

## Результаты публичной защиты

Дата защиты: 23 мая 2019 г.

Соискатель: Кленов Сергей Львович.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему: «Стохастические математические модели транспортного потока в рамках теории трех фаз».

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании председательствует – Председатель диссертационного совета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н.ЧЕТВЕРУШКИН.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 25 членов диссертационного совета присутствовали 19, из них 6 докторов по специальности рассматриваемой диссертации:

1.	ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
2.	ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
3.	КАЛИТКИН Н.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
4.	КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
5.	АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
6.	ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
7.	ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
8.	КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
9.	КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
10.	КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
11.	КОЛЕСНИЧЕНКО А.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
12.	КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
13.	ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
14.	МИЛЮКОВА О.Ю.	д.ф.-м.н.	01.01.07
15.	МИХАЙЛОВ А.П.	д.ф.-м.н.	05.13.18
16.	ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
17.	ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
18.	ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
19.	ЯКОБОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от «23» мая 2019 г., № 5

О присуждении **Кленову Сергею Львовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Стохастические математические модели транспортного потока в рамках теории трех фаз» по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 13 декабря 2018 года (протокол заседания № 24/пз) диссертационным советом Д002.024.03 на базе ФГУ ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Кленов Сергей Львович, 1962 года рождения, работает в должности доцента кафедры общей физики в ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ).

В 1985 году соискатель окончил «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ) по специальности «Автоматика и электроника», факультет Физической и квантовой электроники. В 1988 г. окончил очную аспирантуру МФТИ.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук защитил в 1988 году в диссертационном совете, созданном на базе МФТИ.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук выполнена на кафедре общей физики МФТИ.

**Официальные оппоненты:**

1. **Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий теоретическим отделом в ФГБУН «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»,

2. **Киселев Алексей Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

3. **Таташев Александр Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Высшая математика» в ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация ФГБУН Институт автоматизации проектирования Российской академии наук (ИАП РАН)** (Минобрнауки России) в своем положительном отзыве, подписанном сотрудником отдела информатизации, математического моделирования и управления Гайдаенко Валерием Ивановичем, главным научным сотрудником, доктором технических наук, указала, что диссертация Кленова С.Л. представляется законченным научным исследованием на актуальную тему, содержащим большое количество идей и предложений, реализованных в решении конкретных задач. На основе рассмотрения диссертации, автореферата и публикаций автора сделан вывод, что в работе Кленова С.Л. создан большой научный задел по направлению «Стохастические математические модели

транспортного потока в рамках теории трех фаз». Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как серьезное научное и практическое достижение в области численного моделирования транспортных потоков. Работа отвечает требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (с изменениями на 1 октября 2018 года) «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Кленов Сергей Львович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 48 опубликованных работ по теме диссертации, из них 38 работ в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, в том числе входящих в реферативные базы WoS, Scopus и Springer. Результаты диссертации опубликованы в ведущих международных и российских научных журналах, включая журналы из первого и второго квартилей Physical Review E, Journal of Physics A: Mathematical and General, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Основные результаты работы были представлены на российских и международных конференциях:

- Traffic and Granular Flow '03. Delft, Netherlands, October 2003.
- ITS World Congress. Madrid, Spain, August 2003.
- 8th Int. IEEE conference on IST. Vienna, Austria, September 13-16, 2005.
- 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Netherlands, June 4-6, 2008.
- Transportation Research Board 2010 Annual Meeting. TRB, Washington DC, January 10-14, 2010.
- Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE. Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011.
- European Simulation and Modelling Conference: Modelling and Simulation. Essen, Germany, October 22-24, 2012.

- VIII Московская международная конференция по исследованию операций (ORM2016). Москва, 17–22 октября 2016.

К числу наиболее значительных работ соискателя можно отнести следующие публикации:

1. 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. (3.4 печатных листа).

2. 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. (1.5 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).

3. 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. (5 печатных листов, WoS, Scopus, Q1).

4. 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. (2.2 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).

5. Kerner B.S., Klenov S.L., Hiller A., Rehborn H. Microscopic features of moving traffic jams // *Physical Review E*. – 2006. – Vol. 73, № 4. – 046107. (1.8 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).

6. 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. (4 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).

7. Kerner B.S., Klenov S.L. Phase transitions in traffic flow on multilane roads // *Physical Review E*. – 2009. – Vol. 80, № 5. – 056101. (2.1 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).

8. 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. (1.8 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).

9. 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. (2.3 печатных листа, WoS, Scopus, Q2).

10. 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. (1.4 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).

11. 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. (3.8 печатных листа, WoS, Scopus, Q2).

Вклад автора в совместные работы заключался в непосредственном участии в постановке задач, в разработке математических моделей, подборе параметров моделей, разработке численных методов решения уравнений для всех моделей, разработке комплекса программ, проведении вычислений, проведении сравнения результатов вычислений с эмпирическими данными, анализе результатов и написании публикаций.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационного исследования. Недостоверных сведений в тексте диссертации об опубликованных соискателем работах не выявлено.

**На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:**

**Отзыв официального оппонента д.ф.-м.н., профессора, заведующего теоретическим отделом в ИОФ им. А.М. Прохорова РАН Н.Г. Гусейнзаде.**

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Нельзя не признать определенной небрежности в изложении результатов и оформлении диссертации. Ссылки на литературу идут не в хронологическом порядке; в тексте диссертации ссылки на российских

исследователей оформлены не совсем корректно (отсутствуют инициалы); нет разделения целей и задач; пункты «методы исследования» и «теоретическая ценность» диссертационного исследования присутствуют в работе неявно, но при этом в автореферате о них упоминается отдельными пунктами, и т.д.

2. В работе рассмотрены только стохастические модели транспортных потоков. В научной литературе имеется огромное количество детерминистических моделей потока, которые исследователи применяют для различных приложений. Не очень понятно, почему в диссертации автор ограничился стохастическими моделями транспортного потока в рамках теории трех фаз, проигнорировав детерминистические модели.

3. Нет указаний на то, какие эмпирические данные использовались для проверки моделей и выбора параметров модели.

**Отзыв официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Киселева А.Б.**

В отзыве указаны следующие замечания:

1. В модели, представленной в Главе 3, автор использует довольно много параметров. Насколько это необходимо? В диссертации я не нашел ответа на этот вопрос.

2. Из эмпирических данных хорошо известно явление гистерезиса в транспортном потоке, когда прямой переход от свободного к плотному транспортному потоку происходит при больших значениях величины потока, в то время как обратный переход к свободному потоку происходит при заметно меньших значениях потока. Почему в диссертации подробно моделируется прямой переход, но почти не уделяется внимание обратному переходу, который был бы важен для задач рассасывания заторов?

3. В Главе 5 при моделировании предотвращения перехода к плотному потоку с помощью коммуникации между машинами не совсем ясно, каким именно образом были изменены правила движения коммуницирующих машинами, что позволило им обеспечить плавный въезд на автодорогу и тем самым предотвратить переход к плотному потоку?

## **Отзыв оппонента д.ф.-м.н., профессора Таташева А. Г.**

В отзыве указаны следующие замечания:

1) На стр. 6 автореферата имеется следующий абзац

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

Непонятно, имеется ли здесь ввиду, что интеллектуальными транспортными технологиями являются "плотный транспортный поток, возникающий за медленно движущимися машинами"; "сложный гетерогенный транспортный поток", "переход к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре". Это же замечание можно отнести к аналогичной речевой конструкции на стр. 7.

2) В диссертации не рассматривается вопрос, насколько модели в диссертации чувствительны к небольшим изменениям параметров модели.

## **Отзыв ведущей организации – ФГБУН Институт автоматизации проектирования Российской академии наук.**

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Автором в работе рассмотрены только микроскопические модели транспортных потоков. В то же время в литературе широко представлены макроскопические модели транспортного потока, в частности, гидродинамические модели. При этом в тексте работы нет обоснования данного выбора, сделанного автором.

2. На сегодняшний день существует большое число моделей транспортного потока, которые отталкиваются от его двухфазного представления. В частности, есть класс макроскопических моделей на основе

модели Лайтхилла-Уизема-Ричардса. Существуют также микроскопические модели, которые хорошо воспроизводят классическую неустойчивость транспортного потока, впервые использованную в моделях группы Джeneral Моторс. В работе подробно не рассматривается вопрос, можно ли от более сложных трех фазовых моделей, разработанных в диссертации сделать переход к этим моделям и при каких условиях он будет обоснован.

3. Из текста диссертации не вполне ясно, как обеспечивался подбор параметров микроскопических моделей, предложенных автором во второй и третьей главах. Также не представлены расчеты, которые бы сравнивали возможности трехфазной модели клеточных автоматов с трехфазной стохастической моделью.

4. В разделе 3.5 работы автором утверждается, что «Никакая классическая модель транспортного потока, не может описывать эмпирической метастабильности свободного потока по отношению к переходу к синхронизованному потоку». Считаю необходимым заметить, что данное утверждение следует скорректировать следующим образом: «Никакая двухфазная классическая модель транспортного потока, не может описывать эмпирической метастабильности свободного потока по отношению к переходу к синхронизованному потоку». Поскольку уже есть работы, показывающие, что трехфазные макроскопические модели вполне успешно описывают этот переход.

5. В пятой главе автором проводилось исследование численного моделирования ad-hoc сети коммуницирующих автомашин с использованием оригинальной модели коммуникации между автомобилями, разработанной автором. Было бы интересно увидеть сравнение результатов работы авторской модели с результатами, полученными с использованием специализированного программного средства имитационного моделирования сетей ns-3, являющимся на сегодняшний день универсальным средством сетевых исследований.

**На автореферат диссертации поступило пять положительных отзывов.**

В отзыве **Бугаева Александра Степановича**, академика РАН, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН не содержится замечаний.

В отзыве **Афанасьевой Ларисы Григорьевны**, доктора физико-математических наук, профессора кафедры Теории вероятностей Механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова не содержится замечаний.

В отзыве **Нурминского Евгения Алексеевича**, доктора физико-математических наук, профессора, ведущего научного сотрудника Дальневосточного федерального университета не содержится замечаний.

В отзыве **Аджемова Сергея Сергеевича**, доктора технических наук, профессора, начальника НИО-48 МТУСИ, и **Терешонка Максима Валерьевича**, кандидата технических наук, доцента, заведующего НИЛ-4802 МТУСИ в ФГБОУ ВО Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ) содержатся следующие замечания:

1. Высказывание «зависимость сообщений о пробках от процента коммуницирующих автомашин» (стр. 29) представляется некорректным. Остается догадываться, что имел в виду автор – число сообщений, или их своевременность, или другую количественную характеристику.

2. Из автореферата неясно, проводил ли автор количественный анализ параметров, полученных при численном моделировании квазирегулярных траекторий автомобилей в области перед светофором, приведенный на рис. 14 (в).

3. Автор в своей работе не ссылается и не сравнивает свои результаты с получаемыми путем применения теории перколяции [Li D., Fu B., Wang Y., et al. Percolation transition in dynamical traffic network with

evolving critical bottlenecks. Proc Natl Acad Sci USA.2014; 112(3): 669-672. doi:10.1073/pnas.1419185112].

В отзыве **Валуева Андрея Михайловича**, доктора физико-математических наук, доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории динамики человеко-машинных систем Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН содержатся следующие замечания:

1. Характер исследований по моделям автора требует использования численных методов для расчета траекторий транспортных средств, которые, с учетом оригинального характера моделей, должны были быть специфическими. Таким образом, налицо все три требуемые компоненты диссертации по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Однако разработанные численные методы, к сожалению, в автореферате ясным образом не изложены и не отделены от собственно моделей.

2. Несколько удивляет композиция автореферата, в которой, вопреки традиции, отсутствует обзор достижений предшественников и явно не сформулированы выводы, что можно было бы сделать без превышения допустимого объема. Весьма достойно выглядит список публикаций, с большой долей статей в ведущих зарубежных журналах. Но, на наш взгляд, было бы уместно, кроме обзорной работы 2010 г. в «Трудах МФТИ», опубликовать еще несколько журнальных статей для российского читателя.

Имеется акт о **применении** результатов диссертационной работы Кленова С.Л., подтверждающий, что разработанные соискателем стохастическая микроскопическая модель и программный код были задействованы компанией «Даймлер» в исследовательских проектах по моделированию разных интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и при проверке надежности ИТС. Акт подписали Штеффен Таке, руководитель отдела Навигация, и Антонио Акуна, руководитель отдела Функции управления автомобилем, компании Даймлер.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается их широко известной компетенцией в вопросах математического моделирования транспортных потоков, нелинейных систем и фазовых переходов в них, разработки численных методов и алгоритмов их решения. Это подтверждается многочисленными научными публикациями оппонентов и сотрудников ведущей организации (полный перечень публикаций отражен в сведениях, представленных на сайте организации, где проходила защита).

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**Впервые разработаны** стохастические математические модели транспортных потоков в рамках теории трех фаз, которые описывают метастабильную природу эмпирического фазового перехода от свободного к плотному (синхронизованному) транспортному потоку. На основе разработанных моделей впервые найдены свойства и диаграмма сложных пространственно-временных структур в транспортном потоке, которые описывают всю совокупность этих структур, наблюдаемых в измерениях транспортного потока.

**Предложен** новый 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.

**Созданы** новые алгоритмы и комплекс программ для моделирования транспортных ситуаций и разработки интеллектуальных транспортных технологий.

**Проведена верификация и валидация** разработанных математических моделей на основе сравнения результатов расчета перехода от свободного к плотному транспортному потоку и возникающих в результате этого перехода сложных пространственно-временных структур вблизи узких мест на автодороге с эмпирическими данными измерений транспортного потока.

**Проведены** вычислительные эксперименты с помощью разработанного комплекса программ, которые позволили смоделировать различные транспортные ситуации и определить свойства и качество 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 значимость** работы заключается в том, что впервые разработаны стохастические математические модели транспортных потоков в рамках теории трех фаз, которые описывают метастабильную природу эмпирического фазового перехода от свободного к плотному (синхронизованному) транспортному потоку. На основе разработанных моделей впервые 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 новый 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.

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

Кроме того, результаты диссертации и, в частности, комплекс программ для моделирования транспортных ситуаций и разработки 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 траффика по транспортной сети, (4) для потребления топлива в транспортных сетях, (5) для оценки системы адаптивного круиз-контроля, что подтверждено соответствующим актом о применении результатов диссертационной работы в исследовательских проектах компании Даймлер.

#### **Достоверность результатов.**

Разработанные в диссертации модели и комплексы программ надежно и тщательно верифицированы на широком круге задач, в том числе на основе сравнения результатов расчета перехода от свободного к плотному транспортному потоку и возникающих при этом сложных пространственно-временных структур вблизи узких мест на автодороге с эмпирическими данными измерений транспортного потока. Надежность результатов диссертации доказана также в следующих численных экспериментах по

моделированию коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, сложного гетерогенного транспортного потока, предупреждения водителей о пробках, перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре. Кроме того, надежность результатов диссертации была подтверждена в компании Даймлер, имеется соответствующий акт о применении результатов диссертационной работы в исследовательских проектах компании Даймлер.

Результаты диссертации и разработанные в ней стохастические трехфазные модели транспортного потока были использованы многими другими авторами при проведении исследований по моделированию транспортных потоков, что подтверждается многочисленными ссылками на публикации соискателя (h-индекс 18 по Scopus).

#### **Личный вклад соискателя.**

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Вклад автора в создание представленных в диссертации математических моделей транспортного потока в рамках теории трех фаз заключался в непосредственном участии как в постановке задач, так и во всех этапах разработки математических моделей.

Автором лично

- предложены математические модели для разработки интеллектуальных транспортных технологий;
- предложены алгоритмы и численные методы решения для всех разработанных в диссертации математических моделей;
- разработан комплекс программ для моделирования транспортных ситуаций и разработки интеллектуальных транспортных технологий, проведены вычислительные эксперименты, дано сравнение результатов вычислений с эмпирическими данными, выполнены все расчеты, результаты которых представлены в диссертации.

На заседании 23 мая 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Кленову С.Л. ученую степень доктора физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 19, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель диссертационного совета Д 002.024.03  
академик РАН, д.ф.-м.н.

Б.Н. Четверушкин

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.024.03,  
к.ф.-м.н.

М.А. Корнилина

23 мая 2019 г.