

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.061.02  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
МАТЕМАТИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 07 февраля 2017 г. № 3

**О присуждении** Куликову Игорю Михайловичу, гражданину Российской Федерации **ученой степени доктора** физико-математических наук.

**Диссертация** «Математическое моделирование трехмерных гидродинамических процессов в самосогласованном гравитационном поле на суперЭВМ» **по специальности** 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ **принята к защите** 18 октября 2016 г., протокол № 9 диссертационным советом Д 003.061.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, созданным приказом Минобрнауки России №105/нк-209 от 11.04.2012 г.

**Соискатель** Куликов Игорь Михайлович 1984 года рождения, в 2007 году **соискатель окончил** Государственное образовательное учреждение

высшего профессионального образования Новосибирский государственный технический университет, **диссертацию** на соискание ученой степени **кандидата** физико-математических **наук** «Моделирование динамики трёхмерных газовых объектов в самосогласованном гравитационном поле» **защитил** в 2010 году, в диссертационном совете, созданном на базе Учреждения Российской академии наук Института математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН, **работает** научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

**Диссертация выполнена** в лаборатории Параллельных алгоритмов решения больших задач Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

**Официальные оппоненты:**

Кудрявцев Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория № 7, старший научный сотрудник;

Соколинский Леонид Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра Системного программирования, заведующий кафедрой, проректор по информатизации;

Чупахин Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория Дифференциальных уравнений, заведующий лабораторией, **дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация** Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», г. Москва **в своем положительном заключении, подписанном Жуковым Виктором Тимофеевичем, доктором физико-математических наук, отдел «Прикладные задачи механики сплошных сред», заведующий отделом, указала, что диссертационная работа И.М. Куликова выполнена на высоком научном уровне, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, обеспечившее решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития приоритетного направления фундаментальных исследований, выполняемых учреждениями РАН, – астрономия и исследование космического пространства. Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Соискатель имеет 30 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 25 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях 24.** Опубликованные работы представляют собой статьи в научных журналах, материалы конференций, главы в монографиях и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ общим объемом 228 страниц (**14.25 печатных листа**) и в полном объеме отражают содержание диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Куликов И.М. Операторный подход для численного моделирования гравитационных задач газовой динамики // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, Вып. 3. – С. 27-35.

Авторский вклад заключается в разработке и реализации разностных аналогов дифференциальных операторов для численного решения уравнений гравитационной газовой динамики. В частности, вклад автора был определяющим при сравнении различных подходов к созданию инвариантной относительно поворота численной схемы.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.225 п.л.**

2. Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Куликов И.М. Модификация метода крупных частиц для задач гравитационной газовой динамики. // Автометрия. – 2007. – Т. 43, Вып. 6. – С. 56-65.

Авторский вклад заключается в разработке и реализации трехмерной схемы деформации ячеек на лагранжевом этапе метода крупных частиц. Вклад автора был определяющим при экспериментальном доказательстве инвариантности численного решения на задаче вращения самогравитирующего газового облака.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.25 п.л.**

3. Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Киреев С.Е., Куликов И.М. Параллельная реализация на суперЭВМ модели газовой компоненты самогравитирующего протопланетного диска // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, Вып. 3. – С. 38-52.

Авторский вклад заключается в параллельной реализации метода решения уравнений газовой динамики и в объяснении механизмов эволюции газовой компоненты протопланетного диска. В частности, вклад автора был определяющим при экспериментальном доказательстве инвариантности численной схемы на задаче эволюции трехрукавного протопланетного диска.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.281 п.л.**

4. Kulikov I., Lazareva G., Snytnikov A., Vshivkov V. Supercomputer Simulation of an Astrophysical Object Collapse by the Fluids-in-Cell Method // Lecture Notes in Computer Science. – 2009. – V. 5698. – P. 414-422.

Авторский вклад заключается в создании и реализации параллельного вычислительного метода решения уравнений гравитационной газовой динамики, в исследовании масштабируемости параллельной реализации и в решении задачи коллапса с помощью оригинального метода. Вклад автора был определяющим в разработке программного комплекса для суперЭВМ и в доказательстве преимущества разработанного метода над методом сглаженных частиц.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.225 п.л.**

5. Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I., Tutukov A. Hydrodynamical code for numerical simulation of the gas components of colliding galaxies // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2011. – V. 194, I. 2. – Article Number 47.

Авторский вклад состоял в модификации эйлерового метода крупных частиц с помощью метода Годунова, в параллельной реализации численного метода, в его верификации и в исследовании задачи о центральном столкновении газовых компонент галактик. В частности, вклад автора был определяющим при определении диапазонов гидродинамических параметров для образования каждого из сценариев столкновения галактик.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.2625 п.л.**

6. Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I., Tutukov A. Computational methods for ill-posed problems of gravitational gasodynamics // Journal of Inverse and Ill-posed Problems. – 2011. – V. 19. – P. 151-166.

Авторский вклад состоял в обосновании метода регуляризации численного решения на задаче о центральном столкновении газовых компонент галактик.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.3 п.л.**

7. Тутуков А.В., Лазарева Г.Г., Куликов И.М. Газодинамика центрального столкновения двух галактик: слияние, разрушение, пролет, образование новой галактики // *Астрономический журнал*. – 2011. – Т. 88, № 9. – С. 837-851.

Авторский вклад состоял в экспериментальном обосновании развития сценариев столкновения газовых компонент галактик, сформулированных в статье.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.1875 п.л.**

8. Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Киреев С.Е., Куликов И.М. Численное решение трехмерных задач динамики самогравитирующих многофазных систем // *Научный вестник НГТУ*. – 2011. – Вып. 3 (44). – С. 69-80.

Авторский вклад состоял в реализации газодинамической модели в рамках многофазной модели и в построении аналитического решения для равновесного самогравитирующего газового шара.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.15 п.л.**

9. Лазарева Г.Г., Куликов И.М., Вшивков В.А., Кошкарлова Е.А., Берендеев Е.А., Горр М.Б., Антонова М.С. Параллельная реализация численной модели столкновения галактик // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2011. – Т. 9., Вып. 4. – С. 71-78.

Авторский вклад состоял в обосновании гидродинамических параметров, приводящих к развитию различных сценариев центрального столкновения галактик.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.075 п.л.**

10. Kulikov I. PEGAS: Hydrodynamical code for numerical simulation of the gas components of interacting galaxies // Book Series of the Argentine Astronomical Society. – 2013. – V. 4. – P. 91-95.

В работе описана модификация лагранжевого этапа метода крупных частиц с учетом полной деформации каждой ячейки расчетной области, сформулирована расширенная система газодинамических тестов для численного метода, с использованием модификации численного метода повторены вычислительные эксперименты по исследованию сценариев столкновения газовых компонент галактик, показано, что диапазоны гидродинамических параметров, приводящих к образованию каждого из сценариев, совпадают с результатами, полученными ранее автором. Все результаты статьи получены лично автором.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.3125 п.л.**

11. Годунов С.К., Киселев С.П., Куликов И.М., Мали В.И. Численное и экспериментальное моделирование образования волн при сварке взрывом

// Труды Математического Института им. В.А. Стеклова. – 2013. – Т. 281. – С. 16-31.

Авторский вклад состоял в доказательстве условий корректности уравнения состояния упругопластической среды, в разработке численного метода решения уравнений теории упругости с учетом пластических деформаций, в разработке модели сварки материалов на границе контакта, в проведении и анализе вычислительных экспериментов. В частности, вклад автора был определяющим при выводе условий корректности уравнения состояния, при разработке модели взаимодействия пластин, допускающей процесс волнообразования при косом соударении пластин.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.45 п.л.**

12. Куликов И.М., Черных И.Г., Глинский Б.М. AstroPhi: программный комплекс для моделирования динамики астрофизических объектов на гибридных суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2013. – Т. 2, Вып. 4. – С. 57-79.

Авторский вклад состоял в обзоре и анализе численных методов решения уравнений газовой динамики и программных пакетов для решения уравнений гравитационной газовой динамики, в разработке и исследовании масштабируемости параллельной реализации численного метода для выполнения на ускорителях Intel Xeon Phi, в проведении верификации численного метода, в объяснении механизмов коллапса астрофизических объектов.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **1.15 п.л.**

13. Kulikov I. GPUPEGAS: A New GPU-accelerated Hydrodynamic Code for Numerical Simulations of Interacting Galaxies // The Astrophysical Journal Supplements Series. – 2014. – V. 214, I. 1. – Article Number 12.

В работе приведен анализ современных программных комплексов для решения задач астрофизики, построена и обоснована полная гидродинамическая модель галактик, в которой для звездной компоненты используется модель на основе уравнений для первых моментов бесстолкновительного уравнения Больцмана, построен и верифицирован параллельный численный метод для решения уравнений, описывающих газовую и бесстолкновительную компоненты, разработана параллельная реализация вычислительной модели для выполнения на графических ускорителях, в полной двухфазной гидродинамической модели повторен сценарий разлета галактик после их столкновения, экспериментально доказано, что гидродинамические параметры, приводящие к образованию сценариев столкновения галактик совпадают с результатами, полученными автором ранее. Все результаты статьи получены лично автором.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.75 п.л.**

14. Godunov S., Kulikov I. Computation of Discontinuous Solutions of Fluid Dynamics Equations with Entropy Nondecrease Guarantee // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2014. – V. 54, I. 6. – P. 1012-1024.

Авторский вклад состоял в построении численной схемы. В частности, вклад автора был определяющим в доказательстве неубывания энтропии в численной схеме.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.406 п.л.**

15. Kulikov I., Chernykh I., Snytnikov A., Protasov V., Tutukov A., Glinsky B. Numerical Modelling of Astrophysical Flow on Hybrid Architecture Supercomputers // In Parallel Programming: Practical Aspects, Models and Current Limitations (ed. M. Tarkov). – 2014. – P. 71-116.

Авторский вклад заключается в обсуждении, разработке и исследовании математических моделей динамики астрофизических объектов, параллельных вычислительных методов решения уравнений

гравитационной магнитной газовой динамики. В частности, вклад автора был определяющим при объяснении механизма образования полярных течений при коллапсе молекулярного облака в вертикальном магнитном поле.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **1.437 п.л.**

16. Kulikov I.M., Chernykh I.G., Snytnikov A.V., Glinskiy B.M., Tutukov A.V. AstroPhi: A code for complex simulation of the dynamics of astrophysical objects using hybrid supercomputers // Computer Physics Communications. – 2015. – V. 186. – P. 71-80.

Авторский вклад состоял в разработке оригинального программного комплекса, в исследовании масштабируемости параллельной реализации численного метода и в исследовании задач коллапса астрофизических объектов. В частности, вклад автора был определяющим в выявлении преимущества разработанного оригинального метода над методом сглаженных частиц на задачах с большим градиентом решения.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.25 п.л.**

17. Kulikov I., Chernykh I., Glinskiy B., Weins D., Shmelev A. Astrophysics simulation on RSC massively parallel architecture // Proceedings - 2015 IEEE/ACM 15th International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid Computing, CCGrid 2015. – 2015. – P. 1131-1134.

Авторский вклад состоял в постановке задачи и в объяснении механизмов образования рукавов галактик при их столкновении под углом и при прохождении массивного тела рядом с галактикой.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.05 п.л.**

18. Kulikov I., Chernykh I., Nenashev V., Katysheva E. Numerical modeling of interacting galaxies on Intel Xeon Phi supercomputers // CEUR Workshop Proceedings. – 2015. – V. 1482. – P. 226-237.

Авторский вклад состоял в постановке задачи столкновения галактик, в формулировке полной гидродинамической модели с учетом подсеточных процессов и в параллельной реализации вычислительной модели.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.45 п.л.**

19. Glinskiy B., Kulikov I., Snytnikov A., Chernykh I., Weins D. A multilevel approach to algorithm and software design for exaflops supercomputers // CEUR Workshop Proceedings. – 2015. – V. 1482. – P. 4-16.

Авторский вклад состоял в построении вычислительной модели для задач астрофизики на основе концепции со-дизайна.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.162 п.л.**

20. Протасов В.А., Куликов И.М. PADME – новый код для моделирования процесса формирования георесурсов планет на гетерогенных вычислительных системах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, Вып. 8. – С. 61-70.

Авторский вклад состоял в постановке задачи эволюции газопылевого протопланетного диска, в формулировке математической модели и в реализации гидродинамической модели. В частности, вклад автора был определяющим при формулировке начальных данных для развития сценария образования однопланетной системы

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.5 п.л.**

21. Kulikov I., Vorobyov E. Using the PPML approach for constructing a low-dissipation, operator-splitting scheme for numerical simulations of hydrodynamic flows // Journal of Computational Physics. – 2016. – V. 317. – P. 318-346.

Авторский вклад заключается в обсуждении и объяснении механизма образования многорукавных галактик, в разработке и

верификации нового численного метода высокого порядка точности на гладких решениях и с малой диссипацией решения в области разрывных решений. В частности, вклад автора был определяющим при создании численной схемы решения уравнений гравитационной газовой динамики.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **1.631 п.л.**

22. Protasov V., Serenko A., Nenashev V., Kulikov I., Chernykh I. High-Performance Computing in Astrophysical Simulations // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 681. – Article Number 012022.

Авторский вклад заключается в формулировке и определении области применимости математических моделей бесстолкновительной компоненты для описания звездной компоненты на масштабах галактик и их скоплений, а также для описания пылевой компоненты протопланетных систем.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.187 п.л.**

23. Kulikov I., Chernykh I., Tutukov A. A New Hydrodynamic Model for Numerical Simulation of Interacting Galaxies on Intel Xeon Phi Supercomputers // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 719. – Article Number 012006.

Авторский вклад заключается в обсуждении, разработке и исследовании математической гидродинамической модели взаимодействующих галактик. В частности, вклад автора был определяющим в экспериментальном подтверждении состоятельности гипотезы о высокой скорости звездообразования за фронтом ударных волн и гипотезы об области образования молекулярного водорода.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.375 п.л.**

24. Kulikov I., Chernykh I., Protasov V. Mathematical modeling of formation, evolution and interaction of galaxies in cosmological context //

Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 722. – Article Number 012023.

Авторский вклад заключается в формулировке математической гидродинамической модели и в объяснении механизмов образования крупномасштабных астрофизических объектов. В частности, вклад автора был определяющим при проведении вычислительных экспериментов с помощью zoom-in техники для экспериментального определения начальных данных для задач столкновения галактик в космологическом контексте.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **0.481 п.л.**

25. Годунов С.К., Киселев С.П., Куликов И.М., Мали В.И. Моделирование ударно-волновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо и термодинамический) структурных уровнях. – Москва, Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований. – 2014. – 296 С.

Авторский вклад состоял в доказательстве условий корректности уравнения состояния упругопластической среды, в разработке модели фазовых переходов и откола материала, в разработке численного метода решения уравнений теории упругости. В частности, вклад автора был определяющим при формулировке математической модели для воспроизведения кумулятивной струи, возникающей при косом соударении металлических пластин.

Объем печатных листов личного вклада соискателя **3.7 п.л.**

В опубликованных работах по моделированию упругопластических деформаций авторский вклад диссертанта заключается в разработке и исследовании корректности уравнения состояния деформируемой среды при фазовых переходах, в реализации численного метода и в проведении

вычислительных экспериментов. В работах по моделированию гидродинамических процессов в астрофизических приложениях авторский вклад диссертанта заключается в формулировке и обосновании гидродинамической модели астрофизических объектов, в разработке нового численного метода высокого порядка точности и в его программной реализации, а также в проведении вычислительных экспериментов. **Все выносимые на защиту результаты принадлежат соискателю лично.** Соавторы согласны с авторским вкладом соискателя в совместных работах. Все программы для ЭВМ разработаны **лично** Куликовым И.М.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** на автореферат поступило **4** отзыва. **Все отзывы положительные.** В них отмечается актуальность проблематики диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Отмечается, что диссертационная работа выполнена на высоком профессиональном уровне, удовлетворяет требованиям к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, соответствует специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

1. Отзыв на автореферат, составленный д.ф.-м.н. Жилкиным Андреем Георгиевичем, ведущим научным сотрудником отдела Физики и эволюции звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук, г. Москва. Отзыв положительный, не содержит критических замечаний.

2. Отзыв на автореферат, составленный д.ф.-м.н. Губайдуллиным Иреком Марсовичем, старшим научным сотрудником лаборатории

Математической химии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтехимии и катализа Российской академии наук, г. Уфа. Отзыв положительный, содержит замечания:

- 1) В автореферате не приведен анализ достоинств и недостатков лагранжевых (прежде всего метода сглаженных частиц) и эйлеровых методов. Такой анализ позволяет обосновать необходимость перехода к гибридным эйлерово-лагранжевым методам, которые сегодня активно развиваются в мире, и к которым относится разработанный в диссертации численный метод.
- 2) Также в автореферате диссертации не приведено подробное описание математической модели химических процессов: начальное распределение химических веществ, схема химических реакций, скорость протекания реакций, вклад в функции охлаждения и нагревания для каждого из пространственных масштабов.

Ответ соискателя приведен в стенограмме (стр. 13).

3. Отзыв на автореферат, составленный д.ф.-м.н. Садовским Владимиром Михайловичем, директором Института вычислительного моделирования СО РАН – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», заведующий отделом Вычислительной механики деформируемых сред Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск. Отзыв положительный, содержит замечания:

- 1) В теореме о выпуклости уравнения состояния упругой среды на странице 16 автореферата не учитывается симметрия потенциальной энергии относительно сингулярных чисел тензора дисторсии. Такая симметрия имеет место, так как рассматривается случай изотропной

среды. Для симметричной функции выполняется следующий критерий [Yang W.H. A useful theorem for constructing convex yield functions // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1980. V. 47, No. 2. P. 301-305]: симметричная относительно трех инвариантов выпуклая функция выпукла в пространстве тензоров. Таким образом, два неравенства из трех избыточны.

- 2) Не ясно, в чем смысл корректирующих процедур на странице 19. Там дважды в разных формах записано уравнение для полной энергии – одно из уравнений приведенной выше по тексту газодинамической модели.

Ответ соискателя приведен в стенограмме (стр. 13 – 14).

4. Отзыв на автореферат, составленный д.ф.-м.н. Роменским Евгением Игоревичем, главным научным сотрудником лаборатории Дифференциальных уравнений и смежных вопросов анализа Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск. Отзыв положительный, содержит замечания:

- 1) Из автореферата не очень понятен выбор константы, которая используется для определения границы газ-вакуум (стр. 19) и как её величина влияет на решение. По всей видимости, такая константа получена в ходе исследования вычислительных экспериментов и по порядку совпадает со значениями, используемыми в программных реализациях других авторов.
- 2) На стр. 3 следовало бы уточнить, что имеется ввиду под событиями 2013 года.
- 3) В разделе «Личный вклад автора» вместо сочетания «... результатов бал равным ...» следует использовать «... результатов был равным ...» (стр. 14).

Ответ соискателя приведен в стенограмме (стр. 14 – 15).

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** их широкой известностью своими достижениями в области математического моделирования гидродинамических процессов и разработки численных методов решения гиперболических уравнений, наличием у них публикаций по соответствующим направлениям и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

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

**разработана** новая численная трехмерная гидродинамическая модель для описания эволюции астрономических объектов на суперЭВМ;

**предложен** новый подход к математическому моделированию гидродинамических процессов в самосогласованном гравитационном поле, базирующийся на записи основных законов сохранения и на формулировке уравнения состояния для объекта исследования;

**доказана** с помощью вычислительных экспериментов адекватность предложенной гидродинамической модели эволюции астрономических объектов различных масштабов: от отдельных метеоритов на ранней стадии взаимодействия с поверхностью планет до динамики крупномасштабных космологических структур;

**введена** новая трактовка понятия уравнения состояния гидродинамической среды.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** корректность уравнения состояния упругопластической среды; состоятельность гипотезы о механизмах волнообразования и фазового

перехода при динамике кумулятивной струи, возникающих при косом соударении двух пластин; состоятельность гипотезы о сценариях эволюции и столкновения галактик в полной термодинамически согласованной модели с определением областей звездообразования в них; состоятельность гипотезы о механизмах эволюции межзвездной среды;

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** численный метод Годунова и подход к построению термодинамически согласованных моделей механики сплошных сред, в виде переопределенной системы основных законов сохранения, гарантирующей неубывание энтропии при учете условий корректности уравнения состояния;

**изложены** основные положения, преимущества, проблемы и область применимости новых гидродинамических моделей эволюции астрономических объектов различных масштабов: от отдельных метеоритов на ранней стадии взаимодействия с поверхностью планет до динамики крупномасштабных космологических структур;

**раскрыты** существенные проявления теории в части механизмов процессов волнообразования и формирования кумулятивных струй, а также фазовых переходов при косом соударении двух пластин; механизмов развития космологических структур и многорукавных структур галактик, а также различных сценариев столкновения галактик; механизмов эволюции межзвездной среды – образования молекулярных облаков и полярных течений при их коллапсе;

**изучены** причинно-следственные связи, влияющие на развитие рукавов галактик при их эволюции, на процессы столкновения галактик, образования полярных течений при коллапсе молекулярных облаков, на образование кумулятивных струй и на фазовые переходы;

**проведена модернизация** существующих математических моделей для учета различных подсеточных процессов, вычислительных методов для достижения высокого порядка точности на гладких решениях и малой диссипации решения на разрывах и параллельных алгоритмов для их реализации на различных архитектурах суперЭВМ.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены** в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) созданные диссертантом программные комплексы для расчета динамики астрономических объектов;

**определены** перспективы практического использования разработанной в диссертации численной модели трехмерных гидродинамических процессов в самосогласованном гравитационном поле, которая может быть использована специалистами в области материаловедения для принятия обоснованных решений при создании новых материалов, а специалистами в области космологии, астрофизики и геофизики для исследования механизмов образования пекулярных галактик, областей звездообразования в них, развития МГД процессов на масштабах межзвездной среды и геофизических масштабах;

**создана** система практических рекомендаций по использованию суперкомпьютерных программных комплексов с открытым кодом: Elast2d – для моделирования упругопластических деформаций, PEGAS – для моделирования астрофизических течений на суперкомпьютерах классических архитектур, GPUPEGAS – расширение комплекса PEGAS на гибридные архитектуры, оснащенные графическими ускорителями, AstroPhi – расширение комплекса PEGAS на гибридные архитектуры с ускорителями Intel Xeon Phi; программные комплексы зарегистрированы в

Фонде алгоритмов и программ СО РАН, РосПатенте и специализированной библиотеке журнала Computer Physics Communications;

**представлены** методические рекомендации и предложения по дальнейшему совершенствованию вычислительной модели для учета релятивистских эффектов, более сложных уравнений состояния и химической кинетики на различных пространственных масштабах.

### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** показана воспроизводимость результатов исследования – соответствие полученных результатов вычислительных экспериментов существующим теориям, наблюдениям и натурным экспериментам;

**теория** построена на основе фундаментальных законов гидродинамики, аппарате термодинамически согласованных моделей механики сплошных сред и вычислительной математики, согласуется с наблюдательными и экспериментальными данными по теме диссертации;

**идея базируется** на анализе практики и обобщении передового опыта ведущих российских и зарубежных исследователей в области численного моделирования гидродинамических процессов в самосогласованном гравитационном поле;

**использованы** сравнения результатов вычислительных экспериментов, полученных с помощью разработанных авторских методик, с экспериментальными данными для задач о косом соударении пластин, с наблюдательными данными для задач образования крупномасштабных космологических структур, эволюции и столкновения галактик, эволюции межзвездной среды, с результатами других авторов для задач ранней стадии взаимодействия метеорита с поверхностью планет, коллапса

молекулярных облаков, развития МГД турбулентности межзвездной среды;

**установлено** качественное и количественное соответствие полученных автором результатов с результатами экспериментов, наблюдений и с результатами, представленными в независимых источниках по рассматриваемой тематике;

**использованы** современные методики сбора тестовой информации и обработки результатов вычислительных экспериментов.

**Личный вклад соискателя состоит в:**

- разработке и исследовании корректности уравнения состояния деформируемой среды при фазовых переходах;
- реализации численного метода и проведении вычислительных экспериментов в работах по моделированию упруго-пластических деформаций;
- формулировке и обосновании гидродинамической модели астрофизических объектов;
- разработке нового численного метода высокого порядка точности и его программной реализации;
- проведении вычислительных экспериментов в работах по моделированию гидродинамических процессов в астрофизических приложениях;
- анализе и оценке результатов вычислительных экспериментов;
- подготовке публикаций по выполненным работам.

На заседании **7 февраля 2017** года диссертационный совет принял решение **присудить** Куликову И.М. **ученую степень доктора физико-математических наук.**

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **23** человек, из них **16** докторов наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, участвовавших в заседании, из **24** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за **23**, против **0**, недействительных бюллетеней **0**.

Председатель

диссертационного совета Д 003.061.02

доктор физико-математических наук,

член-корреспондент РАН, профессор

Кабанихин С.И.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 003.061.02

доктор физико-математических наук,

доцент



Сорокин С.Б.

7 февраля 2017 года