

УДК 519.833

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.012

Исследование влияния беспилотных автомобилей на динамику выбора между индивидуальным и общественным транспортом

Быков Никита Валерьевич^{1,2}, Костров Максим Алексеевич^{1,2}

¹Российский университет транспорта (РУТ-МИИТ), Россия, Москва, bykov@bmstu.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва

Аннотация. В работе исследуются социальные дилеммы, возникающие при внедрении беспилотных автомобильных транспортных средств в гетерогенный транспортный поток, включающий индивидуальные транспортные средства и автобусы. Для анализа используется модель транспортного потока на основе клеточных автоматов Revised S-NFS, позволяющая выявлять эффекты взаимодействия различных типов агентов. Критерием наличия социальной дилеммы выступает дефицит социальной функции, связанный с расхождением между равновесием Нэша и оптимальным по Парето распределением стратегий. Рассмотрены сценарии с различной долей беспилотных транспортных средств и начальными плотностями потока. Показано, что в системе могут реализовываться дилемма «заключённого» и дилемма «ястребы и голуби» между автобусами и другими видами транспорта, тогда как для беспилотных транспортных средств характерно устойчивое преимущество в скорости, приводящее к исчезновению социальных дилемм при их доминировании в потоке. Полученные результаты расширяют представления о влиянии БАТС на динамику выбора транспортного средства и могут служить основой для разработки транспортной политики, учитывающей конфликт индивидуальных и общественных интересов.

Ключевые слова: беспилотный транспорт, клеточные автоматы, социальные дилеммы, автобусы, кооперативное поведение, теория игр, транспортный поток

Цитирование: Быков Н.В. Исследование влияния беспилотных автомобилей на динамику выбора между индивидуальным и общественным транспортом / Н.В. Быков, М.А. Костров // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 4(40). – С.151-163. – DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.012.

Введение. Беспилотные автомобильные транспортные средства (БАТС) постепенно внедряются в существующие транспортные потоки. Так, компания Tesla запустила сервис такси с беспилотными автомобилями в США. Отечественные компании Navio, Яндекс и др. также ведут разработки в области беспилотных автомобилей и тестируют их на дорогах общего пользования. Главным преимуществом БАТС является возможность синхронизации их между собой и образование кластеров (в англ. platoon) – синхронизированных колонн из БАТС, передвигающихся с одной скоростью благодаря обмену информации через соответствующие протоколы [1-3]. С совершенствованием систем управления и накоплением опыта эксплуатации доля БАТС на дорогах общего пользования будет только нарастать. Поэтому проблема исследования влияния БАТС на транспортные потоки в настоящее время широко исследуется в мире [4, 5].

В связи с начальным этапом внедрения БАТС в транспортные потоки и, как следствие, невозможности широкомасштабных экспериментальных исследований, основным инструментом исследования является математическое и компьютерное моделирование. Модели транспортных потоков разделяют на модели макро- и микроуровня (иногда выделяют также мезоуровень) [6]. Первые относительно просты, при этом их удобно использовать для изучения преимущественно гомогенных транспортных потоков [7-10]. Модели микроуровня описывают движение отдельных ТС, поэтому их часто используют при моделировании гетерогенных транспортных потоков [11-13]. Среди моделей микроуровня особо выделяются модели на основе клеточных автоматов (КА) [14-17], сочетающие эффективность и простоту, а также хорошо согласующиеся с опытными данными.

Одной из острых проблем, порождаемых урбанизацией и ростом городского населения, является стимулирование людей использовать общественный транспорт вместо личного, что

позволяет существенно повысить пропускную способность имеющихся транспортных систем [7, 11, 12, 17, 18]. В работе [18] показано, что при выборе между традиционным личным и общественным транспортом возникают социальные дилеммы – ситуации, в которых сталкиваются личные и общественные интересы. Наличие социальной дилеммы в теоретико-игровой ситуации из N агентов определяется двумя необходимыми признаками [19]: существует стратегия, выбор которой приводит агента к достижению максимального выигрыша по крайней мере в одном из исходов, но выбор этой стратегии может негативно влиять на выигрыш других агентов; выбор данной стратегии всеми агентами ведёт к невыгодному исходу для всех участников взаимодействия. Такая стратегия называется *D*-стратегией (от англ. defector). При выборе транспорта возникают социальная дилемма заключенного для N игроков, а в случае выделенной полосы – дилемма труса для N игроков. В работах [20, 21] показано возникновение социальных дилемм в гетерогенном потоке из традиционных (управляемых человеком) и беспилотных транспортных средств. Исследование и понимание социальных дилемм открывает возможности для управления выбором для стимулирования механизмов кооперативного поведения и позволяет не только глубже понять механизмы организации транспортных систем, но и сформулировать практические рекомендации для транспортной политики, ориентированные на гармоничное сосуществование различных групп населения.

Целью настоящей работы является исследование социальных дилемм, возникающих при обобщении ситуаций, описанных в работах [18, 20], т. е. при наличии в потоке трёх типов агентов: управляемых человеком индивидуальных транспортных средств (ИТС), автобусов и БАТС. Постановка трехсторонней игровой задачи является весьма специфической и может быть проанализирована в основном в частных случаях, когда взаимодействие может быть разбито на парный выбор, поэтому сама по себе представляет определенный интерес. При этом мы покажем, что масштабное внедрение БАТС вообще устраняет социальную дилемму выбора между личным и общественным транспортом.

Необходимо отметить, что с точки зрения постановки задачи существенны лишь вместимость транспортного средства и тип его движения. Поэтому, например, нет никакой разницы, считать ли под ИТС только личные автомобили или же включать туда такси, которые управляются человеком-водителем; точно так же нет разницы между личным БАТС и БАТС-такси: все эти средства перевозят одно и то же количество пассажиров и управляются либо человеком, либо являются беспилотными и только в этом состоит разница с точки зрения модели. При этом, практика моделирования и предварительные результаты показывают, что в гетерогенном потоке БАТС не обладают существенными преимуществами в скоростях до момента, пока их доля в потоке не станет преобладающей [2, 3, 20, 21]. Это связано с тем, что основное преимущество БАТС – образование кластеров – в смешанном потоке реализуется довольно ограничено. С точки зрения задачи выбора транспорта в этом случае наиболее интересна ситуация, когда БАТС предоставлено некоторое имманентное преимущество, которое может быть реализовано за счет возможности использовать выделенную полосу для автобусов, плотность которых намного меньше обычных транспортных средств и поэтому на ней можно образовывать кластеры.

1. Модель движения. В модели три класса транспортных средств (ТС): ИТС, автобусы и БАТС. Для описания движения в полосе используется модифицированная модель на клеточных автоматах Revised S-NFS [18, 20–22]. Для моделирования перестроений ИТС и БАТС используется модифицированная модель Кукиды [20, 23]. Выбор этих моделей обусловлен их широким распространением, способностью воспроизводить экспериментальные данные и учетом теории трех фаз Кернера [22, 24]. Время и пространство в модели дискретно. Многополосная дорога представляет собой набор клеток на плоскости.

Ширина одной полосы равна одной клетке. При этом ИТС и БАТС занимают одну клетку, а автобус – две. Классическая интерпретация предполагает длину клетки в 7,5 метров и временной шаг в 1 секунду [14]. Таким образом, если $v_{\max} = 5$, можно моделировать диапазон скоростей от 0 до 135 км/ч с шагом в 27 км/ч. Длина автобуса также находится в согласии с принятыми нормами [19]. Топология транспортной сети принимается замкнутой круговой, как это принято в исследованиях задач динамики транспорта [1, 14-26].

1.1. Движение по полосе. Движение ИТС и автобусов подчиняется следующим правилам, которые применяются параллельно ко всем агентам в системе при переходе от одного шага по времени к следующему [22]:

1) ускорение: если $g_i > G$ или $v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(0)}$, тогда:

$$v_i^{(1)} = \min \{v_{\max}, v_i^{(0)} + 1\},$$

где $v_i^{(0)}$ – скорость i -го ТС в начале временного шага, $v_{i+1}^{(0)}$ – скорость следующего ТС по направлению движения на текущей полосе, g_i – расстояние (число незанятых клеток) между этими ТС, G – расстояние синхронизации, а v_{\max} – максимальная скорость ТС.

2) медленный старт (применяется с вероятностью q):

$$v_i^{(2)} = \min \{v_i^{(1)}, x_{i+s_i}(t-1) - x_i(t-1) - s_i\},$$

где $s_i = S$ с вероятностью r и $s_i = 1$ с вероятностью $1 - r$.

3) быстрый старт:

$$v_i^{(3)} = \min \{v_i^{(2)}, x_{i+s_i}(t) - x_i(t) - s_i\},$$

4) случайное торможение (с вероятностью $1 - p_i$):

$$v_i^{(4)} = \max \{1, v_i^{(3)} - 1\},$$

где p_i определяется следующим образом:

$$p_i = \begin{cases} P_1, & \text{если } g_i > G, \\ P_2, & \text{если } v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(0)}, \\ P_3, & \text{если } v_i^{(0)} = v_{i+1}^{(0)}, \\ P_4, & \text{если } v_i^{(0)} > v_{i+1}^{(0)}. \end{cases}$$

5) избегание столкновения:

$$v_i^{(5)} = \min \{v_i, g_i(t) + v_i^{(4)}\}.$$

6) движение вперед:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i^{(5)},$$

где $x_i(t)$ – положение i -го ТС в момент времени t ; начальная скорость на текущем шаге $v_i^{(0)}$ равняется скорости $v_i^{(5)}$ с предыдущего шага:

$$v_i^{(0)}(t) = v_i^{(5)}(t-1) = x_i(t) - x_i(t-1).$$

Для автобусов, которые занимают две клетки, позицией считается клетка, последняя относительно направления движения (рис. 1), тогда:

$$g_i = x_{i+1}^t - x_i^t - l_i,$$

где l_i – длина ТС (в клетках); для автобусов $l_i = 2$.

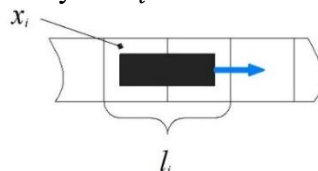


Рис. 1. К определению текущей позиции ТС x_i

В модели имеется 8 свободных параметров ($G, q, r, S, P_1, P_2, P_3, P_4$), значения которых выбраны в соответствии с принятыми нормами [19, 21–23]:

$$G = 15, q = 0.99, r = 0.99, S = 2, P_1 = 0.99, P_2 = 0.99, P_3 = 0.98, P_4 = 0.01.$$

Движение БАТС в полосе подчиняется следующим правилам [21]:

1) адаптивный круиз-контроль (АКК) (в случае, если с движущимся впереди ТС невозможно обмениваться информацией и выстроить кластер, например, управляемое человеком ТС):

– если $v_i^{(0)} = 0$, то:

$$v_i^{(1)} = \begin{cases} v_i^{(0)}, & \text{если } g_i = 0, \\ v_i^{(0)} + 1, & \text{если } g_i \geq 1. \end{cases}$$

– если $v_i^{(0)} \in \{1, 2, \dots, v_{\max} - 1\}$, то:

$$v_i^{(1)} = \begin{cases} v_i^{(0)} - 1, & \text{если } g_i \leq \text{GAP}_1, \\ v_i^{(0)}, & \text{если } \text{GAP}_1 < g_i < \text{GAP}_2, \\ v_i^{(0)} + 1, & \text{если } g_i \geq \text{GAP}_2, \end{cases}$$

где величины GAP_1 и GAP_2 определяются по табл. 1 [21].

Таблица 1. Определение величин GAP_1 и GAP_2

$v_i^{(0)}$	GAP_1	GAP_2	$v_i^{(0)}$	GAP_1	GAP_2
0	-	1	3	6	8
1	0	4	4	8	10
2	4	6	5	-	10

– если $v_i^{(0)} = v_{\max}$, то:

$$v_i^{(1)} = \begin{cases} v_i^{(0)} - 1, & \text{если } g_i \leq \text{gap}_{\max}^{\text{ACC}} = 10, \\ v_i^{(0)}, & \text{если } g_i > \text{gap}_{\max}^{\text{ACC}} = 10. \end{cases}$$

2) избегание столкновения:

$$v_i^{(2)} = \min \{v_i, g_i(t) + v_i^{(1)}\}.$$

3) движение вперед:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i^{(2)}.$$

В случае, если впереди движущееся ТС является также БАТС и с ним возможно образовать кластер посредством обмена информацией, то вместо правила 1 используется следующее правило кооперативного адаптивного круиз-контроля (КАКК):

– если $v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(1)}$, то:

$$v_i^{(1)} = \min \{v_{\max}, v_i^{(0)} + 1\};$$

– если $v_i^{(0)} = v_{i+1}^{(1)}$, то:

$$v_i^{(1)} = \begin{cases} v_{i+1}^{(1)}, & \text{if } g_i = 0, \\ v_{i+1}^{(1)} + 1, & \text{if } g_i \geq 1, \end{cases}$$

– если $(v_i^{(0)} - v_{i+1}^{(1)}) \in \{1, 2, \dots, v_{\max}\}$, то $\text{GAP} \in \{gp_1, \dots, gp_{\max}\}$ и

$$v_i^{(1)} = \begin{cases} v_i^{(0)} - 1, & \text{если } g_i < \text{GAP}, \\ v_i^{(0)}, & \text{если } g_i \geq \text{GAP}. \end{cases}$$

где $gp_1 = 1$, $gp_2 = 3$, $gp_3 = 8$, $gp_4 = 12$ и $gp_5 = gp_{\max} = 17$. Эти значения определяются на основе простой физической оценки относительного тормозного пути двух последовательно идущих транспортных средств.

1.2. Перестроение и автобусные остановки. Осуществлять перестроения между полосами движения могут ИТС и БАТС, автобусы не перестраиваются и всегда движутся по крайней правой полосе. Правила перестроения ИТС основаны на модели Кукиды [23], согласно которой решение о перестроении принимается на основании двух критериев:

- стимулирующий критерий:

$$g_i^{(n,f)} + v_{i+1}^{(n)} > v_i \geq g_i^{(p,f)} + v_{i+1}^{(p)};$$

- критерий безопасности:

$$v_i > v_{i-1}^{(n)} - g_i^{(n,b)}.$$

В случае выполнения обоих критериев, перестроение осуществляется с вероятностью $P_{CL} = 0,5$. Рис. 2 поясняет применение критерия перестроения и введенные обозначения.

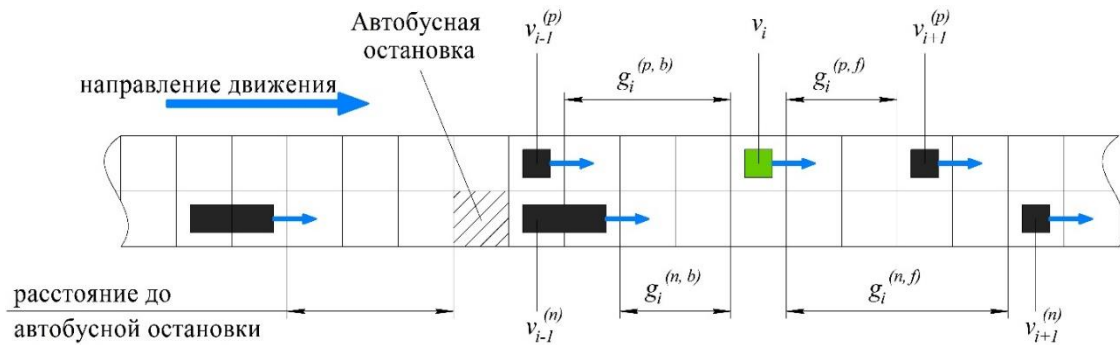


Рис. 2. К пояснению правил перестроения. Индексы относительно рассматриваемого ТС (зеленое): p – текущая полоса, n – соседняя полоса, b – ТС сзади относительно рассматриваемого, f – ТС спереди относительно рассматриваемого

Автобусными остановками являются специально помеченные клетки (см. рис. 2), на которых каждый автобус должен остановиться на τ шагов по времени. Список позиций остановок задается заранее и передается в модель. После истечения τ шагов автобус продолжает движение.

В силу того, что БАТС могут передвигаться в двух режимах АКК/КАКК, стимулирующий критерий для них должен зависеть от текущего режима передвижения и от режима движения в соседней полосе. Поэтому стимулирующий критерий для БАТС состоит из двух этапов [20]:

- стимул к перестроению из текущей полосы:

$$\text{КАКК: } v_i \geq v_{i+1}^{(p)};$$

$$\text{АКК: } v_i + \text{GAP}_2 \geq g_i^{(p,f)} + v_{i+1}^{(p)};$$

- стимул к перестроению в соседнюю полосу:

$$\text{КАКК: } v_{i+1}^{(n)} > v_i;$$

$$\text{АКК: } g_i^{(n,f)} + v_{i+1}^{(n)} > v_i + \text{GAP}_2.$$

Стимулирующий критерий выполняется только при выполнении обоих этапов одновременно.

1.3. Расчет макропараметров. Пусть n – количество клеток в одной полосе; k – количество полос; s – число типов ТС; N_i – количество ТС i -ого типа, l_i – длина ТС i -ого типа, где $i \in [1, s]$. В рассматриваемом случае представлены три вида ТС – ИТС, БАТС и автобусы с длинами 1, 1 и 2 клетки соответственно.

Для замкнутой кольцевой дороги общее число ТС в системе N сохраняется, тогда плотность ТС ρ , их средняя скорость $\langle v \rangle$, а также плотность потока q определяются по формулам:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^s N_i l_i}{nk}; \quad \langle v \rangle = \frac{1}{T_e N} \sum_{t=0}^{T_e-1} \sum_{j=0}^{N-1} v_j(t); \quad q = \frac{1}{T_e nk} \sum_{t=0}^{T_e-1} \sum_{j=0}^{N-1} v_j(t).$$

С учетом разных длин ТС в данном случае под плотностью ТС понимается относительное число занятых клеток.

Средний поток агентов рассчитывается, как:

$$f = \frac{1}{nk} \sum_{i=1}^s M_i \langle v_i \rangle,$$

где $\langle v_i \rangle$ – средняя скорость i -ого типа ТС, а M_i – количество перевозимых этим видом ТС агентов.

Расчет потока выполняется после достижения системой установившегося состояния в течение T_s шагов, после чего снятие показателей и их усреднение выполняется в течение T_e шагов по времени.

2. Социальные дилеммы. Рассматривается гетерогенный транспортный поток, состоящий из ИТС, БАТС и автобусов. С точки зрения классических социальных дилемм в системе присутствуют два класса агентов. Первый класс – кооператоры – придерживается кооперативной стратегии, которая в данном случае сводится к выбору общественного транспорта (автобусов), второй класс – дефекторы – придерживаются эгоистичной стратегии, сводящейся к выбору ИТС или БАТС. При этом число типов агентов в системе равно трем (пассажиры автобусов, ИТС и БАТС). Функцией награды каждого агента является средняя скорость, а социальной функцией f является поток всех агентов в системе [18-21, 26], который характеризует пропускную способность дороги с точки зрения пассажиров. Важно отметить, что агентом является конкретный пассажир или водитель, а не транспортное средство. Мерой социальной дилеммы является величина дефицита социальной функции ΔS [27], представляющего собой нормированную разницу между максимальным значением социальной функции f_{\max} и значением в точке, соответствующей равновесию Нэша f_{NE} :

$$\Delta S = \frac{f_{\max} - f_{NE}}{f_{\max}}.$$

Положительное значение ΔS указывает на наличие социальной дилеммы, значение $\Delta S = 0$ указывает на отсутствие дилеммы. Максимум социальной функции соответствует оптимальному по Парето решению, а равновесие по Нэшу отражает самосогласованное распределение стратегий, при котором ни у одного отдельного агента нет стимула к одностороннему отклонению, даже если коллективный результат не оптимален.

2.1. Параметры модели. Моделируемая система представляет собой круговую трехполосную дорогу с равномерно установленными вдоль нее автобусными остановками. Параметры: $n = 1000$, $k = 3$, $T_e = 2000$, $v_{\max} = 3$, $\tau = 20$, $\Delta = 0,01$, где Δ – среднее число остановок, приходящихся на одну клетку. При этом рассматривается следующий случай: автобусы движутся только по выделенной для них полосе, а у БАТС есть возможность заезжать на эту полосу.

Вместимость автобусов $C_b = 50$ пассажиров, вместимость ИТС и БАТС равна единице. Таким образом, количество дефекторов равно сумме ИТС и БАТС. Количество автобусов N_b выбирается так, чтобы их хватило для перевозки всех пассажиров в текущем сценарии моделирования:

$$N_b = \left[\frac{N_c}{C_b} \right] + 1,$$

где $[a]$ – целая часть числа a .

Для каждого моделируемого случая общее число агентов в системе остается постоянным, варьируется доля кооператоров в общем числе агентов и доля БАТС.

На рис. 3 и 4 представлены фундаментальные диаграммы (зависимость плотности потока ТС q от их плотности ρ), показывающие влияние автобусов и БАТС на поток из ИТС, где $\alpha = N_b/N$ – доля автобусов в общем числе ТС, а R – доля БАТС в числе ТС. Видно, что увеличение доли автобусов приводит к изменению состояния ИТС на фундаментальной диаграмме в сторону снижения потока (рис. 3). В то же время увеличение доли БАТС приводит к увеличению потока (рис. 4).

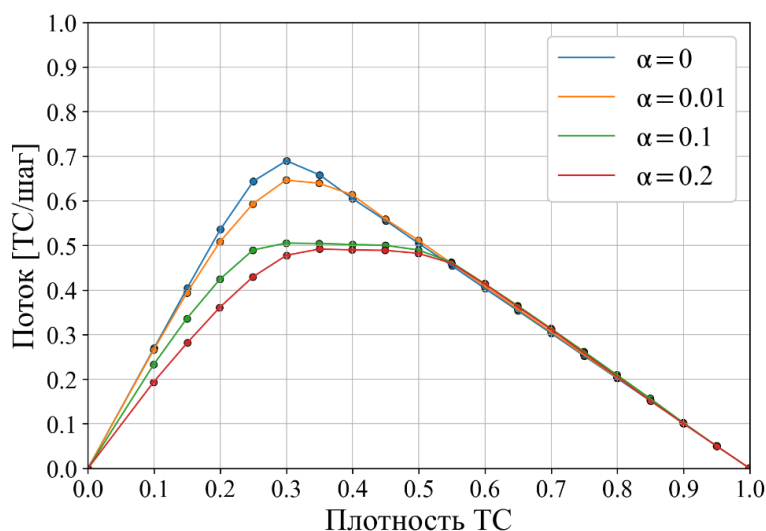


Рис. 3. Фундаментальная диаграмма при различной доле автобусов в потоке ИТС

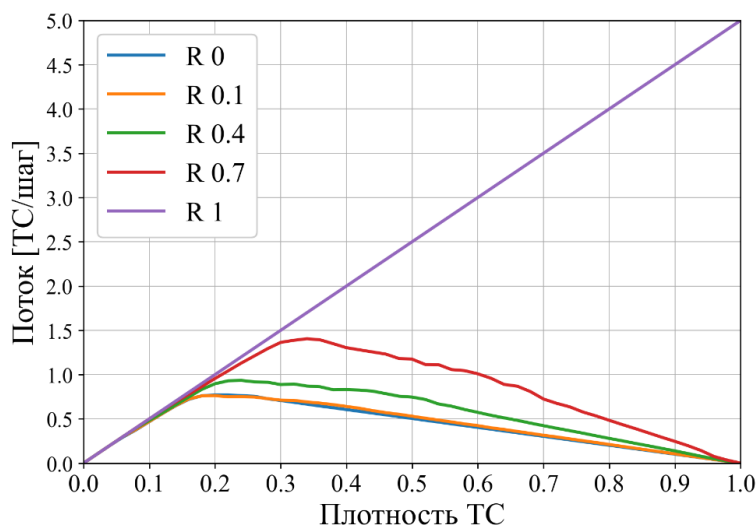


Рис. 4. Фундаментальная диаграмма при различной доле БАТС в потоке ИТС

Плотность ТС ρ_0 , соответствующая нулевой доле кооператоров, называется начальной. С увеличением количества кооператоров увеличивается и количество автобусов, поэтому количество личных транспортных средств и БАТС уменьшается, а, следовательно, реальная плотность ТС падает.

2.2. Анализ результатов. На рис. 5-7 представлены зависимости средних скоростей агентов в автобусах, ИТС и БАТС, а также общего потока агентов f от доли кооператоров в общем числе агентов при разных долях БАТС R для различных начальных плотностей ТС ρ_0 . При наличии выделенной

автобусной полосы максимально возможная начальная плотность составляет 0,66, т. к. личными ТС могут быть загружены только 2 из 3 полос. Отдельно рассмотрен случай, когда изначально на полосе присутствуют автобусы (интерпретируется как перевозка пассажиров, не обладающих ИТС): 20% агентов изначально передвигаются на автобусе, а остальные 60% – на ИТС и могут выбирать между личным, общественным транспортом и БАТС. Начальная плотность такого потока $\rho_0 = 0,608$ (рис. 7).

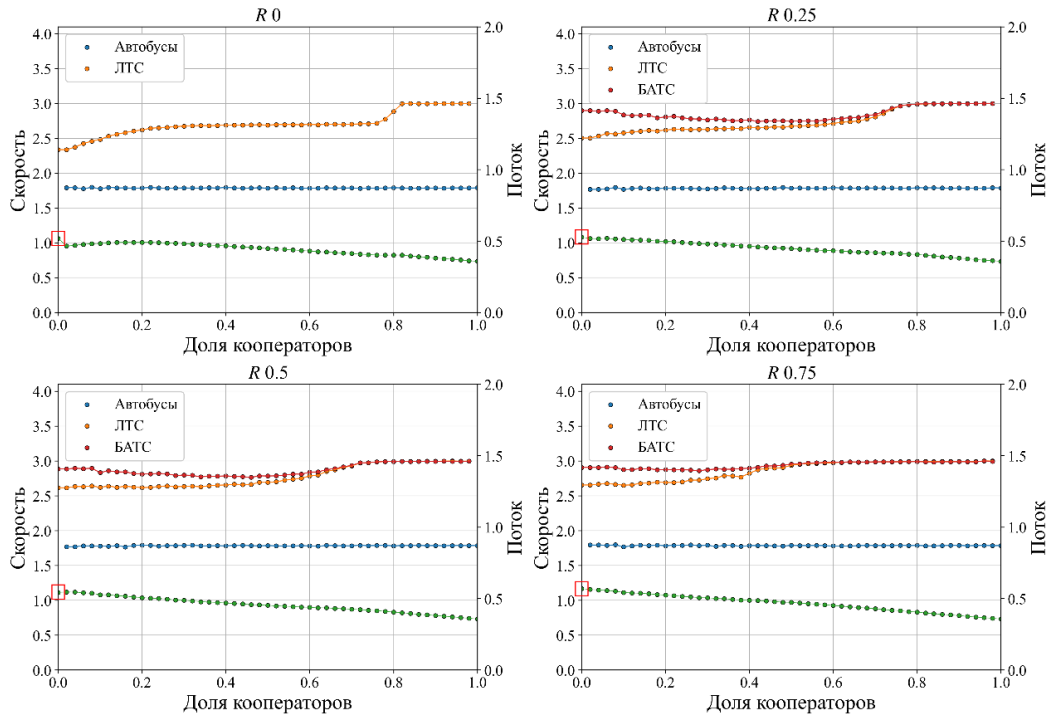


Рис. 5. Зависимость средней скорости для каждого типа агентов и потока всех агентов (зеленый график) от доли кооператоров в общем числе агентов для различных долей БАТС R при $\rho_0 = 0,2$. Красный график – максимум социальной функции

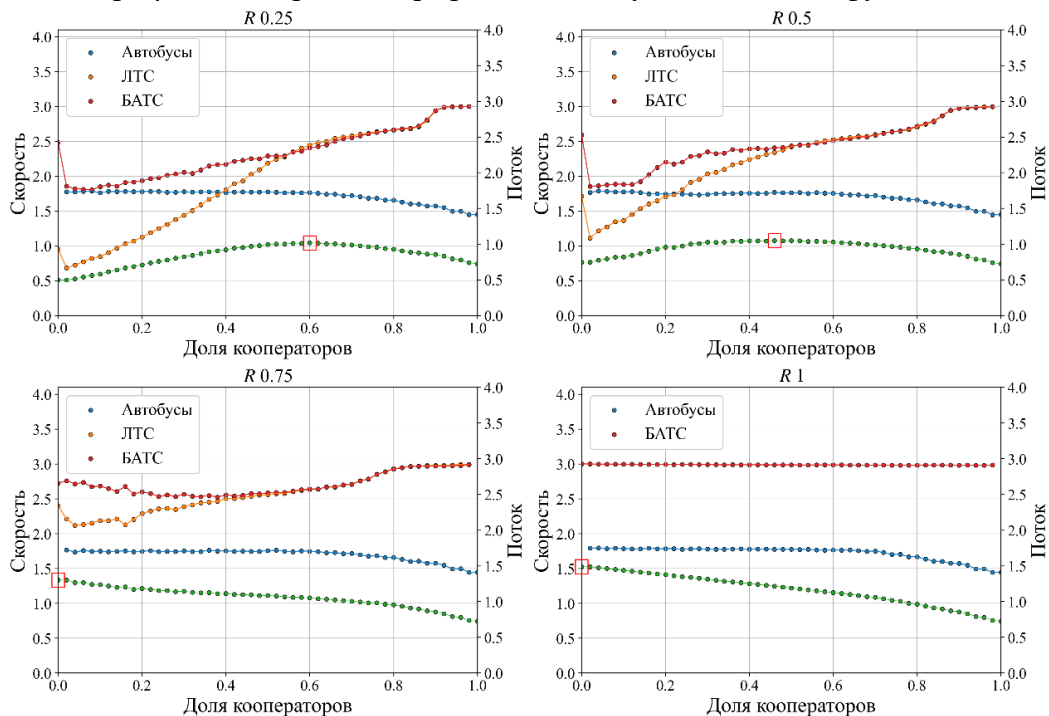


Рис. 6. Зависимость средней скорости для каждого типа агентов и потока всех агентов (зеленый график) от доли кооператоров в общем числе агентов для различных долей БАТС R при $\rho_0=0.5$. Красный квадрат – максимум социальной функции

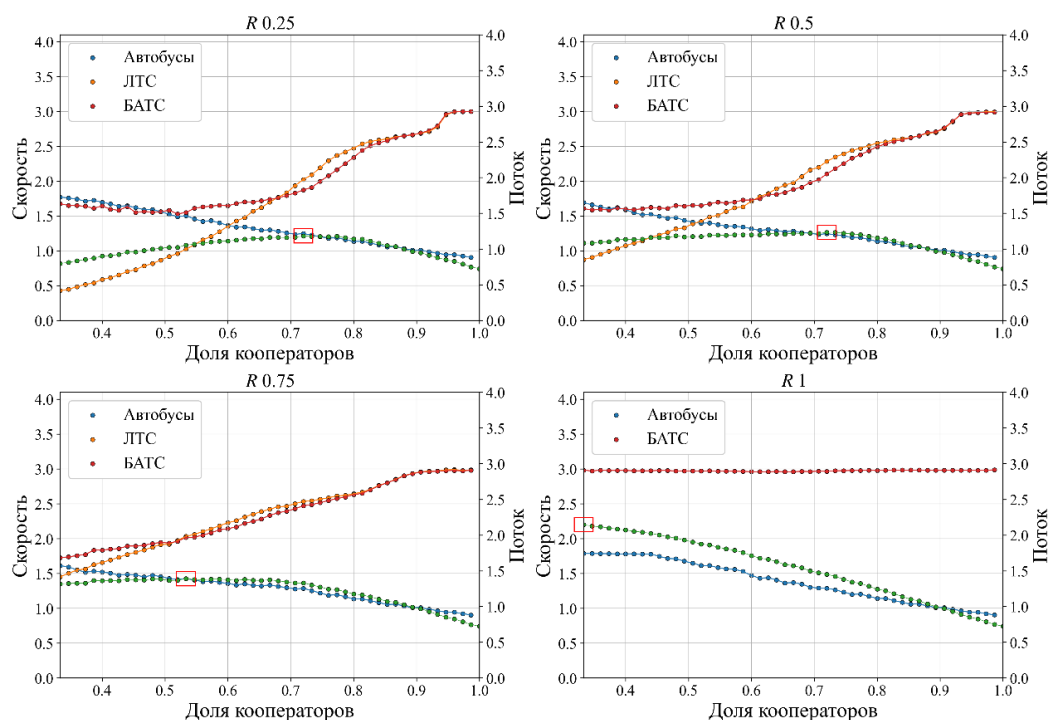


Рис. 7. Зависимость средней скорости для каждого типа агентов и потока всех агентов (зеленый график) от доли кооператоров в общем числе агентов для различных долей БАТС R при $\rho_0=0.608$. Красный квадрат – максимум социальной функции

При небольших начальных плотностях, соответствующих свободному потоку ($\rho_0 = 0,2$), социальная дилемма между общественным и личным транспортом отсутствует в силу того, что максимуму социальной функции соответствует нулевое значение доли кооператоров. При этом БАТС более привлекательны для передвижения, чем ИТС, т. к. используют выделенную полосу, получая преимущество в скорости. В отсутствие автобусов полоса становится выделенной для БАТС, поэтому такой транспортный поток стремится в состояние с долей БАТС 100%. При этом максимуму социальной функции и равновесию Нэша соответствует одно и то же значение доли кооператоров – 0, а значит $\Delta S = 0$ и дилемма отсутствует.

Для средних начальных плотностей ($\rho_0 = 0,5$, рис. 6) между автобусами и БАТС имеет место дилемма заключенного, т. к. средняя скорость автобусов всегда меньше средней скорости БАТС, а значит равновесие Нэша для этой пары ТС будет иметь место при нулевой доле кооператоров. В то же время между ИТС и автобусами возникает другая социальная дилемма: наблюдается точка пересечения значений средних скоростей кооператоров и дефекторов на ИТС. Увеличение доли кооператоров относительно этой точки делает стратегию дефекторов выигрышной, а уменьшение делает выигрышной стратегию кооператоров, поэтому точка пересечения – это равновесие Нэша и т.к. $\Delta S > 0$ имеет место дилемма типа «ястребы и голуби» (англ. *chicken game*). Обе эти дилеммы вырождаются при увеличении доли БАТС. Как и в предыдущем случае, БАТС более привлекательны для передвижения, чем обычные ТС, т. к. занимают выделенную полосу, что хорошо заметно по скачкам скорости на рис. 6 при нулевой доле кооператоров. Таким образом, из любого состояния транспортный поток стремится в равновесное состояние со 100% долей БАТС.

Для случаев, когда на выделенной полосе изначально присутствуют автобусы, имеет место дилемма «ястребы и голуби», как между БАТС и автобусами, так и между автобусами и ИТС. При малых долях кооператоров ИТС проигрывают в скорости остальным видам ТС. В связи с этим у агентов, передвигающихся на ИТС, будет мотивация пересесть на автобус или БАТС. При выборе в пользу автобуса с увеличением доли кооператоров будет достигнуто состояние равновесия между ИТС и автобусами, однако скорость БАТС будет больше.

Поэтому у агентов будет мотивация пересаживаться на БАТС (т. е. доля БАТС будет нарастать, пока не достигнет 100%) – именно такое состояние является равновесным.

Заключение. В работе проведено исследование социальных дилемм, возникающих при совместном движении индивидуальных транспортных средств, автобусов и беспилотных автомобилей в гетерогенном транспортном потоке. Использование модели Revised S-NFS на клеточных автоматах позволило воспроизвести динамику взаимодействия различных типов агентов и выявить ситуации, в которых проявляются конфликты между индивидуальной выгодой и коллективными интересами.

Показано, что при невысоких начальных плотностях транспортного потока социальные дилеммы практически не проявляются, а доминирующей стратегией становится использование индивидуального транспорта или БАТС. С ростом плотности движения формируются дилеммы заключённого и типа «ястребы и голуби» между автобусами и остальными видами транспортных средств. Беспилотные автомобили в силу возможности использовать выделенную полосу и формировать кластеры демонстрируют устойчивое преимущество по средней скорости, благодаря чему с увеличением их доли социальные дилеммы вырождаются, и система стремится к равновесию с полной доминацией БАТС.

Полученные результаты расширяют представления о закономерностях самоорганизации смешанных транспортных потоков и подчёркивают, что внедрение БАТС способно принципиально изменить структуру социальных взаимодействий при выборе вида транспорта. Это открывает возможности для разработки транспортной политики, направленной на баланс интересов различных групп участников движения и стимулирование кооперативного поведения.

Следует отметить ряд ограничений проведённого исследования. Во-первых, модель рассматривала замкнутую трёхполосную дорогу, что упрощает реальные условия городской улично-дорожной сети. Во-вторых, в анализе не учитывались факторы стоимости поездки, времени ожидания, различия в вместимости и комфорте транспортных средств, которые могут существенно влиять на выбор пассажиров. В-третьих, поведение агентов моделировалось в предположении рационального выбора стратегий, тогда как в реальности возможны иррациональные или стохастические решения. Эти допущения ограничивают прямую применимость результатов, однако позволяют выявить фундаментальные закономерности, лежащие в основе возникновения социальных дилемм в транспортных системах.

В дальнейшем целесообразно развивать исследования в двух направлениях: (1) включение дополнительных факторов – различие вместимости и стоимости поездки, приоритетные транспортные средства, динамическое распределение потоков; (2) переход от моделирования замкнутых систем к анализу реальных городских сетей, что позволит уточнить влияние БАТС на функционирование общественного транспорта и поведение пассажиров в условиях городской мобильности.

Благодарности. Исследование выполнено за счет бюджетного финансирования в рамках работ по проведению прикладных научных исследований по государственному заданию от 20.03.2025 № 103-00001-25-02 (шифр 4).

Список источников

1. Быков Н.В. Моделирование кластерного движения беспилотных транспортных средств в гетерогенном транспортном потоке/ Н.В. Быков // Компьютерные исследования и моделирование, 2022. – Т. 14. – № 5. – с. 1041-1058.
2. Wu X., Postorino M.N., Mantecchini L. Impacts of connected autonomous vehicle platoon breakdown on highway. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2024, vol. 650, pp. 130005, DOI: 10.1016/j.physa.2024.130005.
3. Yao Z., Wu Y., Wang Y., et al. Analysis of the impact of maximum platoon size of CAVs on mixed traffic flow: An analytical and simulation method. *Transportation research part C: emerging technologies*, 2023, vol. 147, pp. 103989, DOI: 10.1016/j.trc.2022.103989.

4. Uzzaman A., Islam M., Hossain S. Testing Autonomous vehicles in virtual environments: a review of simulation tools and techniques. *Control systems and optimization letters*, 2025, vol. 3, no. 2, pp. 2985-6116, DOI:10.59247/csol.v3i2.196.
5. Yang Y., Negash N.M., Yang J. Recent advances in interactive driving of autonomous vehicles: comprehensive review of approaches. *Automotive Innovation*, 2025, vol. 8, pp. 304-334, DOI:10.1007/s42154-024-00332-w.
6. Bellomo N., Dogde C. On the modeling of traffic and crowds: a survey of models, speculations, and perspectives. *SIAM Review*. 2011, vol.53, no.3, pp.409-463, DOI:10.1137/090746677.
7. Gu W., Cassidy M. J., Li Y. Models of bus queueing at curbside stops. *Transportation science*, 2015, vol. 49, no. 2, pp. 204-212, DOI:10.1287/trsc.2014.0537.
8. Tang T.Q., Mei C.Q., Huang H.J. A Dynamic model of the two-route traffic flow. *International conference on transportation engineering 2007*, Reston, VA: American society of civil engineers, Jul. 2007, pp. 1843-1848.
9. Tang T. Continuum models for free-ways with two lanes and numerical tests. *Chinese science bulletin.*, 2004, vol. 49, no. 19, p. 2097.
10. Gupta A.K., Katiyar V.K. Analyses of shock waves and jams in traffic flow. *Journal of physics a mathematical and general*, 2005, vol. 38, no. 19, pp. 4069-4083, DOI:10.1088/0305-4470/38/19/002.
11. Arasan V.T., Vedagiri P. Simulating heterogeneous traffic flow on roads with and without bus lanes. *Journal of infrastructure systems*, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 305-312, DOI:10.1061/(ASCE)1076-0342(2009)15:4(305).
12. Yang X., Si B., Huan M. Mixed traffic flow modeling near Chinese bus stops and its applications *Journal of Central South University*, 2012, vol. 19, no. 9, pp. 2697-2704
13. Fernández R. Modelling public transport stops by microscopic simulation. *Transportation research part C emerging technologies*, 2010, vol. 18, no. 6, pp. 856-868, DOI:10.1016/j.trc.2010.02.002.
14. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 1992, v. 2, no. 12, pp. 2221-2229, DOI:10.1051/jp1:1992277.
15. Maerivoet S. De Moor B. Cellular automata models of road traffic. *Physics reports*, 2005, vol. 419, no. 1, pp. 1-64, DOI:10.1016/j.physrep.2005.08.005.
16. Zhang W.-W., Jiang R., Yuan Y.-M., et al. Traffic dynamics in a two-lane mixed traffic system: effect of four lane changing regulations. *International journal of modern physics C*, 2008, vol. 19, no. 11, pp. 1705-1715, DOI:10.1142/S0129183108013230.
17. Zhao X.M., Gao Z.Y., Jia B. The capacity drop caused by the combined effect of the intersection and the bus stop in a CA model. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2007, vol. 385, no. 2, pp. 645-658, DOI:10.1016/j.physa.2007.07.040.
18. Bykov N.V., Kostrov M.A. Social dilemmas in a mixed traffic flow of buses and personal vehicles in transport mode choice. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2024, vol. 647, p. 129873, DOI: 10.1016/j.physa.2024.129873.
19. Tanimoto J. *Evolutionary games with sociophysics: analysis of traffic flow and epidemics*. Springer, 2018, DOI:10.1007/978-981-13-2769-8.
20. Bykov N.V., Kostrov M.A. Lane-changing strategies of autonomous vehicles and social dilemmas in mixed traffic: A simulation study. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2025, vol. 677, 130909, DOI:10.1016/j.physa.2025.130909.
21. Tanimoto J., Futamata M., Tanaka M. Automated vehicle control systems need to solve social dilemmas to be disseminated. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2020, vol. 138, 109861, DOI:10.1016/j.chaos.2020.109861.
22. Kokubo S., Tanimoto J., Hagishima A. A new cellular automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory. *Physica A statistical mechanics and its applications*, 2011, vol. 390, pp. 561-568, DOI:10.1016/j.physa.2010.10.027.
23. Kukida S., Tanimoto J., Hagishima A. Analysis of the influence of lane changing on traffic-flow dynamics based on the cellular automaton model. *International journal of modern physics C*, 2011, vol. 22, no. 03, pp. 271-281, DOI:10.1142/S012918311101621X.
24. Kerner B. *The physics of traffic. Empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
25. Simão R., Wardil L. Social dilemma in traffic with heterogeneous drivers. *Physica A statistical mechanics and its applications*, 2021, vol. 561, pp. 125235, DOI:10.1016/j.physa.2020.125235.
26. Sueyoshi F., Utsumi S., Tanimoto J. Underlying social dilemmas in mixed traffic flow with lane changes. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2022, vol. 155, p. 111790, DOI:10.1016/j.chaos.2022.111790.
27. Arefin M.R., Kabir K.M.A., Jusup M., et al. Social efficiency deficit deciphers social dilemmas. *Scientific Reports*, 2020, v. 10, no. 1, pp. 1-9, DOI:10.1038/s41598-020-72971-y.

Быков Никита Валерьевич. Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика», начальник научно-исследовательского центра «Социофизика транспортных систем» Российского университета транспорта (РУТ-МИИТ), профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Author ID: 620361, SPIN: 8216-

2987, ORCID: 0000-0002-1930-6996, bykov@bmstu.ru. 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 РУТ (МИИТ).

Костров Максим Алексеевич. Аспирант, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Социофизика транспортных систем» кафедры «Физика» РУТ (МИИТ). AuthorID: 1228130, SPIN: 9289-7910, ORCID: 0009-0006-8675-1236, maks.kostrow@yandex.ru. 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 РУТ (МИИТ).

UDC 519.833

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.012

Impact of autonomous vehicles on transport mode choice between personal vehicles and public transport

Nikita V. Bykov^{1,2}, Maksim A. Kostrov^{1,2}

¹Russian University of Transport (RUT-MIIT), Russia, Moscow, bykov@bmstu.ru

²Bauman Moscow state technical university, Russia, Moscow

Abstract. This study examines social dilemmas arising from the introduction of autonomous vehicles (AVs) into a heterogeneous traffic flow that includes human-driven personal vehicles and buses. The analysis employs a traffic flow model based on the Revised S-NFS cellular automaton, which captures the interaction effects among different types of agents. The presence of a social dilemma is identified through the Social Efficiency Deficit, defined as the gap between the Nash equilibrium and the Pareto-optimal distribution of strategies. Several scenarios with varying AV penetration rates and initial traffic densities are considered. The results demonstrate that both the prisoner's dilemma and the hawk-dove game may emerge between buses and other vehicle types, while AVs consistently exhibit a stable speed advantage, leading to the disappearance of social dilemmas once they dominate the flow. These findings enhance the understanding of how AVs affect transport mode choice dynamics and provide a basis for shaping transport policies that account for the conflict between individual and collective interests.

Keywords: automated vehicles, cellular automata, social dilemma, buses, cooperative behavior, game theory, traffic flow

Acknowledgements: This study was funded by the state budget as part of applied research carried out under the State Assignment dated March 20, 2025, No. 103-00001-25-02 (code 4).

References

1. Bykov N.V. Modelirovaniye klasternogo dvizheniya bespilotnykh transportnykh sredstv v geterogennom transportnom potoke [A simulation model of connected automated vehicles platoon dynamics in a heterogeneous traffic flow]. Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye [Computer research and modelling], 2022, vol. 14, no. 5, pp. 1041-1058
2. Wu X., Postorino M.N., Mantecchini L. Impacts of connected autonomous vehicle platoon breakdown on highway. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2024, vol. 650, pp. 130005, DOI: 10.1016/j.physa.2024.130005.
3. Yao Z., Wu Y., Wang Y., et al. Analysis of the impact of maximum platoon size of CAVs on mixed traffic flow: An analytical and simulation method. Transportation research part C: emerging technologies, 2023, vol. 147, pp. 103989, DOI: 10.1016/j.trc.2022.103989.
4. Uzzaman A., Islam M., Hossain S. Testing Autonomous vehicles in virtual environments: a review of simulation tools and techniques. Control systems and optimization letters, 2025, vol. 3, no. 2, pp. 2985-6116, DOI:10.59247/csol.v3i2.196.
5. Yang Y., Negash N.M., Yang J. Recent advances in interactive driving of autonomous vehicles: comprehensive review of approaches. Automotive Innovation, 2025, vol. 8, pp. 304-334, DOI:10.1007/s42154-024-00332-w.
6. Bellomo N., Dogde C. On the modeling of traffic and crowds: a survey of models, speculations, and perspectives. SIAM Review. 2011, vol.53, no.3, pp.409-463, DOI:10.1137/090746677.
7. Gu W., Cassidy M. J., Li Y. Models of bus queueing at curbside stops. Transportation science, 2015, vol. 49, no. 2, pp. 204-212, DOI:10.1287/trsc.2014.0537.

8. Tang T.Q., Mei C.Q., Huang H.J. A Dynamic model of the two-route traffic flow. International conference on transportation engineering 2007, Reston, VA: American society of civil engineers, Jul. 2007, pp. 1843-1848.
9. Tang T. Continuum models for free-ways with two lanes and numerical tests. Chinese science bulletin., 2004, vol. 49, no. 19, p. 2097.
10. Gupta A.K., Katiyar V.K. Analyses of shock waves and jams in traffic flow. Journal of physics a mathematical and general, 2005, vol. 38, no. 19, pp. 4069-4083, DOI:10.1088/0305-4470/38/19/002.
11. Arasan V.T., Vedagiri P. Simulating heterogeneous traffic flow on roads with and without bus lanes. Journal of infrastructure systems, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 305-312, DOI:10.1061/(ASCE)1076-0342(2009)15:4(305).
12. Yang X., Si B., Huan M. Mixed traffic flow modeling near Chinese bus stops and its applications Journal of Central South University, 2012, vol. 19, no. 9, pp. 2697-2704
13. Fernández R. Modelling public transport stops by microscopic simulation. Transportation research part C emerging technologies, 2010, vol. 18, no. 6, pp. 856-868, DOI:10.1016/j.trc.2010.02.002.
14. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. Journal de Physique I, 1992, v. 2, no. 12, pp. 2221-2229, DOI:10.1051/jp1:1992277.
15. Maerivoet S. De Moor B. Cellular automata models of road traffic. Physics reports, 2005, vol. 419, no. 1, pp. 1-64, DOI:10.1016/j.physrep.2005.08.005.
16. Zhang W.-W., Jiang R., Yuan Y.-M., et al. Traffic dynamics in a two-lane mixed traffic system: effect of four lane changing regulations. International journal of modern physics C, 2008, vol. 19, no. 11, pp. 1705-1715, DOI:10.1142/S0129183108013230.
17. Zhao X.M., Gao Z.Y., Jia B. The capacity drop caused by the combined effect of the intersection and the bus stop in a CA model. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2007, vol. 385, no. 2, pp. 645-658, DOI:10.1016/j.physa.2007.07.040.
18. Bykov N.V., Kostrov M.A. Social dilemmas in a mixed traffic flow of buses and personal vehicles in transport mode choice. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2024, vol. 647, p. 129873, DOI: 10.1016/j.physa.2024.129873.
19. Tanimoto J. Evolutionary games with sociophysics: analysis of traffic flow and epidemics. Springer, 2018, DOI:10.1007/978-981-13-2769-8.
20. Bykov N.V., Kostrov M.A. Lane-changing strategies of autonomous vehicles and social dilemmas in mixed traffic: A simulation study. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2025, vol. 677, 130909, DOI:10.1016/j.physa.2025.130909.
21. Tanimoto J., Futamata M., Tanaka M. Automated vehicle control systems need to solve social dilemmas to be disseminated. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, vol. 138, 109861, DOI:10.1016/j.chaos.2020.109861.
22. Kokubo S., Tanimoto J., Hagishima A. A new cellular automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory. Physica A statistical mechanics and its applications, 2011, vol. 390, pp. 561-568, DOI:10.1016/j.physa.2010.10.027.
23. Kukida S., Tanimoto J., Hagishima A. Analysis of the influence of lane changing on traffic-flow dynamics based on the cellular automaton model. International journal of modern physics C, 2011, vol. 22, no. 03, pp. 271-281, DOI:10.1142/S012918311101621X.
24. Kerner B. The physics of traffic. Empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
25. Simão R., Wardil L. Social dilemma in traffic with heterogeneous drivers. Physica A statistical mechanics and its applications, 2021, vol. 561, pp. 125235, DOI:10.1016/j.physa.2020.125235.
26. Sueyoshi F., Utsumi S., Tanimoto J. Underlying social dilemmas in mixed traffic flow with lane changes. Chaos, Solitons & Fractals, 2022, vol. 155, p. 111790, DOI:10.1016/j.chaos.2022.111790.
27. Arefin M.R., Kabir K.M.A., Jusup M., et al. Social efficiency deficit deciphers social dilemmas. Scientific Reports, 2020, v. 10, no. 1, pp. 1-9, DOI:10.1038/s41598-020-72971-y.

Bykov Nikita Valerevich. D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Physics and Director of the Research Center "Sociophysics of Transport Systems" at the Russian University of Transport (RUT-MIIT); Professor at Bauman Moscow State Technical University. Author ID: 620361, SPIN: 8216-2987, ORCID: 0000-0002-1930-6996, bykov@bmstu.ru. Russian University of Transport (RUT-MIIT), 127994, Moscow, Russia.

Kostrov Maksim Alekseevich. PhD student, Junior Researcher at the Sociophysics of Transport Systems Research Center of the Physics Department of Russian University of Transport (RUT-MIIT). AuthorID: 1228130, SPIN: 9289-7910, ORCID: 0009-0006-8675-1236, maks.kostrow@yandex.ru. Russian University of Transport (RUT-MIIT), 127994, Moscow, Russia.

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 27.10.2025.

The article was submitted 07/28/2025; approved after reviewing 09/17/2025; accepted for publication 10/27/2025.