

*На правах рукописи*



**Кленов Сергей Львович**

**СТОХАСТИЧЕСКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО  
ПОТОКА В РАМКАХ ТЕОРИИ ТРЕХ ФАЗ**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Официальные оппоненты: Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий теоретическим  
отделом, Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН  
Киселев Алексей Борисович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, кафедра газовой и волновой  
динамики мехмата МГУ им. М.В. Ломоносова  
Таташев Александр Геннадьевич,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, кафедра «Высшая математика»  
МАДИ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт автоматизации  
проектирования Российской академии наук

Защита состоится 23 мая 2019г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д002.024.03, созданного на базе ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и на сайте <http://keldysh.ru/council/3/>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.-м.н.



Корнилина М. А.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы исследования.**

Появление заторов в транспортных потоках на автодорогах является повседневным фактором жизни для многих автомобилистов в любой промышленно развитой стране. По этой причине, одна из целей исследований в области транспорта и транспортных потоков заключается в том, чтобы обеспечить понимание природы появления дорожных заторов, что может быть использовано для эффективного регулирования и управления транспортными потоками, организации движения, оптимального распределения трафика по сети и для других интеллектуальных транспортных систем (ИТС), которые должны повысить безопасности движения и обеспечить качественную мобильность.

Чтобы показать, что интеллектуальные транспортные системы могут эффективно использоваться для решения транспортных проблем, надежность таких систем должна быть прежде всего доказана в численных экспериментах. Это связано с тем, что разработка реальных интеллектуальных транспортных технологий сопряжена с большими материальными затратами, поэтому предварительный анализ их эффективного использования в численных экспериментах является необходимым. Следовательно, должны быть разработаны надежные модели для моделирования транспортных потоков. Такие модели должны быть способны воспроизводить результаты эмпирических наблюдений пространственно-временных свойств транспортного потока, в частности, переход к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге (“бутылочного горлышка”) и дальнейшее развитие дорожного затора.

Эмпирические наблюдения показывают, что транспортные заторы обнаруживают экстремально сложные пространственно-временные свойства. Такими пространственно-временными свойствами заторов в транспортном потоке являются следующие: (1) большое разнообразие пространственно-временных структур плотного транспортного потока, измеренных около узкого места на автодороге; (2) сложная эволюция этих структур плотного транспортного потока во времени и пространстве, которая происходит,

когда изменяются величины потоков и/или характеристики узкого места; (3) сложные пространственно-временные явления, связанные со структурами плотного транспортного потока, возникающего вблизи двух или более примыкающих друг к другу узких мест на автодороге; (4) трансформация между различными структурами плотного транспортного потока, которая происходит из-за фазовых переходов между различными фазами транспортного потока; (5) различные микроскопические характеристики плотного транспортного потока, связанные со сложным поведением водителей внутри плотного транспортного потока; (6) сложная нерегулярная динамика широких движущихся кластеров в плотном транспортном потоке, которая возникает вблизи сильно перегруженного узкого места на автодороге.

В эмпирических исследованиях транспортных потоков дорожный затор обычно возникает в результате перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге.

Пользователи транспортных сетей ожидают, что с помощью применения методов управления транспортными потоками, оптимального распределения трафика по сети, кооперативного движения и других интеллектуальных транспортных технологий переход к плотному транспортному потоку может быть предотвращен. В самом деле, транспортные заторы, возникающие в результате перехода к плотному транспортному потоку, вызывают значительное увеличение времени в пути, эмиссии CO<sub>2</sub> и других транспортных расходов. По этой причине, любая теория транспортных потоков, применяемая при разработке автоматических машин, надежных методов динамического распределения и управления транспортными потоками, должна быть совместима с эмпирическими свойствами перехода к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге.

Наиболее важным эмпирическим свойством перехода к плотному транспортному потоку является метастабильная природа такого перехода, обнаруженная в реальных эмпирических данных. Термин *метастабильная природа* означает, что такой переход происходит в метастабильном свободном транспортном потоке. В свободном потоке существует много возмущений скорости (плотности, величины потока). Такие возмущения могут иметь различную амплитуду. Когда случайным образом возникает возму-

щение, амплитуда которого превышает критическую амплитуду, происходит переход к плотному транспортному потоку. Напротив, если амплитуда возмущения меньше, чем критическая, возмущение затухает, и переход к плотному транспортному потоку не происходит. Метастабильная природа перехода к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге может рассматриваться как эмпирическое основание науки о транспорте. Чтобы объяснить метастабильную природу перехода к плотному транспортному потоку, Кернер ввел теорию трех фаз.

Однако теория трех фаз Кернера является качественной теорией, которая состоит из системы гипотез. В диссертации разработаны математические стохастические модели транспортного потока в рамках теории трех фаз Кернера. Показано, что эти модели могут воспроизвести все известные к настоящему времени эмпирические пространственно-временные характеристики перехода к плотному потоку и возникающего транспортного затора. Эти модели применяются для численных экспериментов по моделированию различных интеллектуальных транспортных систем.

### **Цели и задачи диссертационной работы.**

1. Разработка стохастических математических моделей транспортных потоков в рамках теории трех фаз.
2. Разработка вероятностной модели перехода от свободного к плотному транспортному потоку.
3. Разработка алгоритмов и комплекса программ для моделирования пространственно-временных структур транспортного потока.
4. Разработка алгоритмов и комплекса программ для моделирования интеллектуальных транспортных технологий.
5. Проведение вычислительных экспериментов по моделированию пространственно-временных структур транспортного потока и интеллектуальных транспортных технологий на основе разработанного комплекса программ.

### **Методы исследования.**

Транспортный поток – это сложный стохастический пространственно-временной процесс. По этой причине, чтобы изучить поведение транспортного потока и найти его характеристики, необходимо математическое мо-

делирование.

Модели транспортного потока, используемые для моделирования, должны показывать динамику транспортного потока, наблюдаемую в реальных данных измерений. В частности, модели должны воспроизводить эмпирическую метастабильную природу фазового перехода от свободного к плотному транспортному потоку ( $F \rightarrow S$  переход) вблизи узких мест на автодорогах. Ранние классические теории и модели транспортного потока не могли объяснить и смоделировать эмпирическую метастабильную природу фазового перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узких мест на автодорогах. Эмпирическая метастабильная природа фазового перехода от свободного к плотному транспортному потоку была впервые объяснена в теории трех фаз Кернера. Теория трех фаз Кернера является качественной теорией, которая состоит из системы гипотез. Соответственно, математические модели транспортного потока, которые претендуют на то, чтобы моделировать эмпирическую метастабильную природу фазового перехода к плотному транспортному потоку ( $F \rightarrow S$  переход) вблизи узких мест на автодорогах, должны быть моделями в рамках теории трех фаз, т.е. трехфазными моделями транспортного потока.

Поскольку реальный транспортный поток является стохастическим процессом, происходящим в пространстве и времени, в диссертации были разработаны *стохастические* трехфазные модели транспортного потока.

Чтобы разработать микроскопические стохастические трехфазные модели транспортного потока, которые могут воспроизводить эмпирическую метастабильную природу фазового перехода к плотному транспортному потоку ( $F \rightarrow S$  переход) вблизи узких мест на автодорогах, а также другие эмпирические свойства транспортного потока, были использованы как математические методы статистической физики, так и математическое моделирование сложных процессов. В частности, было доказано, что разработанные в диссертации микроскопическая стохастическая трехфазная модель транспортного потока и трехфазная модель клеточных автоматов удовлетворяют условиям для Марковских процессов. Более того, было показано, что численные решения моделей не являются чувствительными к выбору параметров модели. Модели были также проверены на большом

количестве эмпирических данных. Эмпирические данные были изучены с помощью современных методов статистического анализа данных.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Впервые разработаны стохастические математические модели транспортных потоков, описывающие эмпирический фазовый переход от свободного к плотному транспортному потоку.
- 2) На основе разработанных моделей найдены свойства и диаграмма сложных пространственно-временных структур в транспортном потоке, которые описывают всю совокупность этих структур, наблюдаемых в измерениях транспортного потока.
- 3) Разработан алгоритм для моделирования стохастического поведения водителей в различных ситуациях, возникающих в транспортном потоке. Алгоритм позволяет моделировать случайные ускорение и замедление машины со случайными задержками во времени.
- 4) Разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий.
- 5) На основе разработанного комплекса программ проведены вычислительные эксперименты, которые позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий:
  - (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок,
  - (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами,
  - (iii) сложного гетерогенного транспортного потока,
  - (iv) предупреждения водителей о пробках,
  - (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

### **Научная новизна работы.**

Впервые разработаны стохастические математические модели транспортных потоков, описывающие эмпирический фазовый переход от свободного к плотному транспортному потоку.

Впервые на основе разработанных моделей найдены свойства сложных пространственно-временных структур в плотном транспортном потоке и диаграмма этих структур, которые описывают всю известную совокупность пространственно-временных структур, наблюдаемых в реальных данных измерений транспортного потока.

В рамках теории трех фаз впервые разработан алгоритм для моделирования стохастического поведения водителей в различных ситуациях, возникающих в транспортном потоке. Алгоритм позволяет моделировать случайные ускорение и замедление машины со случайными задержками во времени.

В рамках теории трех фаз впервые проведены вычислительные эксперименты, которые позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий: (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, (iii) сложного гетерогенного транспортного потока, (iv) предупреждения водителей о пробках, (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

**Теоретическая ценность** работы заключается в том, что впервые разработаны стохастические математические модели транспортных потоков, описывающие эмпирический фазовый переход от свободного к плотному транспортному потоку. На основе разработанных моделей найдены свойства сложных пространственно-временных структур в плотном транспортном потоке и диаграмма этих структур, которые описывают всю известную совокупность пространственно-временных структур, наблюдаемых в реальных данных измерений транспортного потока. Разработан алгоритм для моделирования стохастического поведения водителей в различных ситуациях, возникающих в транспортном потоке. Алгоритм позволяет моделировать случайные ускорение и замедление машины со случайными за-



держками во времени.

**Практическую ценность** представляют разработанные алгоритмы и комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий. На основе разработанного комплекса программ проведены вычислительные эксперименты, которые позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий: (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, (iii) сложного гетерогенного транспортного потока, (iv) предупреждения водителей о пробках, (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

Кроме того, результаты диссертации и, в частности, комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий были использованы в компании Даймлер для проведения численных экспериментов по следующим интеллектуальным транспортным технологиям: (1) для управления потоком машин, въезжающих на скоростную автодорогу, (2) для управления скоростным режимом, (3) для распределения трафика по транспортной сети, (4) для потребления топлива в транспортных сетях, (5) для оценки системы адаптивного круиз-контроля.

#### **Достоверность результатов.**

Разработанные модели и комплексы программ надежно и тщательно верифицированы на широком круге задач. В частности, надежность результатов диссертации доказана в численных экспериментах по (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, (iii) сложного гетерогенного транспортного потока, (iv) предупреждения водителей о пробках, (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре. Кроме того, надежность результатов диссертации была подтверждена в компании Даймлер.

#### **Основные публикации.**

По теме диссертации опубликовано 38 работ [1–38] в научных изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов докторских диссертаций, в том числе входящих в реферативные базы Scopus

и Springer. Полный список публикаций по теме диссертации приводится в конце автореферата.

### **Личный вклад автора.**

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Во всех проведенных исследованиях автор принимал участие в постановке задач, разработке методов их решения и анализе результатов. Микроскопические трехфазные модели транспортного потока и исследования с использованием этих моделей проведены совместно с B.S. Kerner. Трехфазная модель клеточных автоматов была разработана совместно с B.S. Kerner, D. Wolf и M. Schreckenberg. Исследования эмпирических данных и численное моделирование интеллектуальных транспортных технологий были выполнены совместно с B.S. Kerner, H. Rehborn, M. Koller, J. Palmer, S. Kaufmann, P. Hemmerle, G. Hermanns, M. Schreckenberg, M. Leibel, S.-E. Molzahn. Модели интеллектуальных транспортных технологий были сделаны совместно с B.S. Kerner, H. Rehborn, A. Brakemeier, R.P. Schäfer, J. Palmer, S. Lorkowski, N. Witte. Построение численных методов решения уравнений для всех моделей, а также все расчеты, результаты которых представлены в диссертации, выполнено автором лично.

### **Апробация работы.**

Результаты, входящие в данную диссертационную работу, были представлены в докладах на конференциях:

1. Kerner B.S., Klenov S.L. Comparison of congested pattern features at different freeway bottlenecks // Traffic and Granular Flow '03. Delft, Netherlands, October 2003.

2. Kerner B.S., Klenov S.L., Wolf D.E. Congestion due to merging roads: Predictions of three-phase traffic theory // Traffic and Granular Flow '03. Delft, Netherlands, October 2003.

3. Demir C., Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Rehborn H., Aleksic M., Reigber T., Schwab M., Haug A. FCD for urban areas: Method and analysis of practical applications // ITS World Congress. Madrid, Spain, August 2003.

4. Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Rehborn H., Haug A., Aleksic M. Comparison of ASDA/FOTO application for tracking of spatiotemporal congested patterns on freeways // ITS World Congress. Madrid, Spain, August 2003.

5. Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Demir C., Rehborn H., Aleksic M., Haug A., Reigber T., Schwab M. Traffic state detection with floating car data in road networks // 8th Int. IEEE conference on IST. Vienna, Austria, September 13-16, 2005.

6. Kerner B.S., Klenov S.L., Brakemeier A. Testbed for Wireless Vehicle Communication: a Simulation Approach based on Three-Phase Traffic Theory // 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Netherlands, June 4-6, 2008.

7. Kerner B.S., Klenov S.L. Explanation of complex dynamics of congested traffic in NGSIM-data with three-phase traffic theory // Transportation Research Board 2010 Annual Meeting. TRB, Washington DC, January 10-14, 2010.

8. Kerner B.S., Klenov S.L., Brakemeier A. Testbed for simulations of the effect of vehicle ad-hoc network on traffic flow: An approach based on three-phase traffic theory // Transportation Research Board 2010 Annual Meeting. TRB, Washington DC, January 10-14, 2010.

9. Rehborn H., Klenov S.L., Palmer J. Common traffic congestion features studied in USA, UK, and Germany based on Kerner's three-phase traffic theory // Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE. Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011.

10. Kerner B.S., Klenov S.L., Hermanns G., Schreckenberg M. A new cellular automaton approach for simulations of probabilistic features of vehicular traffic // European Simulation and Modelling Conference: Modelling and Simulation. Essen, Germany, October 22-24, 2012.

11. Kerner B.S., Hemmerle P., Koller M., Hermanns G., Klenov S.L., Rehborn H., Schreckenberg M. Empirical Synchronized Flow in Oversaturated City Traffic // VIII Московская международная конференция по исследованию операций (ORM2016). Москва, 17–22 октября 2016.

12. Kaufmann S., Kerner B.S., Rehborn H., Koller M., Klenov S.L. Aerial Observation of Inner City Traffic and Analysis of Microscopic Data at Traffic Signals // Transportation Research Board 96th Annual Meeting. – TRB, Washington D.C., US, January 8-12, 2017.

Результаты диссертации также докладывались в рамках семинара “Научно - практические задачи развития автомобильно-дорожного комплекса России” и семинара-конференции “Наука и транспорт” под руководством академика РАН Козлова В.В., на транспортном семинаре в независимом математическом университете (НМУ), руководитель семинара д.ф.-м.н. Гасников А.В., на семинаре на кафедре информатики и вычислитель-

ной математики МФТИ, на семинаре “Математическое моделирование” в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, руководители семинара чл.-корр. РАН Тишкин В.Ф. и д.ф.-м.н. Кулешов А.А., на семинаре кафедры газовой и волновой динамики мехмата МГУ, руководитель семинара зам. заведующего кафедрой, д.ф.-м.н., профессор Смирнов Н.Н., а также на семинаре ИАП РАН под руководством директора института д.ф.-м.н. Никитина И.С.

### **Реализация и внедрение результатов работы.**

На основе результатов диссертации и комплекса программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий, были изучены свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий: (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, (iii) сложного гетерогенного транспортного потока, (iv) предупреждения водителей о пробках, (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

Результаты диссертации и, в частности, комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий были использованы в компании Даймлер для численного моделирования следующих интеллектуальных транспортных технологий: (1) для управления потоком машин, въезжающих на скоростную автодорогу, (2) для управления скоростным режимом, (3) для распределения трафика по транспортной сети, (4) для потребления топлива в транспортных сетях, (5) для оценки системы адаптивного круиз-контроля.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Объем составляет 268 машинописных страниц, текст содержит 88 рисунков и 11 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость результатов исследований, представлены выносимые на защиту

результаты. Приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

**В Главе 1** сначала обсуждаются известные результаты эмпирических исследований свободного и плотного потоков. В этих эмпирических исследованиях показано, что эмпирический переход от свободного к плотному транспортному потоку обладает метастабильной природой. Необходимость объяснения метастабильной природы эмпирического перехода от свободного к плотному транспортному потоку привела к появлению теории трех фаз Кернера.

В Главе 1 объясняются основные гипотезы теории трех фаз Кернера, которая была разработана в 1998–2001 годах. Согласно этой теории, существуют три фазы транспортного потока (рис. 1): (i) свободный поток (F), (ii) синхронизованный поток (S), (iii) широкий движущийся кластер (движущийся затор) (J).

Фазы *синхронизованный поток* и *широкий движущийся кластер* относятся к плотному транспортному потоку. Эмпирические данные, измеренные в разных странах в течении многих лет наблюдения, подтверждают существование этих трех фаз транспортного потока.

Одна из наиболее важных задач моделирования транспортных потоков – это объяснить и смоделировать эмпирический метастабильный характер перехода к плотному потоку вблизи узкого места на автодороге. В соответствии с эмпирическими исследованиями, этот переход представляет собой фазовый переход от свободного к синхронизованному потоку (F→S переход). F→S переход происходит в метастабильном свободном потоке. Это означает, что достаточно малые возмущения скорости в свободном потоке вблизи узкого места на автодороге затухают и не вызывают F→S перехода. Напротив, если достаточно большое локальное возмущение скорости возникает в метастабильном свободном потоке, тогда происходит F→S переход. Такое большое локальное возмущение скорости свободного потока может рассматриваться как “зародыш” для F→S перехода.

Поскольку внутри области плотного потока скорость потока достаточно низкая, то область плотного потока, которая первоначально возникает вблизи узкого места и в дальнейшем распространяется по автодороге, мо-

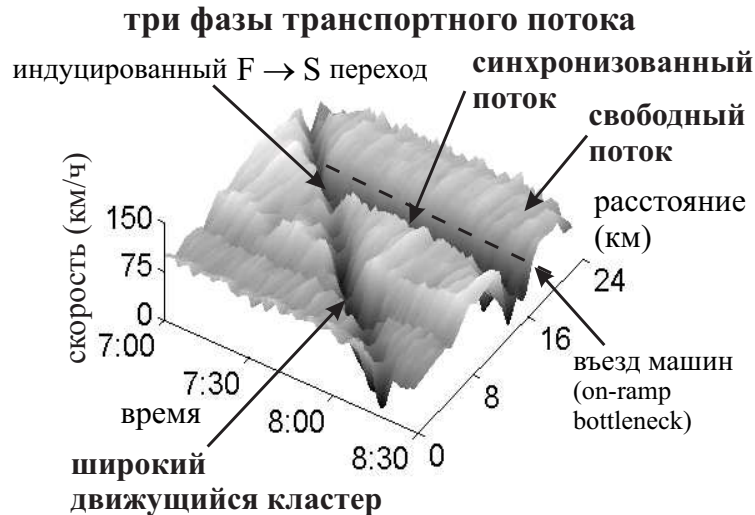


Рис. 1: Пример эмпирического индуцированного фазового перехода к синхронизированному потоку вблизи узкого места на автодороге, который был индуцирован распространением широкого движущегося кластера: данные измерений скорости потока, представленные в пространстве и времени. Реальные данные измерений скорости дорожными детекторами, полученные на автодороге А5-South в Германии 23 июня 1998 года. Рисунок взят из книги [ Kerner B.S. The Physics of Traffic. Berlin: Springer, 2004].

жет выступать в качестве “зародыша” для перехода от свободного к синхронизированному потоку вблизи других узких мест на автодороге. Поэтому в эмпирических данных часто наблюдается индуцированный  $F \rightarrow S$  переход (рис. 1). Эмпирический индуцированный переход к синхронизированному потоку вблизи узких мест на автодороге является общим эмпирическим доказательством метастабильного характера фазового перехода к синхронизированному потоку, и это эмпирическое доказательство не зависит от степени гетерогенности реального транспортного потока.

Основной причиной для создания теории трех фаз Кернера было объяснение эмпирического метастабильного характера фазового перехода от свободного к синхронизированному потоку вблизи узких мест на автодороге. Однако, теория трех фаз является качественной теорией. Поэтому для проведения численных экспериментов по моделированию ИТС должны быть разработаны математические модели в рамках теории трех фаз, что является одной из основных задач диссертации.

В Главе 2 разработан подход клеточных автоматов (КА) к теории трех фаз. В частности, представлены модель поведения водителей и правила движения для модели КА. Дано сравнение классического подхода к моделям клеточных автоматов для транспортного потока (Nagel-Schreckenberg КА модели) с разработанной в диссертации моделью клеточных автоматов в рамках теории трех фаз. На основе этой трехфазной модели КА разработана вероятностная модель перехода от свободного к плотному транспортному потоку (F→S переход). В частности, смоделированы спонтанный и индуцированный переходы, рассчитана вероятность спонтанного перехода к плотному потоку вблизи въезда. Изучено также возникновение широких движущихся кластеров в модели КА в рамках теории трех фаз.

В трехфазной КА модели, учитывающей случайную временную задержку для ускорения автомашины, применены следующие последовательные правила для численного моделирования движения автомашины:

- (а) “переускорение из-за смены полосы на более быструю”, смена полосы (для обгона) происходит с вероятностью  $p_c$ , когда выполнены условия для намерения сменить полосу (1)–(6) и условия для безопасной смены полосы (7):

$$R \rightarrow L : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_1 \text{ and } v_n \geq v_{\ell,n}, \quad (1)$$

$$L \rightarrow R : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_2 \text{ or } v_n^+ \geq v_n + \delta_2, \quad (2)$$

$$R \rightarrow L, \text{ грузовики} : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_1 \text{ and } v_n \geq v_{\ell,n} \quad (3)$$

$$\text{and } v_{\ell,n} < v_{\text{free, long}}^{(\max)} - \delta_0, \quad (4)$$

$$L \rightarrow R, \text{ грузовики} : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_2 \text{ or } v_n^+ \geq v_n + \delta_2 \quad (5)$$

$$\text{or } v_n^+ \geq v_{\text{free, long}}^{(\max)} - \delta_0, \quad (6)$$

$$g_n^+ \geq \min(v_n, g_c) \text{ and } g_n^- \geq \min(v_n^-, g_c), \quad (7)$$

- (б) “сравнение расстояния до автомашины впереди с расстоянием синхронизации  $G(v_n)$ ”:

$$\text{при } g_n \leq G(v_n) \text{ выполняются шаги (в, г), а шаг (д) пропускается,} \quad (8)$$

$$\text{при } g_n > G(v_n) \text{ пропускаются шаги (в, г), а шаг (д) выполняется,} \quad (9)$$

- (в) “адаптация скорости в пределах расстояния синхронизации”:

$$v_{n+1} = v_n + \text{sgn}(v_{\ell,n} - v_n), \quad (10)$$

(г) “переускорение из-за случайного ускорения в пределах расстояния синхронизации”:

$$\text{если } v_n \geq v_{\ell,n}, \text{ то с вероятностью } p_a, v_{n+1} = \min(v_{n+1} + 1, v_{\text{free}}), \quad (11)$$

(д) “ускорение”:

$$v_{n+1} = \min(v_n + 1, v_{\text{free}}), \quad (12)$$

(е) “торможение”, связанное с безопасной скоростью  $v_{s,n} = g_n$ :

$$v_{n+1} = \min(v_{n+1}, g_n), \quad (13)$$

(ж) “рандомизация” торможения задается формулой:

$$\text{с вероятностью } p, v_{n+1} = \max(v_{n+1} - 1, 0), \quad (14)$$

(з) “перемещение” за один шаг описывается формулой:

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1}. \quad (15)$$

Правило (в) описывает адаптацию скорости к скорости автомашины впереди, когда расстояние до автомашины впереди не превышает расстояние синхронизации. Под переускорением в правилах (а) и (г) понимается избыточное ускорение, превышающее необходимое для адаптации к скорости автомашины впереди в пределах расстояния синхронизации.

В формулах (1)–(15)  $n = 0, 1, 2, \dots$  – номер временного шага;  $x_n$  и  $v_n$  – координата и скорость автомашины на шаге  $n$ ;  $v_{\text{free}}$  – максимальная скорость для легковых автомобилей;  $v_{\text{free, long}}^{(\max)}$  – максимальная скорость для грузовиков; нижний индекс  $\ell$  обозначает переменные, относящиеся к автомашине впереди;  $g_n = x_{\ell,n} - x_n - d_\ell$  – расстояние до автомашины впереди; длина автомашины впереди  $d_\ell$  зависит от того, легковая ли это автомашина или грузовая;  $G(v_n) = kv_n$  – расстояние синхронизации; вероятность переускорения  $p_a$  в (11) выбирается возрастающей функцией скорости  $v_n$ , вероятность  $p$  в (14) зависит от скорости  $v_n$ , а также от того, ускоряется автомашина или нет на текущем шаге, что позволяет моделировать временную задержку при ускорении автомашины независимо от эффекта переторможения; обозначения  $R \rightarrow L$  и  $L \rightarrow R$  означают соответственно смену полосы с правой на левую и наоборот для двухполосной автодороги, индексы “+” и “–” относятся соответственно к ближайшим автомашинам впереди и позади на соседней полосе;  $k, \delta_1, \delta_2, \delta_0, g_c$  – параметры модели.



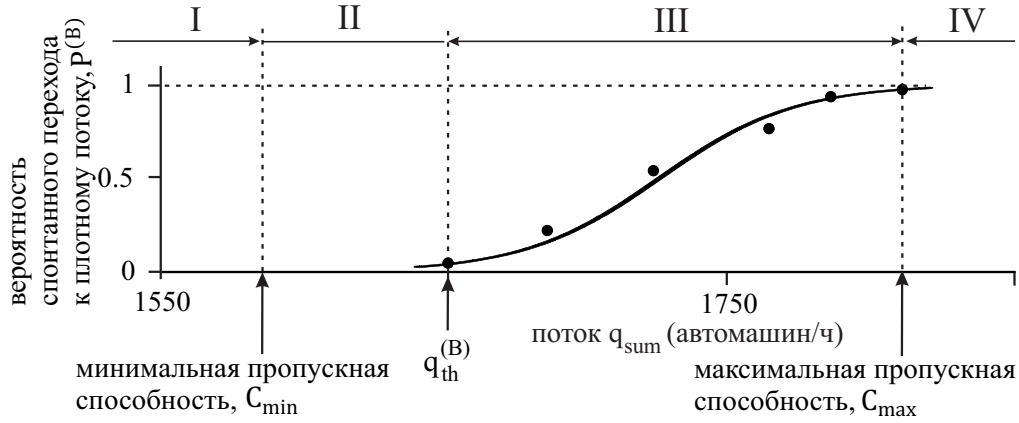


Рис. 2: Вероятность спонтанного фазового перехода к плотному потоку вблизи въезда автомашин на автодорогу, рассчитанная на основе трехфазной модели КА. Различные значения потока  $q_{\text{sum}} = q_{\text{in}} + q_{\text{on}}$  позади въезда связаны с изменением величины потока  $q_{\text{in}}$  по основной дороге при заданной величине потока через въезд  $q_{\text{on}}=400$  автомашин/час.

Предложенная трехфазная модель КА (1)–(15) позволила смоделировать стохастические характеристики фазового перехода к плотному потоку ( $F \rightarrow S$  переход) вблизи узких мест на автодороге. На основе численных экспериментов с помощью данной трехфазной модели КА была найдена теоретическая вероятность спонтанного перехода к плотному потоку (рис. 2). Зависимость вероятности спонтанного перехода к плотному потоку  $P^{(B)}$  от величины потока хорошо аппроксимируется функцией (показанной сплошной линией на рис. 2) вида:

$$P^{(B)}(q_{\text{sum}}) = \frac{1}{1 + \exp[\beta(q_P - q_{\text{sum}})]}, \quad (16)$$

где  $q_{\text{sum}}$  – величина потока через узкое место,  $\beta$  и  $q_P$  – константы.

Зависимость вероятности спонтанного фазового перехода к плотному потоку  $P^{(B)}$  от величины потока  $q_{\text{sum}}$  имеет растущий характер и качественно аналогична соответствующей эмпирической зависимости вероятности спонтанного фазового перехода к плотному потоку вблизи узкого места на скоростной автодороге, которая была открыта ранее различными исследователями эмпирических свойств транспортного потока.

При численном моделировании с помощью трехфазной модели КА было найдено, что существуют четыре различных диапазона I–IV для величины

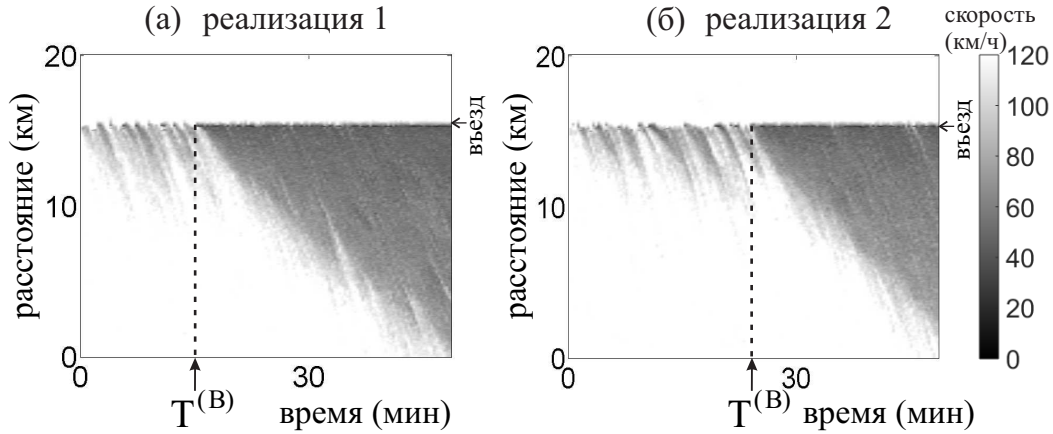


Рис. 3: Численное моделирование случайной задержки во времени для фазового перехода к плотному потоку на автодороге вблизи въезда автомашин с помощью трехфазной модели КА: (а, б) – скорость потока, различные реализации 1 (а) и 2 (б) относятся к одним и тем же значениям  $q_{on}$ ,  $q_{in}$ .

потока на автодороге, в пределах которых транспортный поток показывает качественно различные вероятностные свойства фазового перехода к плотному потоку вблизи узкого места на скоростной автодороге (рис. 2).

I. Свободный транспортный поток является устойчивым по отношению к фазовому переходу к плотному потоку.

II. Свободный транспортный поток является метастабильным по отношению к фазовому переходу к плотному потоку. Однако такой фазовый переход может быть только индуцированным. Это связано с тем, что в данном диапазоне вероятность спонтанного фазового перехода к плотному потоку в течении заданного времени наблюдения  $T_{ob}$  равна нулю:  $P^{(B)}(q_{sum}) = 0$ .

III. Свободный транспортный поток является метастабильным по отношению к фазовому переходу к плотному потоку. Такой фазовый переход вблизи узкого места на автодороге может быть как индуцированным, так и спонтанным с некоторой вероятностью  $0 < P^{(B)}(q_{sum}) < 1$ .

IV. Свободный транспортный поток является неустойчивым по отношению к фазовому переходу к плотному потоку. Такой фазовый переход вблизи узкого места на автодороге происходит с вероятностью  $P^{(B)}(q_{sum}) = 1$  в течении заданного времени наблюдения  $T_{ob}$ .

Возникновение локального возмущения в свободном метастабильном потоке, которое приводит к спонтанному фазовому переходу к плотному

потоку, является случайным событием. Это означает, что существует случайная задержка по времени  $T^{(B)}$  для спонтанного перехода к плотному потоку. В результате было найдено, что спонтанный переход к плотному потоку является фазовым переходом от свободного к синхронизованному потоку со случайной задержкой по времени  $T^{(B)}$  (рис. 3).

В соответствии с теорией трех фаз Кернера, в трехфазной модели КА, разработанной в диссертации, широкие движущиеся кластеры возникают спонтанно только в синхронизованном потоке (S→J переход).

**В Главе 3** разработана стохастическая микроскопическая модель транспортного потока в рамках теории трех фаз. Было показано, что в разработанной стохастической микроскопической модели в рамках теории трех фаз, благодаря математическому описанию стохастического переускорения со случайной задержкой и эффекта адаптации скорости внутри состояний синхронизованного потока, переход от свободного к плотному потоку – это переход от метастабильного свободного потока к синхронизованному потоку (F→S переход), как наблюдается во всех эмпирических данных. Для математического моделирования интеллектуальных транспортных технологий, включая моделирование влияния автоматических машин на транспортный поток, в разработанной стохастической микроскопической модели введено так называемое состояние движения автомашины  $S_n$ , которое позволяет описывать случайное ускорение и замедление автомашины, а также времена случайной задержки водителя при ускорении и замедлении, независимо друг от друга в разных состояниях транспортного потока.

В разработанной модели применены следующие правила для численного моделирования движения автомашин по автодороге:

$$v_{n+1} = \max(0, \min(v_{\text{free}}, \tilde{v}_{n+1} + \xi_n, v_n + a\tau, v_{s,n})), \quad (17)$$

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1}\tau, \quad (18)$$

где  $a$  – максимальное ускорение,  $\tau$  – величина шага по времени,  $\tilde{v}_{n+1}$  – скорость автомашины без случайных флуктуаций скорости  $\xi_n$ :

$$\tilde{v}_{n+1} = \min(v_{\text{free}}, v_{s,n}, v_{c,n}), \quad (19)$$

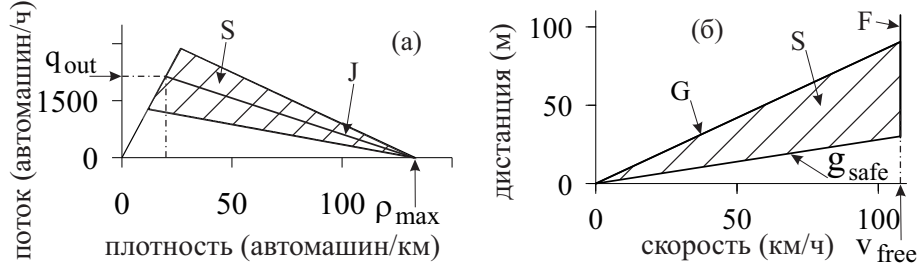


Рис. 4: Стационарные состояния для модели транспортного потока в рамках теории трех фаз на плоскости поток-плотность (а) и плоскости дистанция-скорость (б). F – свободный поток, S – синхронизованный поток (заштрихованные 2D-области на рисунках (а,б)); линия J на рис. (а) – это линия J Кернера, наклон которой соответствует характеристической скорости заднего (по потоку) фронта широкого движущегося кластера.

$$v_{c,n} = \begin{cases} v_n + \Delta_n & \text{при } g_n \leq G_n, \\ v_n + a_n \tau & \text{при } g_n > G_n, \end{cases} \quad (20)$$

$$\Delta_n = \max(-b_n \tau, \min(a_n \tau, v_{\ell,n} - v_n)), \quad (21)$$

$v_{s,n}$  – безопасная скорость на временном шаге  $n$ ,  $v_{\text{free}}$  – максимальная скорость в свободном потоке на автодороге, величины  $a_n \geq 0$  и  $b_n \geq 0$  в (20), (21) ограничивают величину ускорения или замедления в условиях, когда автомобиль ускоряется или адаптирует свою скорость к скорости автомобиля впереди;  $G_n$  – расстояние синхронизации на шаге  $n$ .

Эффект адаптации скорости в пределах расстояния синхронизации  $G$  отвечает гипотезе теории трех фаз Кернера: гипотетические стационарные состояния синхронизованного потока покрывают двумерную область на плоскости “поток-плотность” (рис. 4 (а)) и на плоскости “дистанция-скорость” (рис. 4 (б)).

В модели случайные ускорение и торможение автомобиля  $\xi_n$  зависят от состояния движения  $S_{n+1}$ , т. е. от того, ускоряется ли автомобиль, или она тормозит, или же поддерживает свою скорость:

$$S_{n+1} = \begin{cases} -1 & \text{если } \tilde{v}_{n+1} < v_n, \\ 1 & \text{если } \tilde{v}_{n+1} > v_n, \\ 0 & \text{если } \tilde{v}_{n+1} = v_n. \end{cases} \quad (22)$$

Чтобы моделировать случайную временную задержку для ускорения и торможения автомобиля,  $a_n$  и  $b_n$  в (21) выбирались как следующие слу-

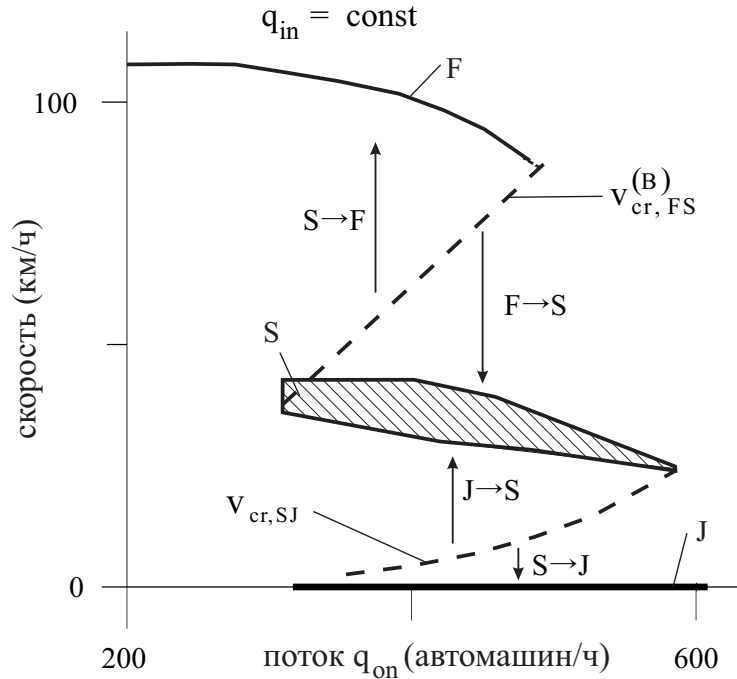


Рис. 5: Численное моделирование  $2Z$ -характеристики для фазовых переходов. Стрелки  $F \rightarrow S$ ,  $S \rightarrow F$ ,  $S \rightarrow J$  и  $J \rightarrow S$  иллюстрируют качественно соответствующие фазовые переходы между тремя фазами транспортного потока.

чайные функции:  $a_n = a\Theta(P_0 - r_n)$  и  $b_n = a\Theta(P_1 - r_n)$ , где  $r_n = \text{rand}(0, 1)$  – случайное число между 0 и 1 с равномерной функцией распределения, вероятности  $P_0$  и  $P_1$  зависят от состояния движения автомашины  $S_n$  на шаге  $n$ ,  $\Theta(z) = 0$  при  $z < 0$  и  $\Theta(z) = 1$  при  $z \geq 0$ .

**В Главе 4** были разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования пространственно-временных структур транспортного потока. С этой целью был разработан алгоритм, в котором применены специальные правила (в отличие от правил смены полосы) для въезда автомашин на основную дорогу, позволяющие обеспечить минимальные флуктуации скорости при больших потоках въезжающих автомашин.

На основе разработанного комплекса программ была рассчитана макроскопическая  $Z$ -характеристика для фазового перехода от свободного к плотному потоку ( $F \rightarrow S$  переход). Кроме того, была найдена двойная  $Z$ -характеристика для фазовых переходов, которая описывает все многообразие и сложность фазовых переходов в транспортном потоке (рис. 5).

Была также рассчитана диаграмма пространственно-временных струк-

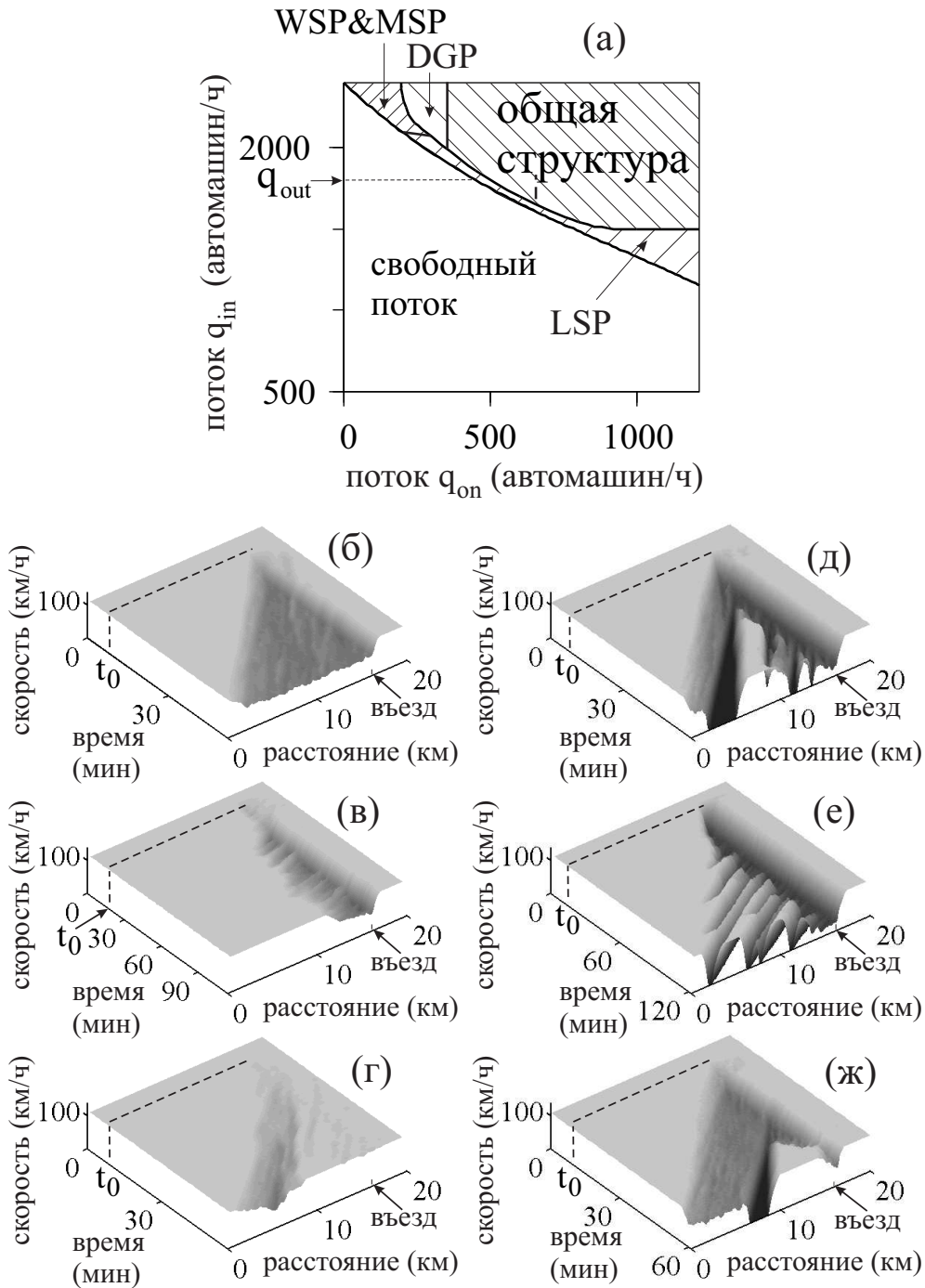


Рис. 6: Диаграмма (а) пространственно-временных структур (б-ж) плотно-го транспортного потока вблизи изолированного узкого места из-за въезда на автодорогу; (б-г) – структуры синхронизованного потока (SP) и (д-ж) – общая структура (GP); (б) - расширяющаяся SP (WSP), (в) - локализованная SP (LSP), (г) - движущаяся SP (MSP), (д) - GP при  $q_{in} > q_{out}$ , (е) - GP при  $q_{in} < q_{out}$ , (ж) - разделяющаяся GP (DGP).  $q_{in}$  – величина потока по основной дороге до въезда (выше по течению),  $q_{out}$  – величина выходного потока из широкого движущегося кластера.

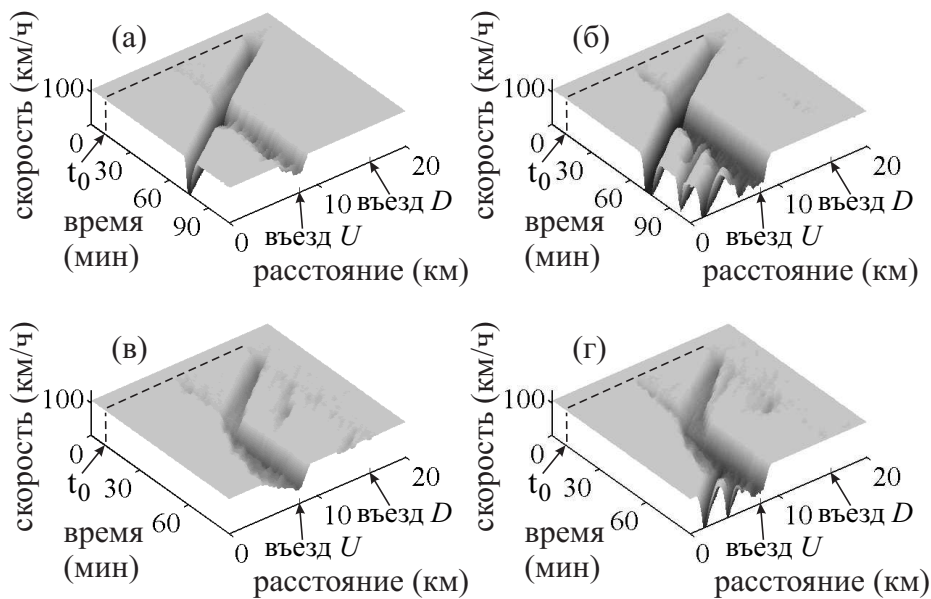


Рис. 7: Индуцированное образование пространственно-временных структур плотного транспортного потока: (а, б) – широкий движущийся кластер индуцирует LSP (а) и GP (б), (в, г) – MSP индуцирует LSP (в) и GP (г).

тур плотного транспортного потока (рис. 6 (а)) и найдены основные типы пространственно-временных структур плотного транспортного потока (рис. 6 (б-ж)), смоделировано индуцированное образование структур плотного транспортного потока (рис. 7), и проанализирована эволюция пространственно-временных структур плотного транспортного потока, возникающих вблизи узких мест на автодороге.

В Главе 5 разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования интеллектуальных транспортных технологий, а также проведены вычислительные эксперименты по моделированию пространственно-временных структур транспортного потока и интеллектуальных транспортных технологий на основе разработанного комплекса программ. Результаты вычислительных экспериментов позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий.

(i) **Коммуникация между машинами с целью предотвращения образования пробок.** Разработан алгоритм, в котором одновременно моделируются ad-hoc сеть, связанная с коммуникацией между автомашина-

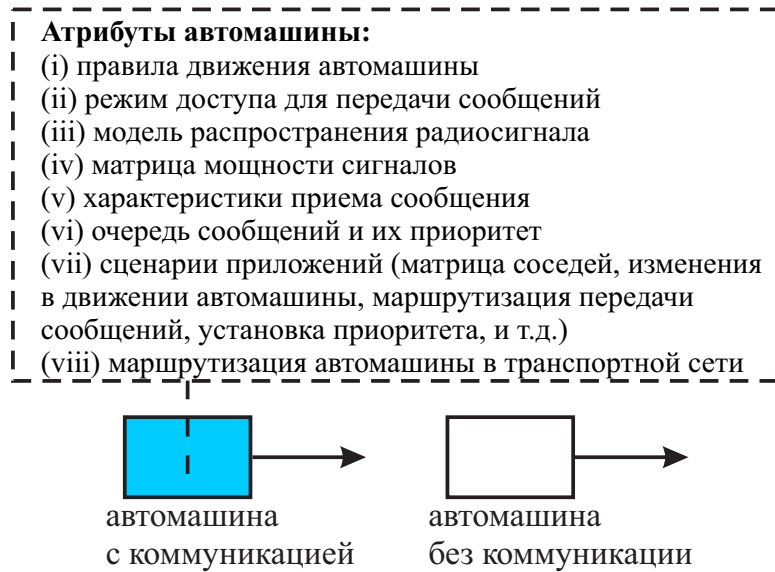


Рис. 8: Схема моделирования ad-hoc сети и транспортной сети в рамках объединенной модели.

ми, и движение автомашин в транспортном потоке.

В разработанной в диссертации модели, объединяющей V2V коммуникацию (коммуникация между автомашинами или между автомашинами и инфраструктурой), ad-hoc сеть и транспортную сеть, введены динамические атрибуты, которые относятся к каждой автомашине с коммуникацией (рис. 8). Все остальные автомашины в транспортной сети, которые не имеют коммуникации, обладают только одним атрибутом: модельными правилами движения автомашины. Если в дополнение к автомашинам с коммуникацией сеть включает придорожные стационарные пункты связи (RSU), размещенные в некоторых местах транспортной сети, каждому такому пункту связи приписывались те же атрибуты, что для автомашин с коммуникацией, за исключением правил движения автомашины. Модельный атрибут, называемый “правила движения автомашины”, задавался правилами стохастической микроскопической модели Главы 3.

При численном моделировании эффекта предотвращения образования затора вблизи въезда на автодорогу в результате образования ad-hoc сети между автомашинами с коммуникацией были выбраны значения потоков  $q_{in}$  и  $q_{on}$ , при которых в отсутствие коммуникации между автомашинами возникал затор в виде общей пространственно-временной структуры (GP) вблизи узкого места на автодороге (рис. 9 (а)). Для моделирования обра-



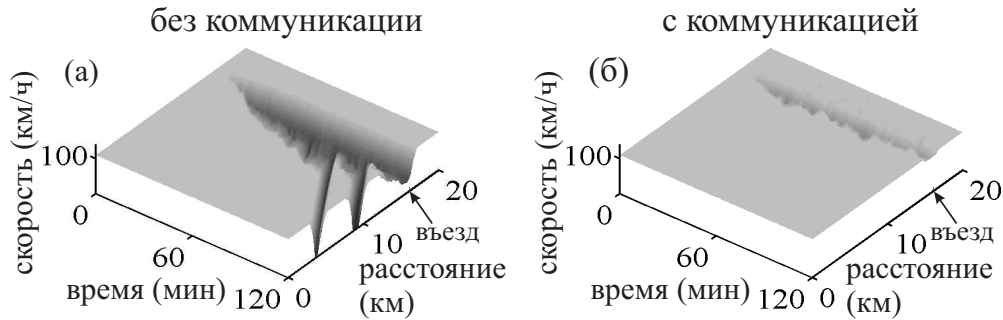


Рис. 9: Численное моделирование предотвращения образования затора вблизи въезда на автодорогу в результате применения коммуникации между автомобилями: скорость во времени и пространстве в транспортном потоке без коммуникации (а) и с коммуникацией между автомобилями (б).

зования ad-hoc сети между автомобилями с коммуникацией использовалась следующая модель: предполагалось, что все автомобили на автодороге обладают коммуникацией, при этом каждая из автомобилей каждые 0.1 секунды пытается послать неприоритетное сообщение. В свою очередь, автомобиль, который движется на полосе въезда и намеревается въехать на автодорогу, посылает приоритетное сообщение соседним автомобилям, которые движутся по правой полосе основной дороги. В модели предполагается, что соседняя автомобиль на правой полосе, которая находится позади въезжающей автомобиля, увеличивает временной интервал до въезжающей автомобиля. Расчеты показывают, что по сравнению со случаем, когда нет коммуникации между автомобилями и возникает затор в виде GP (рис. 9 (а)), данное изменение в поведении автомобилей с коммуникацией уменьшает возмущения в свободном транспортном потоке вблизи въезда на автодорогу. В результате предотвращается образование затора вблизи узкого места на автодороге (рис. 9 (б)).

**(ii) Моделирование плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами.** Разработан алгоритм для численного моделирования взаимодействия между автомобилями при смене полосы и обгоне медленно движущейся автомобиля в транспортном потоке. Алгоритм обеспечивает реалистичную динамику смены полосы, в частности, отсутствие резких торможений.

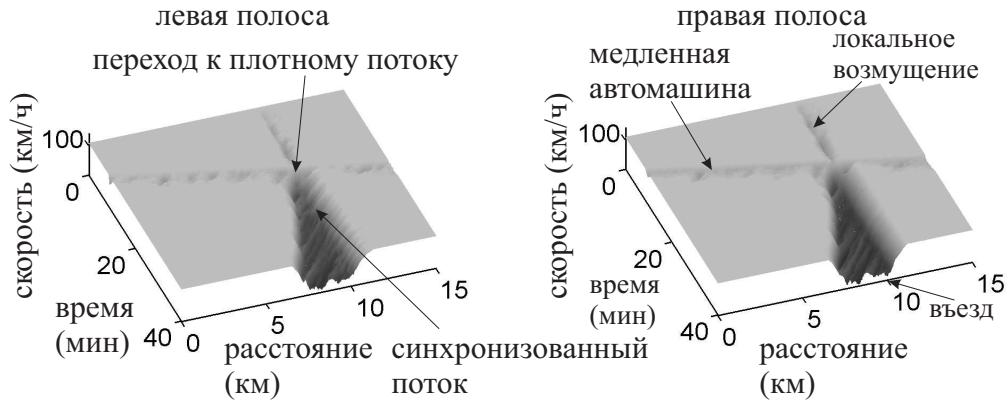


Рис. 10: Численное моделирование фазового перехода к плотному транспортному потоку на 2-х полосной автодороге с узким местом из-за въезда на автодорогу: фазовый переход вызван распространением волны повышенной плотности, образующейся за медленно движущейся автомашиной.

В результате вычислительного эксперимента найдено, что, как и в эмпирических данных, за медленно движущейся автомашиной формируется волна повышенной плотности потока, которая может являться “зародышем” для спонтанного перехода к плотному транспортному потоку ( $F \rightarrow S$  переход), происходящем вблизи въезда на автодорогу (рис. 10).

Чтобы наглядно показать различие между фазовыми переходами к плотному потоку при наличии медленно движущихся автомашин в транспортном потоке и без них, была рассчитана вероятность  $P^{(B)}$  спонтанного  $F \rightarrow S$  перехода как функция величины потока  $q_{\text{sum}}$  позади от въезда на автодорогу (рис. 11). Найдено, что при любых выбранных значениях потоков  $q_{\text{in}}$  и  $q_{\text{on}}$  медленно движущиеся автомашины в транспортном потоке приводят к увеличению вероятности  $P^{(B)}$  спонтанного фазового перехода к плотному потоку по сравнению со случаем, когда в транспортном потоке таких автомашин нет.

**(iii) Моделирование сложного гетерогенного транспортного потока.** Разработан алгоритм для моделирования взаимодействия между автомашинами при смене полосы на въездах и съездах скоростной автодороги. Алгоритм обеспечивает плавную динамику транспортного потока вблизи въездов и съездов, в частности, отсутствие нереалистично резких торможений.

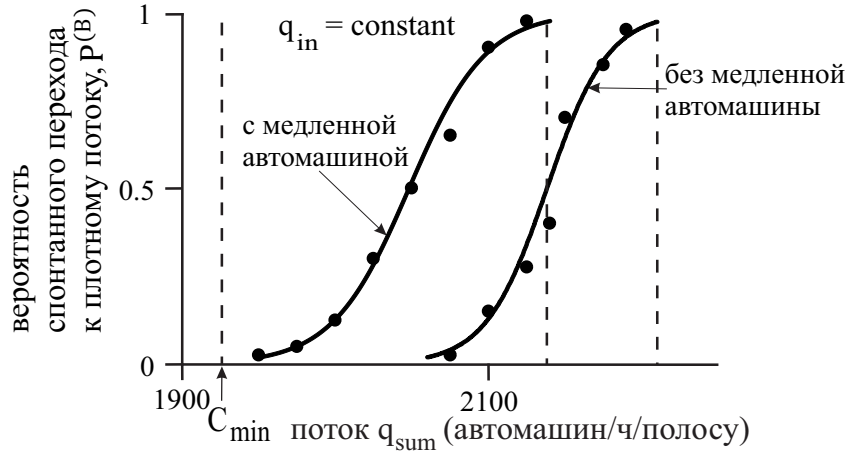


Рис. 11: Вероятность спонтанного фазового перехода к плотному потоку при прохождении медленно движущейся автомашиной узкого места из-за въезда и без такой автомашины в зависимости от величины суммарного потока  $q_{sum}$  позади (вниз по потоку) от въезда при постоянном значении потока  $q_{in}$  по основной дороге.

Как и в реальных данных измерений, во всех результатах численного моделирования фазовый переход к плотному потоку вблизи узких мест на автодороге всегда представляет собой  $F \rightarrow S$  переход и имеет метастабильный характер. Широкие движущиеся кластеры не возникают спонтанно в свободном потоке, а возникают только в синхронизованном потоке ( $S \rightarrow J$  переход). Выбирая соответствующим образом параметры въездов/съездов на автодороге, возможно смоделировать пространственно-временную структуру плотного потока (рис. 12 (а)), которая близка по времени и по координате к эмпирической пространственно-временной структуре, реконструированной на основе данных детекторов (рис. 12 (б)).

**(iv) Предупреждение водителей о пробках.** Разработан алгоритм для моделирования генерации предупреждения водителей о пробках, в котором используется разделение переднего фронта синхронизованного потока от переднего фронта движущегося кластера.

Чтобы определить качество методов предупреждения водителей о пробках, была изучена зависимость реконструкции точек переходов между различными фазами транспортного потока от процента передающих информацию коммуницирующих автомашин, случайным образом распределенных в транспортном потоке. На основе численного моделирования

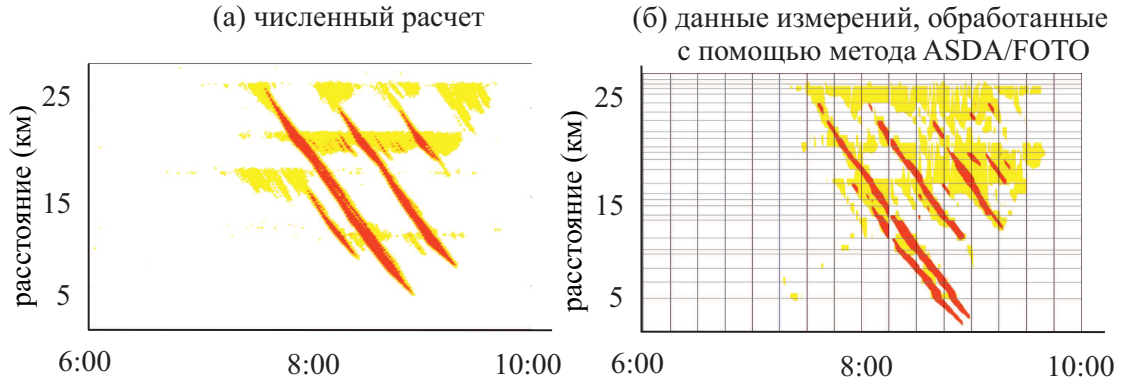


Рис. 12: Сравнение результатов численного моделирования (а) с данными измерений (б).

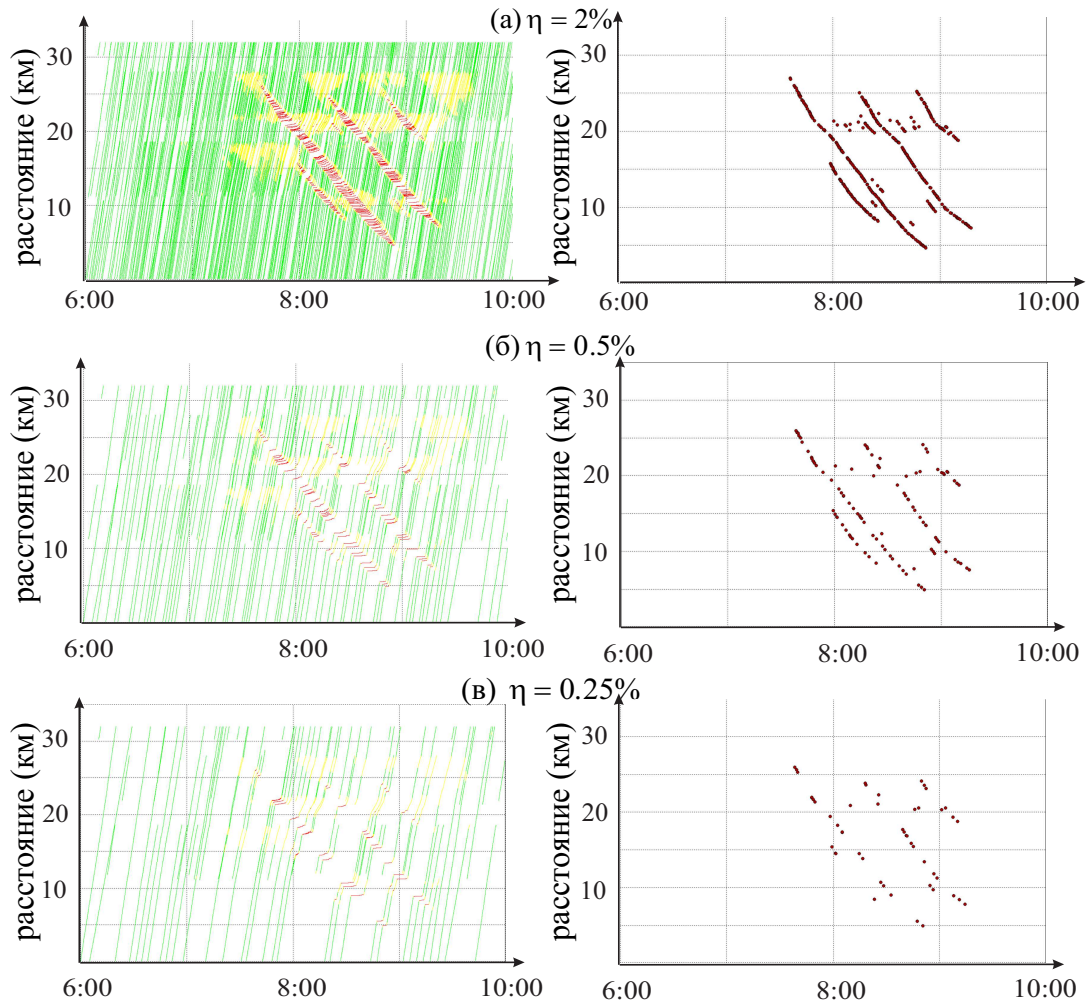


Рис. 13: Результаты идентификации фронтов (точек перехода) между различными фазами (слева) в пространственно-временной структуре транспортного потока, показанной на рис. 12 (а), и детектирование переднего (по потоку) фронта (“сообщение о пробках”) (справа); процент коммуницирующих автомашин  $\eta = 2\%$  (а),  $\eta = 0.5\%$  (б) и  $\eta = 0.25\%$  (в).

пространственно-временной структуры плотного потока (рис. 12 (а)), близкой соответствующей структуре в эмпирических данных (рис. 12 (б)), были рассчитаны траектории всех автомашин, движущихся через эту структуру. Предполагалось, что некоторые из этих автомашин являются коммуницирующими автомашинами, траектории которых известны на основе V2V коммуникации. Задавался различный процент коммуницирующих автомашин  $\eta$  и предполагалось, что эти коммуницирующие автомашины распределены случайным образом между другими автомашинами.

Результаты численного моделирования идентификации точек перехода между различными фазами транспортного потока на основе траекторий коммуницирующих автомашин представлены соответственно на рис.13 (слева) при различных процентах коммуницирующих автомашин  $\eta = 2\%$ ,  $\eta = 0.5\%$  и  $\eta = 0.25\%$ . Видно, что коммуницирующие автомашины хорошо реконструируют положение фронтов между фазами и общий вид пространственно-временной структуры плотного транспортного потока уже для процента коммуницирующих автомашин около  $\eta = 0.5\%$ .

Идентификация фаз транспортного потока вдоль траекторий коммуницирующих автомашин (рис. 13) (слева) позволяет генерировать сообщение о пробках следующим образом: сообщение о пробках генерируется коммуницирующей автомашиной тогда, когда либо  $F_J$  фронт (переход от свободного потока к широкому движущемуся кластеру), либо  $S_J$  фронт (переход от синхронизованного потока к широкому движущемуся кластеру) идентифицируется вдоль траектории автомашины. В результате была найдена зависимость сообщений о пробках от процента коммуницирующих автомашин (рис. 13) (справа).

**(v) Численное моделирование перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.** Разработан алгоритм для численного моделирования прохождения автомашинами светофора, который делает прогноз возможности проехать светофор до начала красной фазы и одновременно обеспечивает плавную динамику подъезда к светофору во время красной фазы.

Установлено, что в дополнение к движущимся очередям, описанным в классической теории, в перенасыщенном режиме транспортного потока на

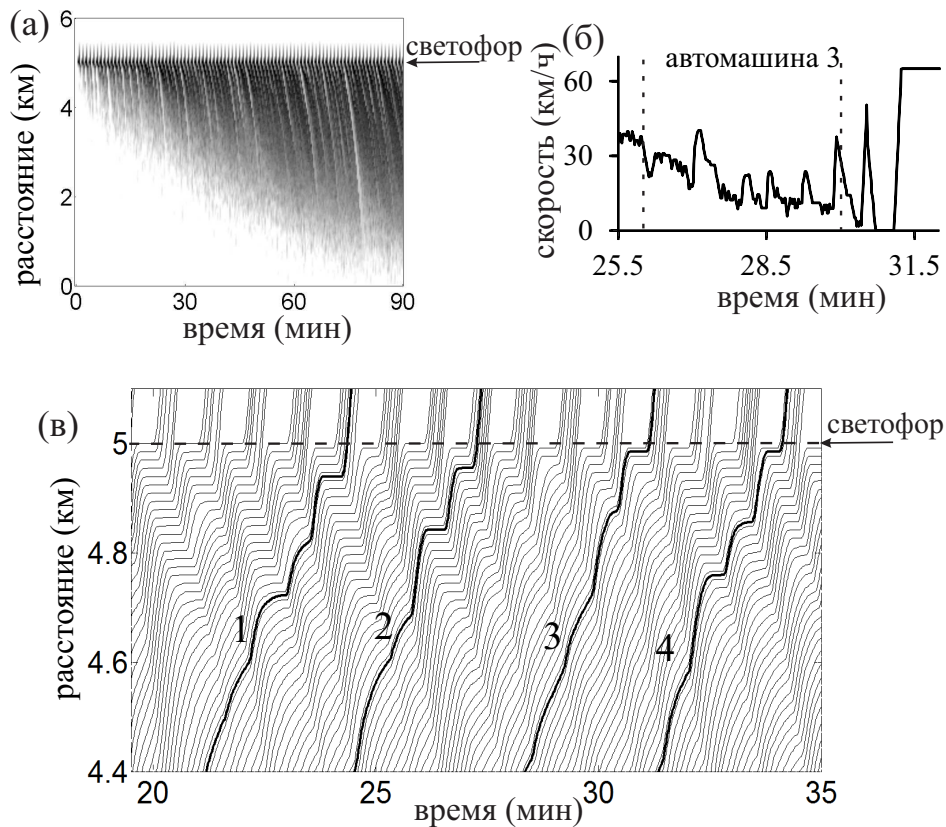


Рис. 14: Численное моделирование эффекта исчезновения движущихся очередей с последующим возникновением синхронизованного потока: (а) – скорость как функция координаты и времени, (б) – скорость автомашины 3 вдоль ее траектории на рис. (в), (в) – фрагмент траекторий автомашин в области перед светофором.

светофоре может формироваться синхронизованный поток (рис. 14). Причина этого в следующем: когда эффект адаптации скорости автомашины к скорости автомашины впереди достаточно сильный, временная дистанция между автомашинами, как и расстояние между ними, существенно возрастают в потоке впереди (вверх по потоку) от движущегося кластера (очереди), что вызывает постепенное уменьшение ширины кластера и его последующее исчезновение. В результате, в транспортном потоке перед светофором возникают движущиеся структуры синхронизованного потока (MSP) (рис. 14). Среднее время остановки автомашины внутри движущейся очереди уменьшается по мере движения этой очереди против потока и ее удаления от светофора. На некотором расстоянии от светофора движущиеся очереди могут исчезнуть, и тогда перенасыщенный транспортный поток

состоит только из фазы синхронизованного потока, в котором, в отличие от движущейся очереди, автомашины не останавливаются (рис. 14 (б, в)). При достаточно сильном эффекте адаптации скорости автомашины останавливаются только один или два раза вблизи светофора (рис. 14 (б, в)), т.е. все движущиеся очереди исчезают и трансформируются в синхронизованный поток уже на относительно небольшом расстоянии от светофора.

Эмпирические движущиеся структуры синхронизованного потока (MSP) в перенасыщенном режиме транспортного потока перед светофором, предсказанные в диссертации, наблюдались в [29] в реальном городском транспортном потоке.

**В заключении** сформулированы выводы диссертации.

#### **Список публикаций автора по теме диссертации.**

1. Кленов С.Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке — новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий // Труды МФТИ / Под ред. В.В. Козлова. — 2010. — Т. 2, № 4(8). — С. 75–89.
2. Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / Под ред. А.В. Гасникова. — 2-е изд. — М.: МЦНМО, 2013. — 427с.
3. Kerner B.S., Klenov S.L., Konhäuser P. Asymptotic theory of traffic jams // Physical Review E. — 1997. — Vol. 56, № 4. — P. 4200–4216.
4. Kerner B.S., Klenov S.L. A microscopic model for phase transitions in traffic flow // Journal of Physics A: Mathematical and General. — 2002. — Vol. 35, № 3. — P. L31–L43.
5. Kerner B.S., Klenov S.L., Wolf D.E. Cellular automata approach to three-phase traffic theory // Journal of Physics A: Mathematical and General. — 2002. — Vol. 35, № 47. — P. 9971–10013.
6. Kerner B.S., Klenov S.L. Microscopic theory of spatial-temporal congested traffic patterns at highway bottlenecks // Physical Review E. — 2003. — Vol. 68, № 3. — 036130.
7. Kerner B.S., Klenov S.L. Spatial-temporal patterns in heterogeneous traffic flow with a variety of driver behavioural characteristics and vehicle parameters // Journal of Physics A: Mathematical and General. — 2004. — Vol. 37, № 37. — P. 8753–8788.
8. Kerner B.S., Klenov S.L., Hiller A., Rehborn H. Microscopic features of moving traffic jams // Physical Review E. — 2006. — Vol. 73, № 4. — 046107.
9. Kerner B.S., Klenov S.L., Hiller A. Criterion for traffic phases in single vehicle data and empirical test of a microscopic three-phase traffic theory // Journal of Physics A: Mathematical and General. — 2006. — Vol. 39, № 9. — P. 2001–2020.

10. Kerner B.S., Klenov S.L. Deterministic microscopic three-phase traffic flow models // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 2006. – Vol. 39, № 8. – P. 1775–1809.
11. Kerner B.S., Klenov S.L. Probabilistic breakdown phenomenon at on-ramp bottlenecks in three-phase traffic theory: Congestion nucleation in spatially non-homogeneous traffic // *Phys. A*. – 2006. – V. 364. – P. 473–492.
12. Kerner B.S., Klenov S.L. Probabilistic breakdown phenomenon at on-ramp bottlenecks in three-phase traffic theory // *Transportation Research Record*. – 2006. – Vol. 1965. – P. 70–78.
13. Kerner B.S., Klenov S.L., Hiller A. Empirical test of a microscopic three-phase traffic theory // *Nonlinear Dynamics*. – 2007. – Vol. 49. – P. 525–553.
14. Kerner B.S., Klenov S.L. Phase transitions in traffic flow on multilane roads // *Physical Review E*. – 2009. – Vol. 80, № 5. – 056101.
15. Kerner B.S., Klenov S.L. A study of phase transitions on multilane roads in the framework of three-phase traffic theory // *Transportation Research Record*. – 2009. – Vol. 2124. – P. 67–77.
16. Kerner B.S., Klenov S.L. A theory of traffic congestion at moving bottlenecks // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 2010. – Vol. 43, № 42. – 425101.
17. Kerner B.S., Klenov S.L., Brakemeier A. Enhancing Traffic Efficiency and Safety through the Use of Wireless Vehicle Communication // *Traffic Engineering & Control*. – 2010. – Vol. 51, № 6. – P. 217–222.
18. Kerner B.S., Klenov S.L., Schreckenberg M. Simple cellular automaton model for traffic breakdown, highway capacity, and synchronized flow // *Physical Review E*. – 2011. – Vol. 84, № 4. – 046110.
19. Rehborn H., Klenov S.L., Palmer J. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK, and Germany // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2011. – Vol. 390, № 23. – P. 4466–4485.
20. Kerner B.S., Rehborn H., Palmer J., Klenov S.L. Using probe vehicle to generate jam warning messages // *Traffic Engineering and Control*. – 2011. – Vol. 52, № 3. – P. 141–148.
21. Kerner B.S., Klenov S.L., Hermanns G., Hemmerle P., Rehborn H., Schreckenberg M. Synchronized flow in oversaturated city traffic // *Physical Review E*. – 2013. – Vol. 88, № 5. – 054801.
22. Kerner B.S., Klenov S.L., Hermanns G., Schreckenberg M. Effect of driver over-acceleration on traffic breakdown in three-phase cellular automaton traffic flow models // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2013. – Vol. 392, № 18. – P. 4083–4105.
23. Kerner B.S., Rehborn H., Schäfer R.P., Klenov S.L., Palmer J., Lorkowski S., Witte N. Traffic dynamics in empirical probe vehicle data studied with three-phase theory: Spatiotemporal reconstruction of traffic phases and generation of jam warning messages // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2013. – Vol. 392, № 1. – P. 221–251.
24. Kerner B.S., Klenov S.L., Schreckenberg M. Probabilistic physical



characteristics of phase transitions at highway bottlenecks: incommensurability of three-phase and two-phase traffic-flow theories // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 89, № 5. – 052807.

25. Kerner B.S., Hemmerle P., Koller M., Hermanns G., Klenov S.L., Rehborn H., Schreckenberg M. Empirical synchronized flow in oversaturated city traffic // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 90, № 3. – 032810.

26. Kerner B.S., Klenov S.L., Schreckenberg M. Traffic breakdown at a signal: classical theory versus the three-phase theory of city traffic // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. – 2014. – № 3. – P03001.

27. Kerner B.S., Koller M., Klenov S.L., Rehborn H., Leibel M. The physics of empirical nuclei for spontaneous traffic breakdown in free flow at highway bottlenecks // *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. – 2015. – Vol. 438. – P. 365–397.

28. Molzahn S.-E., Kerner B.S., Rehborn H., Klenov S.L., Koller M. Analysis of speed disturbances in empirical single vehicle probe data before traffic breakdown // *IET Intelligent Transport Systems*. – 2017. – Vol. 11, Issue 9. – P. 604–612.

29. Kaufmann S., Kerner B.S., Rehborn H., Koller M., Klenov S. L. Aerial Observations of Moving Synchronized Flow Patterns in Over-Saturated City Traffic. // *Transportation Research C*. – 2018. – Vol. 86. – P. 393–406.

30. Kerner B.S., Klenov S.L. Comparison of congested pattern features at different freeway bottlenecks // *Traffic and Granular Flow '03* / Eds. S.P. Hoogendoorn, S. Ludig, P.H.L. Bovy, M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Heidelberg, Berlin: Springer, 2005. – P. 141–160.

31. Kerner B.S., Klenov S.L., Wolf D.E. Congestion due to merging roads: Predictions of three-phase traffic theory // *Traffic and Granular Flow '03* / Eds. S.P. Hoogendoorn, S. Ludig, P.H.L. Bovy, M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Heidelberg, Berlin: Springer, 2005. – P. 161–172.

32. Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Demir C., Rehborn H., Aleksic M., Haug A., Reigber T., Schwab M. Traffic state detection with floating car data in road networks // *Proceedings of the 8th Int. IEEE conference on IST*. – 2005. – P. 700–705.

33. Kerner B.S., Klenov S.L., Brakemeier A. Testbed for Wireless Vehicle Communication: a Simulation Approach based on Three-Phase Traffic Theory // *Proc. of 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. – 2008. – P. 180–185.

34. Rehborn H., Klenov S.L. Traffic Prediction of Congested Patterns // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer, 2009. – P. 9500–9536.

35. Kerner B.S., Klenov S.L. Traffic Breakdown, Probabilistic Theory of // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer Science+Business Media LLC, 2009. – P. 9282–9302.

36. Rehborn H., Klenov S.L., Palmer J. Common traffic congestion features studied in USA, UK, and Germany based on Kerner's three-phase traffic theory // *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE. – 2011. – P. 19–24.

37. Kerner B.S., Klenov S.L., Hermanns G., Schreckenberg M. A new cellular

automaton approach for simulations of probabilistic features of vehicular traffic // European Simulation and Modelling Conference: Modelling and Simulation. – 2012. – P. 353–357.

38. Rehborn H., Klenov S.L., Koller M. Traffic Prediction of Congested Patterns // Encyclopedia of Complexity and Systems Science / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer Science+Business Media LLC, 2017. – P.1–69.

39. Demir C., Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Rehborn H., Aleksic M., Reigber T., Schwab M., Haug A. FCD for urban areas: Method and analysis of practical applications // Proc. of ITS World Congress. – 2003. – Paper 2392.

40. Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Rehborn H., Haug A., Aleksic M. Comparison of ASDA/FOTO application for tracking of spatiotemporal congested patterns on freeways // Proc. of ITS World Congress. – 2003. – Paper No. 2371.

41. Wolf D.E., Kerner B.S., Klenov S.L. Cellular automata for highway traffic // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2003. – Vol. 330, № 1-2. – P. 295–295.

42. Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Demir C., Rehborn H., Aleksic M., Haug A., Reigber T., Schwab M. Verkehrsstörungserkennung mit FCD-Fahrzeugen in Straßennetzen // Straßenverkehrstechnik. – 2005. № 7+8. – P. 320–326.

43. Kerner, B.S., Klenov, S.L., Brakemeier A. Testbed for Wireless Vehicle Communication: a Simulation Approach based on Three-Phase Traffic Theory // Proc. of 4th Int. Workshop V2VCOM. – 2008. –P. 57–63.

44. Kerner B.S., Klenov S.L., Brakemeier A. Testbed fo simulations of the effect of vehicle ad-hoc network on traffic flow: An approach based on three-phase traffic theory // Proceedings of the Transportation Research Board 2010 Annual Meeting. – 2010. – Paper 10-0456.

45. Kerner B.S., Klenov S.L. Explanation of complex dynamics of congested traffic in NGSIM-data with three-phase traffic theory // Proceedings of the Transportation Research Board 2010 Annual Meeting. – 2010. – Paper 10-0454.

46. Rehborn H., Kerner B.S., Palmer J., Klenov S.L. Verkehrslagefusion für fahrzeuggestützte Kommunikationssysteme/Traffic data fusion for vehicle based communication systems // Straßenverkehrstechnik. – 2011. – Vol. 55, Heft 4. – P. 231–238.

47. Kerner B.S., Hemmerle P., Koller M., Hermanns G., Klenov S.L., Rehborn H., Schreckenberg M. Empirical Synchronized Flow in Oversaturated City Traffic // VIII Московская международная конференция по исследованию операций (ORM2016). – М: МАКС пресс, 2016. – Т. 1. – С. 191–194.

48. Kaufmann S., Kerner B.S., Rehborn H., Koller M., Klenov S.L. Aerial Observation of Inner City Traffic and Analysis of Microscopic Data at Traffic Signals // Transportation Research Board 96th Annual Meeting. – 2017. – TTRB Paper 17-03078.