

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДИТЕЛЯ И ПЕШЕХОДА НА ПЕРЕКРЕСТКЕ В УСЛОВИЯХ НАРУШЕНИЯ ПДД

Н.Н. Паринов ¹, Д.В. Лихачев ², А.Ю. Артемов ³, Е.В. Чирков ⁴
^{1,2,3} Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия,
⁴ Ассоциация «Совет муниципальных образований Воронежской области»
² lihachev_dv@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу исследований по моделированию поведения водителей в системе «водитель-автомобиль-дорога-среда». Рассматривается эволюция подходов, включая модели на основе симуляторов и клеточных автоматов. Особое внимание уделено проблеме моделирования конфликтов с пешеходами, нарушающими ПДД. В качестве перспективного решения для повышения пропускной способности перекрестков предлагается использование моделей клеточных автоматов.

Ключевые слова: моделирование поведения водителей, система «водитель-автомобиль-дорога-среда» (ВАДС), смешанный транспортный поток, конфликтные ситуации на перекрестках, клеточные автоматы, безопасность дорожного движения, пешеходы.

CELLULAR AUTOMATA MODEL OF DRIVER-PEDESTRIAN INTERACTION AT INTERSECTIONS UNDER TRAFFIC RULE VIOLATIONS

N.N. Parinov ¹, D.V. Likhachev ², A. Yu. Artemov ³, E. V. Chirkov ⁴
^{1,2,3} Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia,
⁴ Association «Council of Municipalities of the Voronezh Region»
² lihachev_dv@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the analysis of research on modeling driver behavior within the «driver-car-road-environment» system. The evolution of approaches, including models based on simulators and cellular automata, is considered. Special attention is paid to the problem of modeling conflicts with pedestrians violating traffic rules. The use of cellular automata models is proposed as a promising solution for increasing intersection capacity.

Keywords: driver behavior modeling, driver-car-road-environment system (DCRE), mixed traffic flow, conflict situations at intersections, cellular automata, road safety, pedestrians.

В наш век быстрорастущей автомобилизации, в научных сообществах стала интересна тема поведение водителей при взаимодействии его с другими элементами системы водитель-автомобиль-дорога-среда (ВАДС). Данный интерес связан с тем, что поведение водителя стало одним из основных элементов в системе обеспечения безопасности на дорогах. Одним из направлений данных исследований является моделирование поведения водителя в различных ситуациях на дорогах. Уже в 1985 году Abishai исследовал поведение водителей на нерегулируемых городских перекрестках [1]. В своей работе он изучал, отличаются ли знаки «Стоп» от знаков «Уступи дорогу» с точки зрения частоты аварий и действительно ли усиление мер контроля движения всегда

способствует безопасности на всех опасных перекрестках. Позже, в 2005 году, Bonsalli соавторы, а также Bjorklund и Aberg исследовали поведение водителей на перекрестках и аспекты, связанные с безопасностью дорожного движения [2, 3].

В своих работах Bonsall [2] определили важнейшие параметры в моделях имитационного моделирования, и указали на факт преимущества использования в моделях реалистичных, но в многом небезопасных значений перед использованием безопасных, но нереалистичных параметров. Bjorklund и Aberg [3] в своих работах брали для изучения перекрестки с различными схемами организации дорожного движения, но несколько, и показали что то поведение водителей которое описывается при создании модели будет различно. В научной литературе в последние десять – пятнадцать лет стали чаще появляться работы посвященные моделям «обычного поведения» водителей [4, 5, 6, 7, 8, 9], симуляторам вождения в различных условиях [10, 11, 12, 13], конфликтам с пешеходами [14], а также к исследованию «агрессивного» вождения водителей [15, 16, 17].

Например, в работах Yan и Radwan [4] изучено поведение водителей на регулируемых пересечениях, в условиях ограниченной видимости. В своих работах они разработали модели линейной и логистической регрессии для оценки параметров принятия решения о проезде регулируемого перекрестка. В результате использования данных моделей был сделан вывод о влиянии ограниченной видимости, а конкретно увеличению «критического» промежутка и соответственно самого времени следования, особенно интересно данное исследование полученными данными по водителям, которые совершают левый поворот при наличии конфликтного прямого потока и ограниченной видимости.

Методы, основанные на использовании симуляторов вождения, также все чаще применяются для изучения поведения водителей. Мюрер и Фоллрат [10] сосредоточились на изучении причин ошибок водителей в контексте столкновений сзади в условиях симуляции вождения. Riccardo и соавторы [11] предложили сравнительный анализ моделей случайной полезности и моделей на основе нечеткой логики для описания поведения при выборе зазоров на основе данных симуляторов вождения. В 2015 году Matsumoto and Peng [13] предложили метод получения информации о состоянии транспортного средства и сигналах светофоров для принятия решения о проезде регулируемых перекрестков, используя 3D симулятор вождения. Они выяснили, что предложенная информация эффективна для снижения выбросов CO₂. Хабибович и соавторы [14] для более глубокого понимания причин возникновения критических ситуаций проанализировали видеозаписи инцидентов с участием автомобилей и пешеходов, зафиксированные камерами в автомобилях. Они выявили два основных типа причин: водители часто не замечают пешеходов, создающих конфликт, а пешеходы ведут себя неожиданно.

Исследования агрессивного и раздраженного поведения водителей описали в своих работах Kaysi and Abbany [15]. Они изучили поведение водителей на нерегулируемых перекрестках с приоритетом движения и смогли создать модель поведения водителя с «агрессивным стилем вождения». Из этих работ можно сделать вывод, что возраст водителя, мощность автомобиля и средняя скорость являются ключевыми факторами «агрессивного вождения».

В последнее время модели поведения водителей на основе клеточных автоматов [18, 19, 20] изучаются более детально. Ху и соавторы [19] использовали типичную модель клеточного автомата KKW (Kerner-Klenov-Wolf) для исследования механизма формирования незаконного перестроения для немоторизованных транспортных средств. Чен и соавторы [20] предложили модель клеточного автомата для описания движения в смешанных условиях.

Смешанные условия движения являются очень распространённым явлением в городских транспортных системах, особенно это видно в развивающихся странах, где уровень автомобилизации растет высокими темпами.

Поведение автомобилей в условиях смешанного трафика гораздо сложнее, чем в однородных транспортных потоках. Традиционные модели следования за автомобилем учитывают только потоки, состоящие из моторизованных транспортных средств одного типа. В 1974 году Wiedemann [21] предложил использовать пороговое значение поведения для различения различных режимов следования и разработал на его основе модель порогового поведения. Эта модель до сих пор считается одной из наиболее точных для использования в компьютерных симуляциях дорожного движения. Модель следования за автомобилем, реализованная в программном обеспечении VISSIM для микроскопического моделирования транспортных потоков, также основана на модели Wiedemann [21, 22]. Для однородного потока транспортных средств VISSIM успешно воспроизводит реальные условия движения. Но стоит отметить, что как раз в условиях смешанного потока данная модель может выдавать не всегда верные и адекватные результаты.

Как мы видим научные изыскания, которые связаны с поведением водителя в условиях системы ВАДС сфокусированы на потоке транспортных средств создаваемого одним средством или рассматривают смешанный транспортный поток, но не покрывают все факторы рассмотренные выше одновременно. Например, нет разработанной модели рассматривающих конфликт, возникающий между автомобилем и пешеходом, конкретно возникающий из-за нарушений пешехода правил дорожного движения (ПДД). С точки зрения системы обеспечивающей повышение пропускной способности перекрестков вопрос моделирования конфликта водителя, совершающего поворот налево и пешехода, который нарушает ПДД является актуальным. Одним из вариантов получения такой модели является использование моделей клеточных автоматов. Клеточные автоматы — это дискретные модели, в которых пространство (дорога или перекресток) разделено на ячейки, каждая из которых может находиться в одном из нескольких состояний. В случае моделирования транспортных потоков, состояния могут описывать, занята ли ячейка транспортным средством, пешеходом или свободна. Время в таких моделях также дискретно, и на каждом шаге вычисляются изменения состояния в зависимости от правил, описывающих поведение участников движения.

Модели на основе клеточных автоматов (СА-модели) часто применяются для моделирования транспортных потоков, включая конфликтные ситуации между водителями и пешеходами, особенно на перекрестках. В частности, они хорошо подходят для анализа сложных взаимодействий в условиях смешанного движения, где одновременно присутствуют моторизованные и немоторизованные участники дорожного движения, такие как пешеходы и велосипедисты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Abishai, «Поведение водителей и учет аварий на нерегулируемых городских перекрестках», Accident Analysis & Prevention, т. 17, № 1, с. 25–32, 1985.
2. P. Bonsall, R. Liu, and W. Young, «Моделирование поведения водителей, связанного с безопасностью — влияние параметров», Transportation Research Part A: Policy and Practice, т. 39, № 5, с. 425–444, 2005.
3. G. M. Bjorklund и L. Åberg, «Поведение водителей на перекрестках: формальные и неформальные правила дорожного движения», Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, т. 8, № 3, с. 239–253, 2005.

4. X. Yan и E. Radwan, «Влияние ограниченных расстояний видимости на поведение водителей при незащищенном повороте налево на регулируемых перекрестках», *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, т. 10, № 4, с. 330–344, 2007.
5. J. Zhang, K. Suto, и A. Fujiwara, «Эффекты информационного предупреждения водителей о замедлении и ускорении вблизи аркообразного перекрестка», *Accident Analysis & Prevention*, т. 41, № 5, с. 948–958, 2009.
6. T. Limanond, P. Prabjabok и K. Tiprayawong, «Исследование воздействия таймеров обратного отсчета на операции движения и поведение водителей на регулируемом перекрестке в Бангкоке», *Transport Policy*, т. 17, № 6, с. 420–427, 2010.
7. M. Elhenawy, A. Jahangiri, H. A. Rakha и I. El-Shawarby, «Моделирование поведения водителей при остановке или продолжении движения при включении желтого сигнала с учетом тенденции водителей к продолжению движения и условий дорожного покрытия», *Accident Analysis and Prevention*, т. 83, с. 90–100, 2015.
8. H. Bar-Gera, O. Musicant, E. Schechtman и T. Ze'evi, «Количественная оценка поведения водителей на желтый сигнал на основе естественных данных с цифровых камер контроля», *Accident Analysis & Prevention*, 2015.
9. D. Lin, W. Ma, L. Li и Y. Wang, «Модель движущей силы для поведения водителей при пересечении с неприоритетными действиями на правых поворотах», *Transportation Research Part B: Methodological*, т. 83, с. 230–244, 2016.
10. E. Muhrer и M. Vollrath, «Ожидания при следовании за другим автомобилем — последствия для поведения водителей в имитированной задаче вождения», *Accident Analysis and Prevention*, т. 42, № 6, с. 2158–2164, 2010.
11. R. Riccardo, G. Massimiliano, G. Gregorio и M. Claudio, «Сравнительный анализ моделей случайной полезности и моделей нечеткой логики для описания поведения водителей при принятии решения о разрыве на основе данных экспериментов с симулятором вождения», *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, т. 54, с. 834–844, 2012.
12. F. Rosey и J.-M. Auberlet, «Конфигурация симулятора вождения влияет на поведение водителей и их контроль: пример исследований сельского перекрестка», *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, т. 27, с. 99–111, 2014.
13. Y. Matsumoto и G. Peng, «Анализ поведения водителей с информацией о пересечении регулируемого перекрестка с помощью симулятора вождения», *Transportation Research Procedia*, т. 10, с. 103–112, 2015.
14. A. Habibovic, E. Tivesten, N. Uchida, J. Bargman и M. L. Aust, «Поведение водителей при инцидентах с пешеходами: применение метода анализа надежности и ошибок вождения (DREAM)», *Accident Analysis & Prevention*, т. 50, с. 554–565, 2013.
15. I. A. Kaysi и A. S. Abbany, «Моделирование агрессивного поведения водителей на нерегулируемых перекрестках», *Accident Analysis & Prevention*, т. 39, № 4, с. 671–678, 2007.
16. S. H. Hamdar, H. S. Mahmassani и R. B. Chen, «Индекс агрессивности для оценки поведения водителей на регулируемых перекрестках», *Accident Analysis and Prevention*, т. 40, № 1, с. 315–326, 2008.
17. M. Danaf, M. Abou-Zeid и I. Kaysi, «Моделирование агрессии и агрессивного поведения водителей в динамической модели выбора с латентными переменными», *Accident Analysis & Prevention*, т. 75, с. 105–118, 2015.
18. C.-K. Chen, J. Li и D. Zhang, «Исследование поведения при эвакуации на Т-образном перекрестке с помощью модели клеточных автоматов, управляемой силой», *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, т. 391, № 7, с. 2408–2420, 2012.
19. X. Hu, W. Wang и H. Yang, «Модель смешанного потока движения с учетом нелегального изменения полосы: симуляции в рамках трехфазной теории Кернера», *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, т. 391, № 21, с. 5102–5111, 2012.
20. G. Chen, F. Meng, G. Fu, M. Deng и L. Li, «Модель клеточных автоматов для смешанного потока движения», *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, т. 96, с. 1412–1419, 2013.
21. R. Wiedemann, *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, т. 8 из серии Schriftenreihe Heft, Институт транспорта, Университет Карлсруэ, Карлсруэ, Германия, 1974.
22. R. Wiedemann, «Моделирование элементов транспортной информации на многополосных дорогах», в *Drive Conference*, т. 2, Брюссель, Бельгия, 1991.

REFERENCES

1. P. Abishai, «Поведение водителей и учет аварий на нерегулируемых городских перекрестках», *Accident Analysis & Prevention*, т. 17, № 1, с. 25–32, 1985.
2. P. Bonsall, R. Liu, and W. Young, «Моделирование поведения водителей, связанного с безопасностью — влияние параметров», *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, т. 39, № 5, с. 425–444, 2005.
3. G. M. Bjorklund и L. Åberg, «Поведение водителей на перекрестках: формальные и неформальные правила дорожного движения», *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, т. 8, № 3, с. 239–253, 2005.
4. X. Yan и E. Radwan, «Влияние ограниченных расстояний видимости на поведение водителей при незащищенном повороте налево на регулируемых перекрестках», *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, т. 10, № 4, с. 330–344, 2007.
5. J. Zhang, K. Suto, и A. Fujiwara, «Эффекты информационного предупреждения водителей о замедлении и ускорении вблизи аркообразного перекрестка», *Accident Analysis & Prevention*, т. 41, № 5, с. 948–958, 2009.
6. T. Limanond, P. Prabjabok и K. Tiprayawong, «Исследование воздействия таймеров обратного отсчета на операции движения и поведение водителей на регулируемом перекрестке в Бангкоке», *Transport Policy*, т. 17, № 6, с. 420–427, 2010.
7. M. Elhenawy, A. Jahangiri, H. A. Rakha и I. El-Shawarby, «Моделирование поведения водителей при остановке или продолжении движения при включении желтого сигнала с учетом тенденции водителей к продолжению движения и условий дорожного покрытия», *Accident Analysis and Prevention*, т. 83, с. 90–100, 2015.
8. H. Bar-Gera, O. Musicant, E. Schechtman и T. Ze'evi, «Количественная оценка поведения водителей на желтый сигнал на основе естественных данных с цифровых камер контроля», *Accident Analysis & Prevention*, 2015.
9. D. Lin, W. Ma, L. Li и Y. Wang, «Модель движущей силы для поведения водителей при пересечении с неприоритетными действиями на правых поворотах», *Transportation Research Part B: Methodological*, т. 83, с. 230–244, 2016.
10. E. Muhrer и M. Vollrath, «Ожидания при следовании за другим автомобилем — последствия для поведения водителей в имитированной задаче вождения», *Accident Analysis and Prevention*, т. 42, № 6, с. 2158–2164, 2010.
11. R. Riccardo, G. Massimiliano, G. Gregorio и M. Claudio, «Сравнительный анализ моделей случайной полезности и моделей нечеткой логики для описания поведения водителей при принятии решения о разрыве на основе данных экспериментов с симулятором вождения», *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, т. 54, с. 834–844, 2012.
12. F. Rosey и J.-M. Auberlet, «Конфигурация симулятора вождения влияет на поведение водителей и их контроль: пример исследований сельского перекрестка», *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, т. 27, с. 99–111, 2014.
13. Y. Matsumoto и G. Peng, «Анализ поведения водителей с информацией о пересечении регулируемого перекрестка с помощью симулятора вождения», *Transportation Research Procedia*, т. 10, с. 103–112, 2015.
14. A. Habibovic, E. Tivesten, N. Uchida, J. Bargman и M. L. Aust, «Поведение водителей при инцидентах с пешеходами: применение метода анализа надежности и ошибок вождения (DREAM)», *Accident Analysis & Prevention*, т. 50, с. 554–565, 2013.
15. I. A. Kaysi и A. S. Abbany, «Моделирование агрессивного поведения водителей на нерегулируемых перекрестках», *Accident Analysis & Prevention*, т. 39, № 4, с. 671–678, 2007.
16. S. H. Hamdar, H. S. Mahmassani и R. B. Chen, «Индекс агрессивности для оценки поведения водителей на регулируемых перекрестках», *Accident Analysis and Prevention*, т. 40, № 1, с. 315–326, 2008.
17. M. Danaf, M. Abou-Zeid и I. Kaysi, «Моделирование агрессии и агрессивного поведения водителей в динамической модели выбора с латентными переменными», *Accident Analysis & Prevention*, т. 75, с. 105–118, 2015.

18. С.-К. Chen, J. Li и D. Zhang, «Исследование поведения при эвакуации на Т-образном перекрестке с помощью модели клеточных автоматов, управляемой силой», *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, т. 391, № 7, с. 2408–2420, 2012.
19. X. Hu, W. Wang и H. Yang, «Модель смешанного потока движения с учетом нелегального изменения полосы: симуляции в рамках трехфазной теории Кернера», *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, т. 391, № 21, с. 5102–5111, 2012.
20. G. Chen, F. Meng, G. Fu, M. Deng и L. Li, «Модель клеточных автоматов для смешанного потока движения», *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, т. 96, с. 1412–1419, 2013.
21. R. Wiedemann, *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, т. 8 из серии *Schriftenreihe Heft*, Институт транспорта, Университет Карлсруэ, Карлсруэ, Германия, 1974.
22. R. Wiedemann, «Моделирование элементов транспортной информации на многополосных дорогах», в *Drive Conference*, т. 2, Брюссель, Бельгия, 1991.