной маршрутизации БТС в ЦДС для минимизации влияния дорожных заторов и вынужденного маневрирования на динамику ДТП. ■

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), в рамках научного проекта № 19-29-06003.

Литература

1. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Имитационное моделирование системы «умный город»: концепция, методы и примеры // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2019. Т. 15. № 2 (371). С. 200–224. <https://doi.org/10.24891/ni.15.2.200>
2. 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>
3. 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>
4. Акопов А.С., Бекларян А.Л. Сценарное моделирование движения беспилотных транспортных средств в искусственной дорожной сети с использованием FLAME GPU // Искусственные общества. 2021. Т. 16. Выпуск 1. <https://doi.org/10.18254/S207751800014028-9>
5. Акопов А.С., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л., Белоусов Ф.А. Моделирование движения ансамбля наземных беспилотных транспортных средств с использованием FLAME GPU // Информационные технологии. 2021. Т. 27. № 7. С. 369–379. <https://doi.org/10.17587/it.27.369-379>
6. Акопов А.С., Бекларян Л.А., Хачатрян Н.К., Бекларян А.Л., Кузнецова Е.В. Многоагентная система управления наземными беспилотными транспортными средствами // Информационные технологии. 2020. Т. 26. № 6. С. 342–353. <https://doi.org/10.17587/it.26.342-353>
7. Андреев К.П., Кильдишев А.А., Терентьев В.В., Шемякин А.В. Оценка безопасности транспортных узлов средствами компьютерного моделирования // Бюллетень транспортной информации. 2019. № 1 (283). С. 20–23.
8. Колотов В.В., Колюжнов В.В. Интеллектуальная транспортная система и моделирование дорожно-транспортных ситуаций // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 12 (90). С. 53–56.
9. Astarita V., Pasquale Giofrè V. From traffic conflict simulation to traffic crash simulation: Introducing traffic safety indicators based on the explicit simulation of potential driver errors // Simulation Modelling Practice and Theory. 2019. Vol. 94. P. 215–236. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.03.003>
10. Кравченко Т.К., Исаев Д.В. Системы поддержки принятия решений. М.: Юрайт, 2017.
11. Brännström M., Coelingh E., Sjöberg J. Model-based threat assessment for avoiding arbitrary vehicle collisions // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2010. Vol. 11. No. 3. P. 658–669. <https://doi.org/10.1109/TITS.2010.2048314>
12. Cheng S., Li L., Guo H.-Q., Chen Z.-G., Song P. Longitudinal collision avoidance and lateral stability adaptive control system based on MPC of autonomous vehicles // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2020. Vol. 21. No. 6. P. 2376–2385. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2918176>
13. Petrović D., Mijailović R., Pešić D. Traffic accidents with autonomous vehicles: Type of collisions, manoeuvres and errors of conventional vehicles' drivers // Transportation Research Procedia. 2020. Vol. 45. P. 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.003>
14. Wang H., Huang Y., Khajepour A., Zhang Y., Rasekhipour Y., Cao D. Crash mitigation in motion planning for autonomous vehicles // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20. No. 9. P. 3313–3323. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2873921>
15. Wang J., Wu J., Li Y. The driving safety field based on driver-vehicle-road interactions // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. Vol. 16. No. 4. P. 2203–2214. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2401837>
16. You F., Zhang R., Lie G., Wang H., Wen H., Xu J. Trajectory planning and tracking control for autonomous lane change maneuver based on the cooperative vehicle infrastructure system // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 14. P. 5932–5946. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.03.022>
17. Akopov A.S., Beklaryan L.A. An agent model of crowd behavior in emergencies // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76. No. 10. P. 1817–1827.
18. Richmond P., Walker D., Coakley S., Romano D. High performance cellular level agent-based simulation with FLAME for the GPU // Briefings in Bioinformatics. 2010. Vol. 11. No. 3. P. 334–347. <https://doi.org/10.1093/bib/bbp073>
19. Heywood P., Richmond P., Maddock S. Road network simulation using FLAME GPU // Euro-Par 2015: Parallel Processing Workshops. Lecture Notes in Computer Science. 2015. Springer, Cham. Vol 9523. P. 430–431. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27308-2_35

20. Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems // *Reviews of Modern Physics*. 2001. Vol. 73. No. 4. P. 1067–1141. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.1067>
21. Helbing D., Buzna L., Johansson A., Werner T. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions // *Transportation Science*. 2005. Vol. 39. No. 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0108>
22. Khachatryan N.K., Akopov A.S. Model for organizing cargo transportation with an initial station of departure and a final station of cargo distribution // *Business Informatics*. 2017. Vol. 1. No. 39. P. 25–35. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2017.1.25.35>
23. Belousov F.A., Khachatryan N.K., Nevolin I.V. Reduction of dimension in the problem of optimal management of a freight cars fleet using unmanned locomotives // *Business Informatics*. 2022. Vol. 2. No. 16. P. 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.2.7.20>
24. Müllner D. fastcluster: Fast hierarchical, agglomerative clustering routines for R and Python // *Journal of Statistical Software*. 2013. Vol. 53. No. 9. P. 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v053.i09>
25. Косцов А.В., Бахирев И.А., Боровик Е.Н., Мартяхин Д.С. Транспортная планировка городов. Учебное пособие. Москва: А-проджект, 2017.
26. Кравченко Т.К., Исаев Д.В. Принятие стратегических решений в условиях риска и неопределенности // *Вестник Финансового университета*. 2016. Т. 20. № 4. С. 22–31. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2016-20-4-22-31>
27. Исаев Д.В. Принятие стратегических управленческих решений на основе сочетания расчетных и экспертных методов // *Материалы XXIII Всероссийского симпозиума «Стратегическое планирование и развитие предприятий»*, М.: ЦЭМИ РАН. 2022. С. 174–176. <https://doi.org/10.34706/978-5-8211-0802-9-s2-10>

Об авторах

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

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

Simulation of rates of traffic accidents involving unmanned ground vehicles within a transportation system for the ‘smart city’

Andranik S. Akopov

E-mail: akopovas@umail.ru

Levon A. Beklaryan

E-mail: beklar@cemi.rssi.ru

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences

Address: 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia

Abstract

This article presents an approach to simulation of the rates of road traffic accidents involving unmanned ground vehicles within a multi-agent intelligent transportation system for the ‘smart city.’ A new simulation model of an intelligent transport system has been developed which makes it possible to significantly reduce the number of potential road traffic accidents (TAs) and implements the concept of socially-centered management of the urban economy. The software implementation of such a large-scale agent-based model was carried out using the FLAME GPU framework, which allows us to effectively parallelize the agents’ behaviour logic and consider their individual decision-making systems when modelling the spacial dynamics of an ensemble of unmanned ground vehicles (UGVs) interacting with other road users: the usual manned ground vehicles (MGVs), unexpected obstacles (e.g., pedestrians, etc.). Various scenarios of such agents’ behaviour in an intelligent transportation system are studied, including the occurrence of an accident under certain conditions (e.g., under the high speed and traffic intensity of UGVs, etc.) and various configurations of the digital road network (DRN). We determine the parameter values that provide for the individual decision-making system of UGVs remaining stable with respect to the characteristics of the external environment (including in extreme situations), ensuring the safety of other road users on the scale of the ‘smart city.’

Keywords: socially-centered urban management, agent-based modeling, intelligent transportation systems, smart city, simulation of traffic accidents, unmanned vehicles, FLAME GPU

Citation: 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. DOI: 10.17323/2587-814X.2022.4.19.35

References

1. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2019) Simulation modelling of the smart city system: Concept, methods and cases. *National Interests: Priorities and Security*, vol. 15, no. 2 (371), pp. 200–224 (in Russian). <https://doi.org/10.24891/ni.15.2.200>
2. 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>
3. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Beklaryan L.A. (2021) Simulation-based optimization for autonomous transportation systems using a parallel real-coded genetic algorithm with scalable nonuniform mutation. *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 21, no. 3, pp. 127–144. <https://doi.org/10.2478/cait-2021-0034>
4. Akopov A.S., Beklaryan A.L. (2021) Scenario simulation of autonomous vehicles motion in artificial road network using FLAME GPU. *Artificial societies*, vol. 16, no. 1 (in Russian). <https://doi.org/10.18254/S207751800014028-9>
5. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L., Belousov F.A. (2021) Simulation of motion of an ensemble of unmanned ground vehicles using FLAME GPU. *Informacionnye Tehnologii*, vol. 27, no. 7, pp. 369–379 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/it.27.369-379>
6. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Khachatryan N.K., Beklaryan A.L., Kuznetsova E.V. (2020) Multi-agent control system for unmanned ground vehicles. *Informacionnye Tehnologii*, vol. 26, no. 6, pp. 342–353 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/it.26.342-353>
7. Andreev K.P., Kildishev A.A., Terentiev V.V., Shemiakin A.V. (2019) Safety assessment of transport units by means of computer simulation. *Byulleten' transportnoj informacii*, no. 1 (283), pp. 20–23 (in Russian).
8. Kolotov V.V., Kolyuzhnov V.V. (2011) Intelligent transport system and road situation modelling. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij*, no. 12 (90), pp. 53–56 (in Russian).
9. Astarita V., Pasquale Giofrè V. (2019) From traffic conflict simulation to traffic crash simulation: Introducing traffic safety indicators based on the explicit simulation of potential driver errors. *Simulation Modeling Practice and Theory*, vol. 94, pp. 215–236. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.03.003>
10. Kravchenko T.K., Isaev D.V. Decision support systems. Moscow: Urait, 2017 (in Russian).
11. Brännström M., Coelingh E., Sjöberg J. (2010) Model-based threat assessment for avoiding arbitrary vehicle collisions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 658–669. <https://doi.org/10.1109/TITS.2010.2048314>
12. Cheng S., Li L., Guo H.-Q., Chen Z.-G., Song P. (2020) Longitudinal collision avoidance and lateral stability adaptive control system based on MPC of autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 6, pp. 2376–2385. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2918176>

13. Petrović D., Mijailović R., Pešić D. (2020) Traffic accidents with autonomous vehicles: Type of collisions, manoeuvres and errors of conventional vehicles' drivers. *Transportation Research Procedia*, vol. 45, pp.161-168. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.003>
14. Wang H., Huang Y., Khajepour A., Zhang Y., Rasekhipour Y., Cao D. (2019) Crash mitigation in motion planning for autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 9, pp. 3313–3323. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2873921>
15. Wang J., Wu J., Li Y. (2015) The driving safety field based on driver–vehicle–road interactions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 2203–2214. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2401837>
16. You F., Zhang R., Lie G., Wang H., Wen H., Xu J. (2015) Trajectory planning and tracking control for autonomous lane change maneuver based on the cooperative vehicle infrastructure system. *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 14, pp. 5932–5946. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.03.022>
17. Akopov A.S., Beklaryan L.A. (2015) An agent model of crowd behaviour in emergencies. *Automation and Remote Control*, vol. 76, no. 10, pp. 1817–1827. <https://doi.org/10.1134/S0005117915100094>
18. Richmond P., Walker D., Coakley S., Romano D. (2010) High performance cellular level agent-based simulation with FLAME for the GPU. *Briefings in Bioinformatics*, vol. 11, no. 3, pp. 334–347. <https://doi.org/10.1093/bib/bbp073>
19. Heywood P., Richmond P., Maddock S. (2015) Road network simulation using FLAME GPU. In: *Euro-Par 2015: Parallel-Processing Workshops. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9523. Springer, Cham, pp. 430–431. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27308-2_35
20. Helbing D. (2001) Traffic and related self-driven many-particle systems // *Reviews Of Modern Physics*, vol. 73, no. 4, pp. 1067–1141. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.1067>
21. Helbing D., Buzna L., Johansson A., Werner T. (2005) Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation Science*, vol. 39, no. 1, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0108>
22. Khachatryan N.K., Akopov A.S. (2017) Model for organizing cargo transportation with an initial station of departure and a final station of cargo distribution. *Business Informatics*, vol. 1, no. 39, pp. 25–35. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2017.1.25.35>
23. Belousov F.A., Khachatryan N.K., Nevolin I.V. (2022) Reduction of dimension in the problem of optimal management of a freight cars fleet using unmanned locomotives. *Business Informatics*, vol. 2, no. 16, pp. 7-20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.2.7.20>
24. Mullner D. (2013) fastcluster: Fast hierarchical, agglomerative clustering routines for R and Python. *Journal of Statistical Software*, 53, no. 9, pp. 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v053.i09>
25. Kostsov A.V., Bakhirev I.A., Borovik E.N., Martynakhin D.S. (2017) *Transport planning of cities. Textbook*. Moscow: A-project (in Russian).
26. Kravchenko T.K., Isaev D.V. (2016) Making strategic decisions under risk and uncertainties. *Finance: Theory and Practice*, vol. 20, no. 4, pp. 22–31 (in Russian). <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2016-20-4-22-31>
27. Isaev D.V. (2022) Making strategic management decisions based on a combination of computation and expert methods. *Proceedings of the XXIII All-Russian Symposium “Strategic Planning and Development of Enterprises”*, Moscow: CEMI RAS, pp. 174–176 (in Russian). <https://doi.org/10.34706/978-5-8211-0802-9-s2-10>

About the authors

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, Nachimovky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: akopovas@umail.ru

ORCID: 0000-0003-0627-3037

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