

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.165.10 на базе
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е.
Алексеева»

Министерство образования и науки Российской Федерации
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 21.10.2016 №__

О присуждении Козелкову Андрею Сергеевичу гражданину Российской Федерации степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование волн цунами космогенного и оползневого происхождения на основе уравнений Навье-Стокса» по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 06.06.2016, протокол №2 диссертационным советом Д 212.165.10 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), Министерство образования и науки Российской Федерации, 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-41, ул. Минина, 24; приказ №714/н.к. от 02.11.2012.

Соискатель Козелков Андрей Сергеевич в период подготовки диссертации обучался в очной докторантуре ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (с 1 ноября 2012 года). В 2003 году окончил факультет информационных систем и технологий (ФИСТ) Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексеева по специальности «Прикладная математика и информатика». После окончания университета поступил в аспирантуру Нижегородского государственного технического университета и в 2006 году завершил обучение по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы». В том же году на заседании диссертационного совета К 002.239.01 при Институте океанологии РАН им. П.П. Ширшова успешно защитил диссертацию на тему «Оценка опасности волн цунами для побережья бассейна Карибского моря». Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации №48к/84 от 8 декабря 2006 года ему выдан диплом ДКН №012639 о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» и в Федеральном государственном унитарном предприятии «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ») (Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»).

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор Куркин Андрей Александрович занимает должности главного научного сотрудника и заведующего кафедрой «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева».

Официальные оппоненты:

- **Левин Борис Вульфович**, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, научный руководитель ФГБУН «Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН»;
- **Исаев Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры механики ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»;
- **Доброхотов Сергей Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией механики природных катастроф ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН»

дали **положительные отзывы** о диссертации.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь в своем **положительном заключении**, подготовленном на основании заключения совместного заседания Семинара отдела теории волн ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН» и общеинститутского научного семинара ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН» от 21 сентября 2016 г., протокол № 3, подписанном доктором физико-математических наук, профессором, заведующим отделом океанографии А.Е. Букатовым, доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником, заведующим отделом теории волн С.Г. Демьшевым и, утверждённом Директором ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН», чл.-корр. НАНУ, доктором географических наук С.К. Коноваловым, указала, что *«Диссертационная работа А.С.*

Козелкова, в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение – проблема разработки физико-математических моделей и сквозной вычислительной технологии для моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения. Диссертация по содержанию и оформлению удостоверяет действующим требованиям, включая требования пп. 9, 10 – Положения о присуждении ученых степеней. В диссертации, в соответствии с п. 14 Положения о присуждении ученых степеней имеются все необходимые ссылки на авторов и источники на заимствованные материалы, в том числе – на научные работы соискателя. Каких либо признаков плагиата или недобросовестного цитирования не обнаружено. Автореферат в достаточной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям п. 25 Положения о присуждении ученых степеней. Работа соответствует заявленной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы и удовлетворяет требованиям действующего положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Козелков Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.»

Соискатель имеет 74 опубликованные работы, все по теме диссертации, включая: 2 монографии, изданные при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований; 28 статей в журналах, включенных в список ВАК и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science); 7 статей в рецензируемых журналах; 2 статьи в книгах ведущих мировых издательств; 19 статей в трудах конференций; 13 авторских свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Научные работы посвящены разработке методов и алгоритмов численного решения задач механики жидкости и газа для различных научно-технических приложений, включая фундаментальные области знаний и промышленные. Результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно. В коллективных публикациях соискателю принадлежат те части, которые использованы в диссертации.

К наиболее значимым научным работам по теме диссертации следует отнести:

1. Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Карпенко А.Г., **Козелков А.С.**, Тетерина И.В., Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках. – Москва: Физматлит, 2013, 536 с., ISBN 978-5-9221-1542-1.

2. **Козелков А.С.**, Курулин В.В., Пучкова О.Л., Лашкин С.В., Моделирование турбулентных течений с использованием алгебраической модели рейнольдсовых напряжений с универсальными пристеночными функциями // Вычислительная механика сплошных сред, 2014, т. 7, № 1, с. 40-51.
3. **Козелков А.С.**, Курулин В.В., Пучкова О.Л., Тятюшкина Е. С., Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей // Журнал Математическое моделирование, 2014, т. 26, №8, с.81–96.
4. **Козелков А.С.**, Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Курулин В.В. Моделирование цунами космогенного происхождения в рамках уравнений Навье-Стокса с источниками различных типов // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2015, №2, с. 142-150.
5. **Козелков А.С.**, Куркин А.А., Крутякова О.Л., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С., Зонный RANS–LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2015, №5, с. 24-33.
6. **Kozelkov A.**, Kurulin V., Emelyanov V., Tyatyushkina E., Volkov K., Comparison of convective flux discretization schemes in detached-eddy simulation of turbulent flows on unstructured meshes // Journal of Scientific Computing, 2016, v. 67, p. 176–191.
7. **Козелков А.С.**, Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С., Моделирование возмущений в озере Чебаркуль при падении метеорита в 2013 году // Известия РАН Механика жидкости и газа, 2015, №6, с. 134-143.
8. **Козелков А.С.**, Методика численного моделирования цунами оползневого типа на основе уравнений Навье-Стокса // Вычислительная механика сплошных сред, 2016, том 9, №2, стр. 218-236.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: 1) исполняющего обязанности заведующего кафедрой Гидравлики и гидротехнического строительства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, д.т.н., профессора И.Г. Кантаржи; 2) заместителя директора филиала - директора Проектно-исследовательского научного Центра филиала ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого» Е.П. Савельевских; 3) главного научного сотрудника ФГУ ФИЦ Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, д.ф.-м.н., профессора Т.Г. Елизаровой; 4) директора ФГБУН Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, чл.-корр. РАН, С.И. Кабанихина; 5) заведующего кафедрой

«Плазмогазодинамика и теплотехника» ФГБОУ ВО Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, д.т.н., профессора В.Н. Емельянова; 6) заведующего кафедрой «Математическое моделирование в космических системах» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов», д.ф.-м.н. Р.В. Шамина; 7) профессора Университета Южного Квинсленда (Австралия), д.ф.-м.н., профессора Ю.А. Степанянца; 8) заведующего отделом прикладной математической физики Вычислительного центра им. А.А. Дороницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, д.ф.-м.н., профессора А.И. Толстых; 9) заместителя директора по научной работе Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, д.ф.-м.н., профессора В.Ф. Тишкина; 10) первого заместителя директора Института Теоретической и Математической Физики ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», начальника математического отделения, д.ф.-м.н. Р.М. Шагалиева; 11) заведующего кафедрой «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» Санкт-Петербургского Политехнического Университета им. Петра Великого, д.ф.-м.н., профессора Е.М. Смирнова и заведующего лабораторией «Вычислительная гидроакустика и турбулентность», д.ф.-м.н., профессора М.Х. Стрельца; 12) главного научного сотрудника лаборатории анализа и оптимизации нелинейных систем Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, д.ф.-м.н., профессора Л.Б. Чубарова.

Все отзывы положительные. В них отмечается актуальность темы диссертации, оригинальность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Отзывы содержат следующие вопросы и критические замечания: в промышленно-ориентированных задачах сеточные модели для численного решения на основе уравнений Навье-Стокса с требуемой точностью состоят из нескольких миллионов, а то и десятков миллионов элементов. Какого размера сетки потребуются для моделирования цунами, например, в Тихом океане?; порядок аппроксимации разностных схем обычно определяется по тейлоровскому разложению. В этой связи представляет интерес реальный порядок точности разностных схем, используемых в расчетах, который определяется путем проведения серии расчетов на сетках различной разрешающей способности. Проводились ли такие исследования, и каким образом учитывалась природа сетки?; в автореферате упоминаются, что в первой главе содержатся

исследования в области турбулентности, однако неясно, какая же модель турбулентности использовалась в последующих главах. Более того, если какая-либо модель использовалась, остается неясным, какова роль турбулентной вязкости, в полученных результатах, учитывая, что числа Рейнольдса велики и основные эффекты определяются нелинейными членами исходных уравнений; насколько все же целесообразно в настоящее время переходить на моделирование распространения цунами уравнениями Навье-Стокса?; какие вычислительные мощности понадобятся для системных расчетов цунами по предлагаемым моделям; не указывает как соотносится созданный им базис тестовых задач для оценки качества методов расчета распространения поверхностных волн с известным набором тестовых задач для оценки качества моделей, алгоритмов и программ моделирования цунами (National Tsunami Hazard Mitigation Program: Proceedings and Results of the 2011 NTHMP Model Benchmarking Workshop. Boulder: U.S. Department of Commerce, 2012. 436 p.).

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН» является один из ведущих океанологических центров мира, выполняющих фундаментальные исследования процессов, определяющих изменчивость гидрофизических, гидрохимических, гидрооптических, ледовых полей морей и океанов и взаимодействие атмосферы и океана в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

Выбор официальных оппонентов обусловлен их компетентностью в вопросах диссертации, подтверждающейся публикациями в высокорейтинговых журналах. Официальный оппонент, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор Левин Борис Вульфович – является признанным ученым с мировым именем в области геофизики, включая проблему цунами и оползневых структур. Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор Исаев Сергей Александрович – является признанным высококвалифицированным специалистом в области разработки вычислительных технологий в задачах механики сплошной среды. Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор Доброхотов Сергей Юрьевич является признанным высококвалифицированным специалистом в области разработки аналитических решений и моделирования волн цунами.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработан** полностью неявный метод математического моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения, основанный на решении полной системы уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска для многофазных течений без расщепления, учитывающий все основные процессы течения вязкой жидкости, такие как турбулентность, теплопроводность и конвекция, предложена низкодиссипативная схема дискретизации конвективных слагаемых и проведена оценка влияния численных схем и величины шага по времени на распространение цунами, предложены оптимальные параметры метода, необходимые для обеспечения точности решения, достаточной для геофизических приложений;
- **предложен** метод, обеспечивающий корректный учет силы гравитации и расчет значений градиента давления в случае наличия разрывов в плотности среды на неструктурированной сетке, состоящей из многогранников произвольной формы, для получения корректного поля гидростатического давления предложено учитывать вклад силы гравитации в уравнении для расчета давления в виде дополнительного слагаемого, являющегося прямым дискретным аналогом поля силы тяжести, и напрямую вычислять вклад в уравнение движения градиента давления и силы гравитации;
- **предложен** базис задач для верификации и валидации методов расчета распространения поверхностных волн, а также для турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости, включая задачи верификации вихреразрешающих моделей турбулентности, для применения вихреразрешающих подходов предложена низкодиссипативная численная схема, рекомендуемая для расчетов на произвольных неструктурированных сетках;
- **впервые** для моделирования цунами в реальных акваториях Мирового океана применена технология, основанная на алгебраическом многосеточном методе, для расчета цунами многосеточным методом применены вычислительные технологии, основанные на каскадном сборе глобального уровня, не имеющие ограничений на распараллеливание и применение на высокопроизводительных системах петафлопсного класса;
- **выполнено** численное моделирование возмущений, образовавшихся при падении метеорита в озеро Чебаркуль 15 февраля 2013 года, рассчитаны характеристики волн как на чистой воде, так и с учетом льда на поверхности, выполненные численные расчеты и

оценки правильно предсказывают диаметр полыньи, наблюдаемой на озере после входа в него метеорита;

- **выявлена** закономерность изменения параметров области возмущений вблизи падения тела для различных углов входа. Показано, что изменение параметров каверны наиболее интенсивно происходит при углах падения тела в воду более 20° и подчиняется квазилинейному закону, интенсивность изменения растет по мере увеличения скорости, а тенденция линейного изменения сохраняется, падение тела в воду под углами меньше 20° происходит по другому сценарию, и при определенных условиях тело отскакивает от поверхности воды, а область возмущения имеет крайне размытые границы;

- **представлена** единая технология расчета всех стадий цунами космогенного и оползневого типа - очаг, распространение, накат, оползневой источник моделируется отдельной фазой, со своими характеристиками и отделенной поверхностью раздела от водной и воздушной фаз, выполнено сравнение результатов расчета с данными лабораторных экспериментов;

- **проведено** полевое обследование цунами оползневого происхождения на острове Монтсеррат (Карибское море), и выполнено моделирование этого цунами в рамках уравнений Навье-Стокса в сопоставлении с расчетами по уравнениям мелкой воды и нелинейно-дисперсионной теории;

- **создана** отчуждаемая технология моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения на основе уравнений Навье-Стокса на базе многофункционального пакета программ ЛОГОС, предложена технология построения сеточных моделей с выделением областей генерации цунами, позволяющая строить оптимальные трехмерные сеточные модели с учетом батиметрии океанического дна.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **разработан** полностью неявный метод математического моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения, основанный на решении полной системы уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска для многофазных течений без расщепления, учитывающий все основные процессы течения вязкой жидкости, такие как турбулентность, теплопроводность и конвекция;

- **предложена** низкодиссипативная численная схема, рекомендуемая для расчетов задач механики жидкости и газа на произвольных неструктурированных сетках;

- **предложен** метод, обеспечивающий корректный учет силы гравитации и расчет значений градиента давления в случае наличия разрывов в плотности среды на неструктурированной сетке, состоящей из многогранников произвольной формы, для получения корректного поля гидростатического давления предложено учитывать вклад силы гравитации в уравнении для расчета давления в виде дополнительного слагаемого, являющегося прямым дискретным аналогом поля силы тяжести, и напрямую вычислять вклад в уравнение движения градиента давления и силы гравитации;

- **выявлена** закономерность изменения параметров области возмущений вблизи падения тела для различных углов входа, интенсивность изменения растет по мере увеличения скорости, а тенденция линейного изменения сохраняется.

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

Разработана и внедрена в отечественный многофункциональный пакета программ ЛОГОС технология моделирования волн цунами космогенного и оползневоего происхождения на основе уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска. Предложена технология построения сеточных моделей с выделением областей генерации цунами, позволяющая строить оптимальные трехмерные сеточные модели с учетом батиметрии океанического дна.

Полученные результаты по разработке сквозной технологии расчета волн цунами несейсмического происхождения и исследованию их физических и амплитудных характеристик направлены на адекватную оценку последствий природных катастроф в прибрежной зоне и на берегу, что может быть использовано в различных задачах прогноза и при планировании строительства береговой инфраструктуры и защитных сооружений.

Внедрение в пакет программ ЛОГОС, разработанных в диссертации технологий, позволит существенно расширить его применение в решении индустриальных задач высокотехнологичных отраслей отечественной промышленности, таких как авиастроение, атомная энергетика, автомобилестроение, ракетно-космическая промышленность, судостроение и другие.

Результаты исследований, использованы при выполнении проектов РФФИ - проект № 13-07-12079офи_м «Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач газо- и гидродинамики в

индустриальных приложениях», проект №16-01-00267 «Развитие вычислительных технологий, направленных на решение фундаментальных задач и прогнозирование последствий астероидно-кометного воздействия на водную среду (2016-2018 гг.)», а также в проекте «Численное исследование нестационарных отрывных турбулентных течений и генерируемых ими акустических полей для нужд авиационной промышленности» в рамках государственного контракта № 14.514.12.0002 с Министерством образования и науки РФ; руководителем работ являлся диссертант.

Полученные результаты используются в научно-исследовательских проектах различной направленности (РФФИ, отраслевые проекты ГК «Росатом», проекты в рамках федеральных целевых программ РФ и др.), в том числе выполняемых под руководством автора диссертации.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

- обоснованность полученных теоретических и численных результатов вытекает из использования современного математического аппарата механики жидкости и вычислительной гидродинамики, а также сопоставления получаемых решений с уже известными в литературе экспериментальными натурными и лабораторными данными;
- хорошее согласие между результатами численных расчетов и надежными экспериментальными данными, также свидетельствует об обоснованности полученных результатов;
- представленные сопоставления результатов численного и натурального экспериментов свидетельствуют о возможности применения предложенных методов в проблеме цунами.

Личный вклад автора состоит в идее, разработке концепции внедрения и разработке методики расчета волн цунами, а также внедрение в пакет программ ЛОГОС. В большинстве теоретических работ и вычислительных экспериментах автору принадлежит ведущая роль на всех этапах проведения исследований. Автором лично написана большая часть статей по теме диссертации, проведены все теоретические и большая часть численных расчетов. Диссертантом лично были осуществлены все математические постановки задач, проанализированы и систематизированы полученные результаты. Диссертант является соруководителем разработки пакета программ ЛОГОС и непосредственным руководителем разработки модуля на основе алгоритма SIMPLE.

За личный вклад в разработку пакета программ ЛОГОС диссертант удостоен звания лучший молодой специалист ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (2010 г.), он является лауреатом премии ГК «Росатом» молодым ученым за научно-исследовательскую деятельность (2011 г.), является лауреатом премии ГК «Росатом» (2012 г.), а в 2013 году удостоен звания «Человек года Росатома». Все модели и методы, представленные в диссертации, реализованы в пакете программ ЛОГОС при непосредственном участии диссертанта. Все расчеты, представленные в диссертации, проведены в пакете программ ЛОГОС.

На заседании 21.10.2016 диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и принял решение присвоить Козелкову Андрею Сергеевичу ученую степень доктора физико-математических наук, так как диссертация Козелкова А.С. соответствует п. 9 «Положения» и другим критериям, установленным в разделе II «Положения»: в диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области разработки физико-математических моделей и сквозной вычислительной технологии волн цунами.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 17 докторов наук по рассматриваемой специальности, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней нет.

Председатель
диссертационного совета

Учёный секретарь
диссертационного совета

«21» октября 2016 года



Петрухин Николай Семёнович

Катаева Лилия Юрьевна