УДК 519.833.2

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО ВЫЯВЛЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ДИЛЕММ В ГЕТЕРОГЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКАХ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ЛИЧНОГО И ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Быков Н.В., Костров М.А. (Москва)

Введение

Увеличение пропускной способности существующей дорожной сети за счет расширения или строительства новых дорог в большинстве случаев невозможно из-за плотной городской застройки. Снизить загруженность дорожной сети можно за счет внедрения общественного транспорта [1]. Современный подход к развитию и улучшению дорожной сети предполагает проведение исследований транспортных потоков с использованием математических и компьютерных моделей. Модели могут использоваться в интеллектуальных транспортных системах [2]. Среди существующих моделей транспортных потоков выделяют модели макро- и микроуровня. Модели макроуровня относительно просты, поэтому они, как правило, используются для изучения гомогенных потоков [3]. Модели микроуровня описывают движение отдельных ТС, поэтому их используют при моделировании гетерогенных транспортных потоков [4]. Модели на основе клеточных автоматов (КА) [5] являются одним из важных инструментов для моделирования и теоретического изучения крупномасштабных транспортных систем среди моделей микроуровня. Базовая модель транспортного потока на КА была предложена Нагелем и Шрекенбергом (NaSch) [6].

Внедрение автобусов должно сопровождаться проработкой маршрутов их следования и оценкой их привлекательности для потенциальных пассажиров. Главным критерием качества существующего или разрабатываемого автобусного маршрута является его доступность [7], характеризующаяся географическим охватом маршрута и расстоянием между его остановками. Слишком большое расстояние между остановками снижает их пешую доступность. Однако, доступности маршрута недостаточно для повышения привлекательности общественного транспорта. При выборе между общественным и личным транспортом предпочтение будет отдаваться тому виду транспорта, время поездки на котором займет меньше времени (средняя скорость движения которого будет выше).

В связи с этим интересно проанализировать процесс внедрения автобусов в транспортный поток с точки зрения теории игр. Теория игр позволяет выявлять социальные дилеммы в транспортном потоке [8]. Социальная дилемма представляет собой ситуацию, при которой члены группы из N агентов (где $N \geq 2$) выбирают между максимизацией собственных и коллективных интересов. Агенты, максимизирующие собственные интересы называются дефекторами, а максимизирующие коллективные интересы – кооператорами. Примером социальной дилеммы в транспортном потоке может быть стремление водителей максимизировать собственную среднюю скорость за счет постоянного обгона других транспортных средств [9] или выбор стратегии движения беспилотных транспортных средств (ТС) [10].

В настоящей работе исследуются социальные дилеммы, возникающие при внедрении автобусов в транспортный поток, состоящий из личных транспортных средств (ЛТС). Особенность исследования: в качестве агентов рассматриваются пассажиры, а не ТС и переменная плотность ТС в системе.

1. Модель гетерогенного транспортного потока

Рассматривается замкнутая (периодическое граничное условие) многополосная дорога (рис. 1). Поток состоит из двух типов ТС: автобусов и личных ТС.

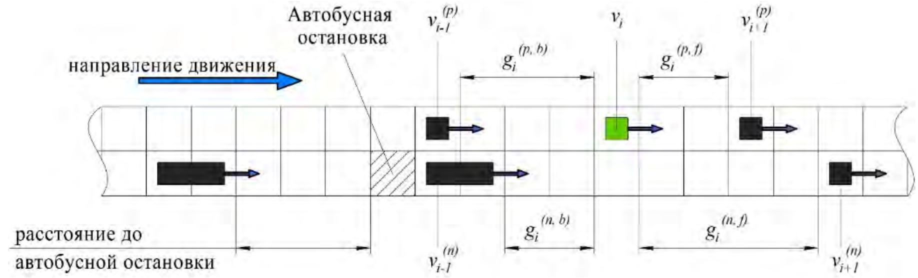

Рис. 1. Топология модели двухполосной дороги с периодическим граничным условием и автобусными остановками

Движение ТС по каждой полосе дороги описывается на основе модели Нагеля и Шрекенберга (NaSch) [6]. Модель NaSch является простой, поэтому подходит для качественных исследований, не требующих точных числовых значений. В классической интерпретации этой модели одна клетка имеет длину порядка 7,5 м, шаг по времени соответствует 1 секунде, что позволяет моделировать дискретный набор скоростей от 0 до 135 км/ч с шагом 27 км/ч. В таком случае максимальная скорость в модели – 5 клеток за шаг ($v_{\max}$), минимальная – 0. В общем случае ТС может занимать одну или несколько клеток.

Переход на следующий дискретный шаг по времени определяется последовательностью правил, каждое из которых применяется синхронно для всех ТС:

1) ускорение:

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

где i – индекс ТС; $v_i^{(0)}$ – скорость ТС в начале шага по времени; g_i – расстояние (число пустых клеток) до впереди едущего ТС;

2) эффект случайного торможения:

$$v_i^{(2)} = \begin{cases} v_i^{(1)}, \text{if } \mathrm{rand}[0,1] > p, \\ \max\left(0, v_i^{(1)} - 1\right), \text{otherwise}; \end{cases}$$

где p – вероятность случайного торможения; rand[0,1] – случайное действительное число, равномерно распределенное на отрезке [0, 1];

3) обновление позиции:

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

где x_i^t – положение i-го ТС на шаге по времени с номером t. Для ТС, которые занимают более одной клетки, позицией считается последняя относительно направления движения клетка, занимаемая ТС (рис. 2). Тогда расстояние до следующего ТС определяется по формуле:

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

где l_i – длина ТС (в клетках).

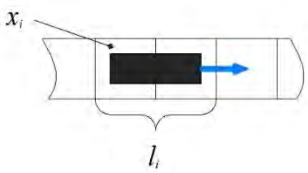

Рис. 2. К определению текущей позиции ТС x_i

Автобусными остановками являются специально помеченные клетки (см. рис. 1), 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.

После завершения применения правил модели Нагеля-Шрекенберга для движения в полосе, осуществляется перестроение между полосами. Перестраиваться могут только личные ТС, автобусы всегда движутся по крайней правой полосе. Для перестроения между полосами используется правило, состоящее из двух критериев [11]:

- стимулирующего критерия, с помощью которого принимается решение о том, является ли выгодным перестроение при текущей ситуации:

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

- критерия безопасности, на основе которого принимается решение о том, безопасно ли перестроение:

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

где $v_i^{(p)}$ – скорость перестраивающегося ТС, $v_{i+1}^{(p)}$ – скорость ТС, едущего впереди в текущей полосе, $v_{i+1}^{(n)}$и $v_{i-1}^{(n)}$ – скорости ТС, едущих по соседней полосе впереди и сзади соответственно (относительно перестраивающегося); $g_i^{(p,f)}$ – расстояние до ТС, едущего впереди по текущей полосе, $g_i^{(n.f)}$ и $g_i^{(n,b)}$ – расстояния до ТС, едущих по соседней полосе впереди и сзади (относительно перестраивающегося ТС) (см. рис. 1).

Если ТС имеет возможность перестроиться как в левую, так и в правую полосу, то предпочтение отдается левой полосе (в соответствии с действующими ПДД РФ). При выполнения всех критериев ТС перестраивается с вероятностью P.

В случае, если на одну и ту же позицию в полосе пытаются перестроиться два ТС (из левой и правой полос), приоритет в перестроении отдается ТС из правой полосы (в соответствии с действующими ПДД РФ).

Количество клеток на одной полосе обозначим как N, количество полос – K. Расчет потока производится после достижения системой установившегося состояния в течение $T_s = 10N$ шагов, после чего снятие показателей и их усреднение производится в течение T_e шагов по времени.

В силу периодических граничных условий число ТС в системе сохраняется, поэтому плотность ТС не зависит от времени:

$$\rho = \frac{M_b l_b + M_p l_p}{NK},$$

где M_b и M_p – полное число автобусов и личных ТС соответственно, а l_b и l_p – их длины (в клетках). В рассматриваемой модели $l_b = 2$, $l_p = 1$. С учетом разных длин ТС в данном случае под плотностью ТС понимается относительное число занятых клеток.

Средняя скорость всех ТС за T_e шагов по времени:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T_e\left(M_b + M_p\right)} \sum_{t=T_s}^{T_s+T_e-1} \sum_{i=0}^{M_b+M_{p-1}} v_i(t).$$

Плотность потока, с учетом (1) и (2), рассчитывается по выражению:

$$q = \rho\langle v\rangle = \frac{M_b l_b + M_p l_p}{T_e N K (M_b + M_p)} \sum_{t=T_s}^{T_s+T_e-1} \sum_{i=0}^{M_b+M_{p-1}} v_i(t).$$

2. Характеристики однородного автобусного потока

Рассмотрим влияние плотности расположения остановок Δ, т. е. среднего числа остановок, приходящихся на одну клетку, и продолжительности остановки автобусов τ на их среднюю скорость ‹*v*›. Остановки располагаются равномерно вдоль дороги на полосе движения автобуса. Параметры модели: $N = 1000$, $K = 1$, $T_e = 2000$, $v_{\max} = 3$, $p = 0{,}5$. ТС – только автобусы. Максимальное значение Δ ограничивается 0,1 остановкой на клетку, что соответствует шагу между остановками в 10 клеток или приблизительно 75 м.

Результаты моделирования с различными плотностями остановок и автобусов представлены на рис. 3.

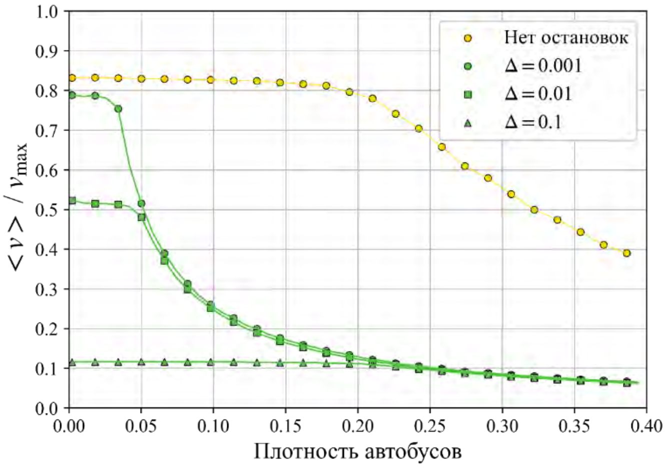

Рис. 3. Зависимость отношения средней скорости автобусов к максимальной от их плотности и плотности расположения остановок для τ = 20

Во всех случаях средняя скорость остается постоянной до некоторого значения плотности ρ_c, зависящего от Δ, что соответствует фазе свободного потока [6]. Дальнейшее увеличение плотности автобусов приводит к снижению средней скорости, что соответствует фазе уплотненного потока. Значение плотности, при котором происходи фазовый переход от свободного потока к уплотненному, называется критическим ρ_c.

Увеличение плотности остановок приводит к уменьшению значения средней скорости в свободном потоке и увеличению ρ_c.

3. Социальные дилеммы в гетерогенном транспортном потоке

Рассмотрим гетерогенный транспортный поток, состоящий из личных ТС и автобусов. В системе присутствует два вида агентов. Первый тип агентов, называемый кооператорами, предпочитает общественный транспорт. Второй тип агентов, называемый дефекторами, – предпочитает личный транспорт. Общее число агентов в системе для заданной симуляции остается постоянным, варьируется доля кооператоров в общем числе агентов.

Моделируемая система представляет собой двухполосную дорогу с равномерно установленными вдоль нее остановками. Параметры: $N = 1000$, $K = 2$, $T_e = 2000$, $v_{\max} = 3$,

$p = 0{,}5$, $P = 0{,}8$, $\tau = 20$, $\Delta = 0{,}014$. ТС – легковые автомобили, перевозящие одного дефектора и автобусы вместимостью 80 кооператоров.

Для определения влияния автобусов на транспортный поток необходимо построить фундаментальную диаграмму (рис. 4) для потока из личных ТС. Фазовый переход от свободного транспортного потока к плотному происходит при значении плотности ρ = 0,15 ТС на клетку. Исследование проводится при различных параметрах системы в четырёх случаях, в каждом из которых в начальный момент времени на дороге присутствуют только личные ТС и их количество соответствует числу дефекторов:

1) влияние автобусов на свободный поток ρ = 0,05 (100 агентов),
2) влияние автобусов на поток при критической плотности ρ = 0,15 (300 агентов),
3) влияние автобусов на уплотненный поток при ρ = 0,5 (1000 агентов),
4) влияние автобусов на уплотненный поток при ρ = 0,8 (1600 агентов).

В каждом случае постепенно часть дефекторов становится кооператорами (количество личных ТС снижается). При этом количество автобусов, наоборот, возрастает. Их количество рассчитывается так, чтобы они могли перевезти всех имеющихся кооператоров.

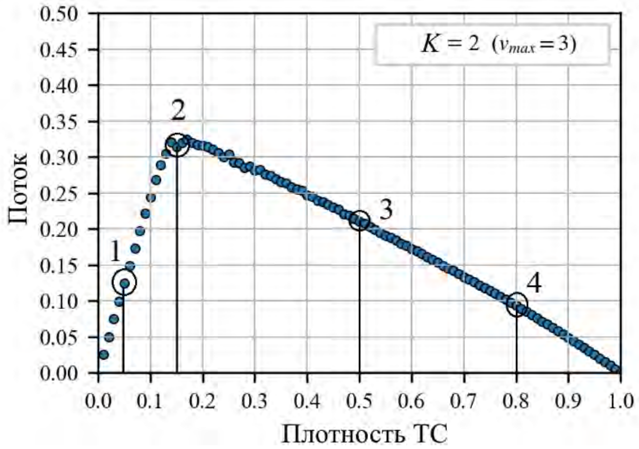

Рис. 4. Фундаментальная диаграмма без автобусов

В результате моделирования получены зависимости средних скоростей кооператоров и дефекторов, а также потока агентов от доли кооператоров в общем числе агентов (рис. 5 – исходные параметры системы, рис. 6 – вместимость автобусов изменена на 40 кооператоров). Поток агентов характеризует пропускную способность дороги, учитывая вместимость каждого типа ТС. Примем поток агентов за социальную функцию, а средние скорости по каждому типу агентов за функции вознаграждения каждого агента. На рисунках черными квадратами обозначены равновесия по Нэшу (РН), а фиолетовыми окружностями – максимумы социальной функции (П). Во всех рассмотренных случаях средняя скорость кооператоров всегда меньше средней скорости дефекторов, а значит равновесие по Нэшу будет при 0 доли кооператоров, что соответствует PD (англ. Prisoner's dilemma) [8].

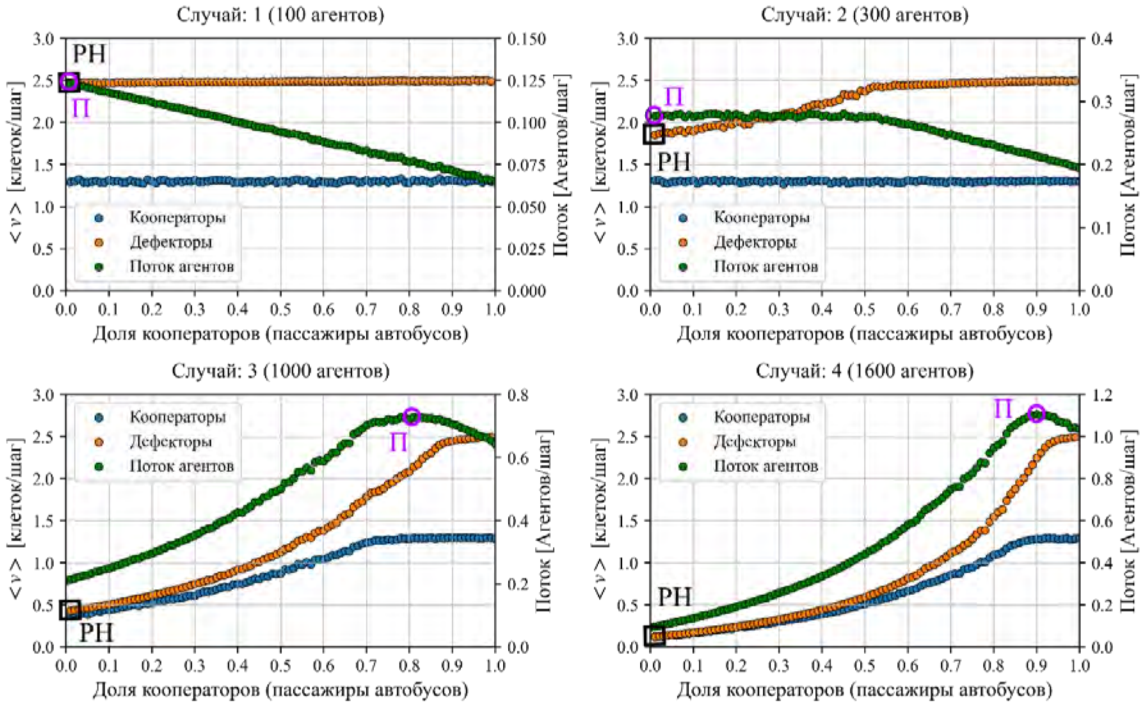

Рис. 5. Зависимость средней скорости по каждому типу агентов и потока всех агентов от доли кооператоров в общем числе агентов при различном общем числе агентов.

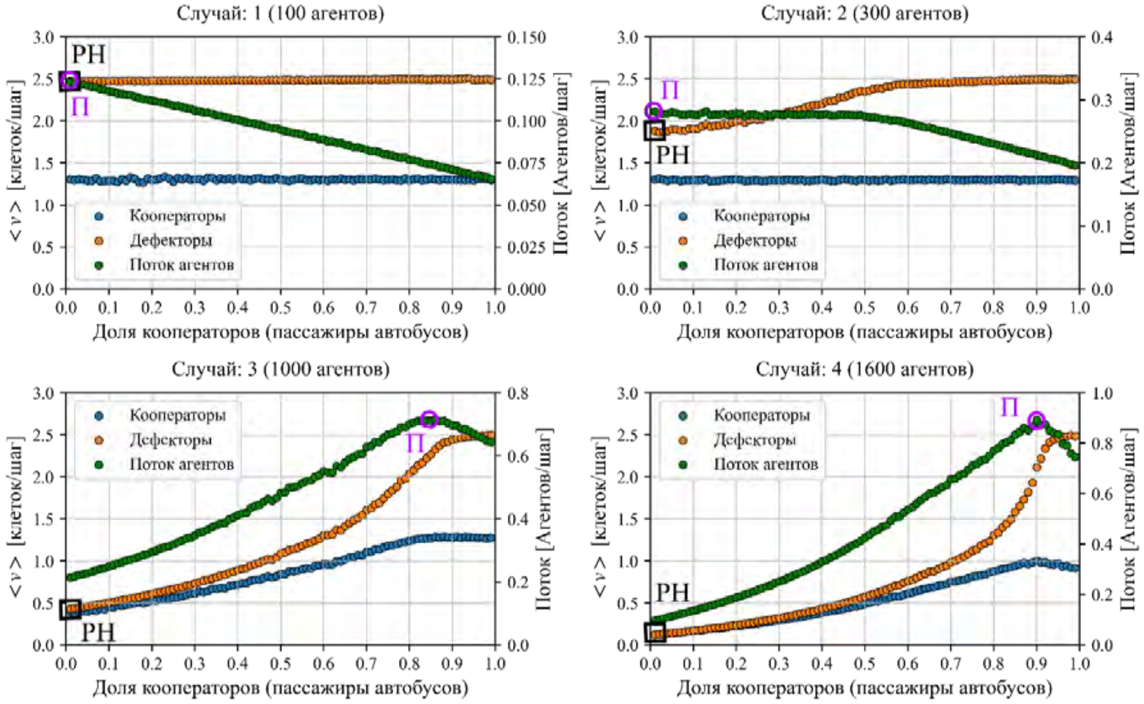

Рис. 6. Зависимость средней скорости по каждому типу агентов и потока всех агентов от доли кооператоров в общем числе агентов при различном общем числе агентов для автобусов вместимостью 40 пассажиров.

Однако, во всех случаях 1 и 2 социальная дилемма отсутствует, т.к. равновесию по Нэшу и максимуму социальной функции соответствует одно и тоже значение доли кооператоров. Поэтому внедрение автобусов в свободный поток не имеет смысла, а внедрение в уплотненный поток должно осуществляться способами, дающими преимущество в скорости автобусов перед ЛТС.

Рассмотрим двухполюсную дорогу с выделенной автобусной полосой (исходные параметры остаются неизменными). Результаты моделирования представлены на рис. 7. Случаи 3 и 4 соответствует уплотненному потоку. В случае 4 на полосу для ЛТС может поместиться не больше 1000 дефекторов, поэтому предполагается, что 600 кооператоров изначально находится в автобусах. В приведенных случаях наблюдается точка пересечения значений средних скоростей кооператоров и дефекторов. Увеличение доли кооператоров относительно точки делает стратегию дефектора выигрышной, а уменьшение делает выигрышной стратегию кооператора, поэтому точка пересечения – это равновесие по Нэшу (РН), что соответствует n-Chicken game [8].

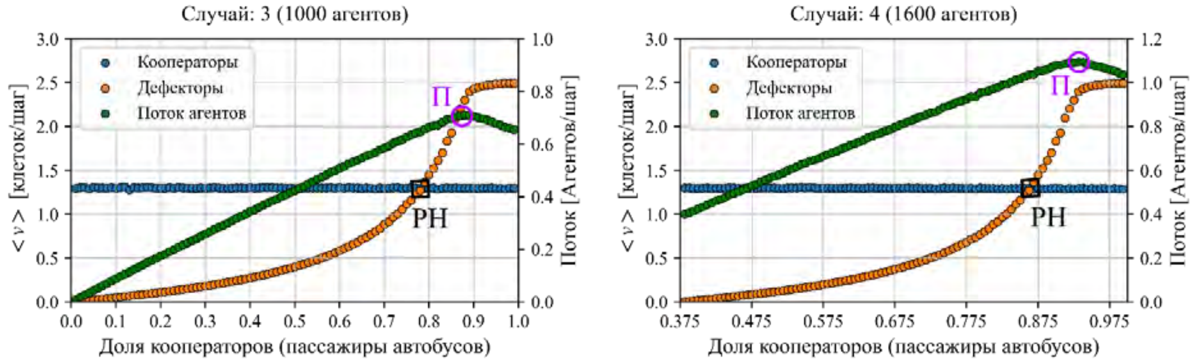

Рис. 7. Зависимость средней скорости по каждому типу агентов и потока всех агентов от доли кооператоров в общем числе агентов при различном общем числе агентов для дороги с выделенной автобусной полосой.

В рассмотренных случаях присутствует социальная дилемма, т.к. равновесие по Нэшу не совпадает с максимумом социальной функции. Во всех случаях с выделенной полосой автобусы движутся в свободно потоке, поэтому их скорость не изменятся.

Выводы

Представленный подход к анализу гетерогенного транспортного потока с применением теории игр позволил выявить социальные дилеммы, возникшие при внедрении автобусов в поток из ЛТС и оценить целесообразность такого внедрения.

Внедрение автобусов в поток из личных ТС не всегда оказывается целесообразным. Внедрять автобусы стоит только в потоки, находящиеся в уплотненной фазе. При внедрении автобусам необходимо давать преимущество в скорости передвижения перед ЛТС – это стимулирует агентов выбирать кооперативную стратегию поведения. Выделенная полоса для автобусов может дать такое преимущество и, как было показано в исследовании, способна на порядок увеличить пропускную способность дороги, но не устраняет социальную дилемму, а лишь меняет ее тип.

Работа Н.В. Быкова выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-21-00711).

Литература

1. **Aftabuzzaman M., Currie G., Sarvi M.** Evaluating the Congestion Relief Impacts of Public Transport in Monetary Terms // J. Public Transp. Elsevier. – 2010. – Vol. 13, № 1. – P. 1–24.

2. **Tanimoto J., An X.** Improvement of traffic flux with introduction of a new lane-change protocol supported by Intelligent Traffic System // Chaos, Solitons & Fractals. Pergamon. – 2019. – Vol. 122. – P. 1–5.
3. **Gu W., Cassidy M.J., Li Y.** Models of Bus Queueing at Curbside Stops // Transp. Sci. – 2015. – Vol. 49, № 2. – P. 204–212.
4. **Yang X., Si B., Huan M.** Mixed traffic flow modeling near Chinese bus stops and its applications // J. Cent. South Univ. – 2012. – Vol. 19, № 9. – P. 2697–2704.
5. **Zhao X. mei, Gao Z. you, Jia B.** The capacity drop caused by the combined effect of the intersection and the bus stop in a CA model // Phys. A Stat. Mech. its Appl. – 2007. – Vol. 385, № 2. – P. 645–658.
6. **Nagel K., Schreckenberg M.** A cellular automaton model for freeway traffic // J. Phys. I. – 1992. – Vol. 2, № 12. – P. 2221–2229.
7. **Murray A.T., Wu X.** Accessibility tradeoffs in public transit planning // J. Geogr. Syst. – 2003. – Vol. 5, № 1. – P. 93–107.
8. **Tanimoto J.** Evolutionary Games with Sociophysics. – Singapore: Springer Singapore, 2018. – Vol. 17.
9. **Sueyoshi F., Utsumi S., Tanimoto J.** Underlying social dilemmas in mixed traffic flow with lane changes // Chaos, Solitons & Fractals. Pergamon. – 2022. – Vol. 155. – P. 111790.
10. **Tanimoto J., Futamata M., Tanaka M.** Automated vehicle control systems need to solve social dilemmas to be disseminated // Chaos, Solitons & Fractals. Pergamon. – 2020. – Vol. 138. – P. 109861.
11. **Kukida S., Tanimoto S., Tanimoto J., Hagishama A.** Analysis of the Influence of lane changing on traffic flow dynamics based on the cellular automata model // Int. J. Mod. Phys. C. – 2011. – Vol. 22, № 03. – P. 271–281.