

Утверждаю:

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Морской гидрофизический институт РАН»
член-корреспондент РАНУ, д. геогр. н.

С.К. Коновалов



09

2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации, ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»,
на диссертационную работу Козелкова Андрея Сергеевича
«Моделирование волн цунами космогенного и оползневого
происхождения на основе уравнений Навье-Стокса»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук
по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

1. Вводные положения

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (НГТУ).

На отзыв ведущей организации были представлены:

- диссертация – 1 том объемом 401 лист;
- автореферат – брошюра объемом 2 печатных листа.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (338 наименований).

2. Актуальность темы диссертационной работы

Поставленная автором цель диссертации – разработка физико-математических моделей и сквозной вычислительной технологии для моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения в рамках уравнений Навье-Стокса.

Создание физико-математических моделей и вычислительных технологий для изучения движения жидкости и газа, в частности для описания таких волн, как цунами, имеет большое значение, как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. Среди природных стихий, катастрофических по своим последствиям для человечества, эти волны занимают особое место. Непосредственной причиной возникновения волн цунами чаще всего являются происходящие при землетрясениях изменения в рельефе океанического дна, приводящие к образованию крупных сбросов, провалов и т.п. Доля таких цунами составляет около 80 %. К другим причинам возникновения цунами относятся оползни, вулканические извержения и метеорологические источники, составляющие около 6, 5 и 3% соответственно от всех случаев зарегистрированных цунами. Около 7% всех цунами относят к неизвестным источникам происхождения. Возможной

причиной возникновения цунами также может служить падение небесных тел, обладающих, как правило, колоссальной кинетической энергией.

Цунами является относительно частым стихийным бедствием и занимает пятое место по величине ущерба от природных стихий. Для смягчения последствий цунами и решения задачи прогноза, необходимы комплексные исследования, направленные на изучение механизмов генерации волн цунами сейсмическими источниками, оползнями, вулканическими извержениями и падениями небесных тел. Важна разработка адекватных физико-математических моделей распространения цунами в океане от источников различного типа, а также моделей взаимодействия цунами с инфраструктурой прибрежной зоны. Эти задачи охватывают широкий круг проблем механики сплошных сред, геофизики и гидродинамики.

Современные методы исследования волн цунами основаны, как правило, на теории мелкой воды и её обобщениях. Уравнения нелинейной теории мелкой воды, реализованные численно, позволили смоделировать многие исторические цунами. Несмотря на достигнутые успехи, расчет характеристик цунами представляет собой достаточно трудную задачу, как из-за неопределенности параметров очага, так и из-за многочисленных дополнительных факторов, таких как, например, нелинейность и дисперсия. Поэтому очевиден переход к более сложным моделям описания цунами.

Наиболее полной системой уравнений, позволяющей учесть особенности цунами на всех стадиях, начиная от выхода из источника до наката на берег, является система уравнений Навье-Стокса. В общем случае данная система не имеет аналитического решения, и все решения находятся численно. Проблема дискретизации уравнений Навье-Стокса и их численное решение составляют один из ключевых этапов математического моделирования.

Для исследования всех аспектов возникновения и распространения цунами космогенного и оползневого происхождения вычислительные технологии по существу являются единственным инструментом для понимания процессов в планетарном масштабе. Развитие существующих и построение новых физико-математических моделей для реалистичного воспроизведения этих процессов представляют важную и сложную проблему для современной математической физики и механики жидкости и газа.

Таким образом, актуальность тематики диссертационного исследования Козелкова А.С. представляется обоснованной.

3. Структура и основные результаты работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении определена предметная область исследования, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов исследования.

В первой главе диссертации представлено описание существующего уровня развития вычислительных технологий в механике однофазной жидкости. Детально описано обоснование подхода численного решения уравнений Навье-Стокса, который оптимально подойдет для моделирования цунами. Описаны основные схемы дискретизации слагаемых на произвольных неструктурированных сетках. Особое внимание уделено дискретизации конвективных потоков, которые

существенно влияют на физику и точность при моделировании турбулентных течений. Предложена новая схема для конвективных слагаемых, формулировка которой выполнена таким образом, чтобы увеличить скорость сходимости решения. Представлены результаты калибровки констант для LES- и DES-моделей турбулентности с ориентацией на использование конечно-объемных методов на произвольных неструктурированных сетках. Проведено исследование применимости моделей турбулентности и схем дискретизации на неструктурированных сетках различного типа. Даны рекомендации по использованию представленных методов и характерные размеры необходимых сеточных элементов. Описан способ ускорения гидродинамических расчетов, основанный на многосеточных технологиях. Показано, что алгоритм каскадного сбора обладает всеми возможностями для расчета задач динамики жидкости на расчетных сетках миллиардной размерности. Такие технологии в отечественной практике реализованы впервые и их адаптация к проблеме расчета волн цунами, несомненно, является весьма важной. Представлено краткое описание пакета программ ЛОГОС, предназначенного для решения сопряженных трехмерных задач на параллельных ЭВМ, в котором реализованы представленные в диссертации технологии и алгоритмы. Впервые в отечественной практике проведена систематизация задач динамики жидкости, имеющих аналитическое решение или надежные экспериментальные данные. Эти задачи представлены в виде минимального базиса задач валидации для пакетов программ, моделирующих гидродинамику жидкости. Верификационная база выглядит весьма презентаивно и пакету программ, прошедшему тестирование на такой базе можно выразить доверие. Представленные в первой главе алгоритмы диссертант целиком адаптировал под расчеты космогенных и оползневых волн цунами. В мировой практике расчетов волн цунами такие технологии до настоящего времени не применялись.

В второй главе диссертации представлена адаптация разработанных в первой главе технологий для расчета течений со свободной поверхностью. При этом базовая система уравнений Навье-Стокса усложняется и записывается для моделирования многофазных течений с границей раздела. Для ее численного решения разработан оригинальный алгоритм, основанный на полностью неявной схеме и снимающий жесткие ограничения на шаг по времени. Метод основан на совместном решении уравнений сохранения импульса и неразрывности. Очень подробно приведены основные формулы дискретизации уравнений модели с использованием метода конечных объемов и основные шаги вычислительной процедуры. Представлено описание параллельной реализации метода на произвольных неструктурированных многогранных сетках с использованием многосеточных технологий, описанных в первой главе. Для верификации и валидации разработанного метода, базис валидации, описанный в первой главе, дополняется задачами механики жидкости со свободной поверхностью об обрушении плотины, о колебаниях воды в резервуаре под действием силы тяжести, об обрушении плотины на дно резервуара с препятствием, о гидравлическом ударе, о течении через шлюзовые ворота, о падении шара, параллелепипеда и капли в жидкость. На них проведена верификация предложенного метода и показано, что относительная погрешность результатов расчетов не превышает 10%, а качественная картина протекания процесса также дает хорошее согласование с экспериментом. Для возможности расчета распространения цунами на большие

расстояния (включая трансатлантические трассы) предложен оригинальный метод учета сил гравитации при наличии разрывов в плотности среды. Для получения корректного поля гидростатического давления предложено явное выделение вклада силы гравитации в уравнении для давления. Для обеспечения равновесия силы гравитации и градиента давления в случае покоя среды предложен алгоритм, основанный на замене градиента давления в уравнении движения модификацией, содержащей учет действия гравитационной силы. На примере решения задач о равновесии двухфазной среды в поле силы тяжести, колебания жидкости в поле силы гравитации и обрушения столба жидкости показано, что предложенные алгоритмы, в отличие от существующих, позволяют обеспечить прогноз корректного поля гидростатического давления, отсутствие осцилляций в поле скорости и искажения свободной поверхности. Предложены оптимальные параметры использования разработанных методов, сеточного разрешения и шага по времени для моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения.

В третьей главе диссертации обсуждается математическое моделирование в проблеме космогенных цунами. На базе методов, изложенных во второй главе, представлена технология, позволяющая совместить все стадии моделирования космогенных цунами воедино – источник, распространение и накат. Представлены результаты моделирования распространения космогенных цунами в бассейне постоянной глубины от различных источников возмущения. Показаны существенные различия в рамках моделей эквивалентного очага цунами и динамического очага с временной динамикой входа метеорита. Установлено, что при использовании динамической модели трансформация водной поверхности наиболее полно соответствует физике процесса, наблюдаемого в природе. Выявлена закономерность изменения параметров области возмущений всей толщи воды вблизи падения тела при падении тела в воду при различных углах входа и разных скоростях. Показано, что изменение параметров каверны наиболее интенсивно происходит при углах падения тела в воду более 20° и подчиняется квазилинейному закону. 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. Представлены результаты численного моделирования возмущений, образовавшихся при входе метеорита в озеро Чебаркуль, произошедшем 15 февраля 2013 года. Рассчитаны характеристики волн как на чистой воде, так и при учете льда на поверхности. Показано, что энергии фрагмента Челябинского метеорита, упавшего в воду, не достаточно для генерации больших волн и весь эффект проявляется только в месте входа метеорита в воду. Выполненные численные расчеты и оценки правильно предсказывают диаметр полыньи, наблюдаемой на озере после входа в него метеорита.

В четвертой главе диссертации разработанный подход на базе уравнений Навье-Стокса применяется для моделирования волн цунами оползневого происхождения. На примере моделирования оползневого исторического цунами продемонстрированы все этапы применения разработанных в диссертации методов. При этом акцент делается на моделирование цунами в реальных акваториях Мирового океана – для этого диссертантом разработана технология построения трехмерных сеточных моделей с учетом батиметрических данных. Технология реализована в отчуждаемом виде в пакете программ ЛОГОС. Для цунами

оползневого типа проведена дополнительная верификация методов, разработанных диссертантом на задачах о сходе в воду надводного и частично-погруженного оползня, имеющих экспериментальные данные. Также на примере данных задач продемонстрирована возможность моделирования всех стадий цунами оползневого типа – образование, распространение и накат в рамках единой модели. Сравнение с записями мареографов показывает, что модель хорошо описывает процесс схода оползня и распространения цунами. Представлены результаты полевых работ, выполненных при непосредственном участии диссертанта, по обследованию следов цунами, вызванного извержением вулкана Суфриер на острове Монтсеррат в ночь 12 – 13 июля 2003 года. Получены уникальные данные о данном событии на островах Монтсеррат, Гваделупа и Антигуа. Высота волны цунами по измерениям составляет 4 м на острове Монтсеррат и 1 м на острове Гваделупа. Выполнено численное моделирование этого события в рамках теории мелкой воды, нелинейно-дисперсионной теории, а также на основе многофазных уравнений Навье-Стокса. Результаты по всем подходам сравнивались между собой. Подход, основанный на уравнениях Навье-Стокса гораздо ближе к наблюдениям.

В заключении приведены основные результаты работы.

Содержание отдельных разделов диссертационной работы особых возражений не вызывает.

4. Научная новизна основных результатов работы

На основании рассмотрения диссертации и опубликованных в периодических изданиях научных трудов автора можно выделить следующие наиболее существенные результаты исследований, обладающие научной новизной:

1. разработанный неявный метод математического моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения, основанный на решении полной системы уравнений Навье-Стокса для многофазных течений без расщепления, учитывающий основные процессы течения вязкой жидкости - турбулентность, теплопроводность и конвекция.
2. разработанный 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.
3. закономерность изменения параметров области возмущений вблизи падения тела для различных углов входа.
4. единую технологию расчета всех стадий цунами космогенного и оползневого типа – очаг, распространение, накат.
5. отчуждаемую технологию моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения на основе уравнений Навье-Стокса на базе многофункционального пакета программ ЛОГОС.

5. Обоснование и достоверность результатов работы

Обоснованность и достоверность полученных теоретических и прикладных результатов и выводов работы сомнений не вызывают и обеспечиваются использованием современного математического аппарата механики жидкости и вычислительной гидродинамики и сопоставлением 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 и свидетельствуют о возможности применения предложенных методов в проблеме цунами.

7. Практическая значимость полученных в диссертации результатов

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. Они могут быть использованы в различных задачах диагноза и прогноза и для планирования строительства береговой инфраструктуры и защитных сооружений.

Внедрение в пакет программ ЛОГОС, разработанных в диссертации технологий, позволит существенно расширить его применение в решении промышленных задач высокотехнологичных отраслей отечественной промышленности.

8. Соответствие работы заявленной специальности

Работа соответствует специальности и, в частности, пунктам 14, 18 и 19 паспорта специальности.

9. Апробация результатов работы

Уровень апробации результатов диссертационной работы на международных и российских научных и научно-технических конференциях, а также их опубликования в периодических научных изданиях представляется вполне достаточным и удовлетворяет требованиям п. 11 и 13 Положения о присуждении ученых степеней. Автором (лично и в соавторстве) опубликовано 75 трудов, в числе которых 29 статей в ведущих рецензируемых научных журналах входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

За исследования в области разработки вычислительных технологий механики жидкости и газа и их внедрение в научно-промышленную деятельность диссертант удостоен премии ГК «Росатом» молодым ученым за научно-исследовательскую деятельность (2011 г.) и премии ГК «Росатом» (2012 г.). В 2013 году диссертант удостоен звания «Человек года Росатома».

10. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты работы рекомендуются к использованию в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Институте вычислительной математики РАН, Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институте механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Институте водных проблем РАН, Морском гидрофизическом институте РАН, Институте прикладной физики РАН, Институте прикладной математики ДВО РАН, Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН и других организациях, при решении задач связанных с моделированием волн цунами космогенного и оползневого происхождения в рамках уравнений Навье-Стокса.

Отдельные положения и выводы рекомендуется использовать в учебном процессе ВУЗов при подготовке специалистов и магистров по направлениям Прикладная математика, Механика, Океанология.

Представляется целесообразным продолжение работ по данной тематике, в том числе с участием и под руководством автора.

11. Замечания по диссертации

1. Автор никак не анализирует, какова будет степень погрешности при расчёте геофизических явлений на продолжительное время описываемыми в диссертации схемами.
2. В диссертации не анализируется возможность применения подстраиваемых под решение дробных сеток, которые существенно повлияли бы на время расчёта задачи в целом.
3. Разработанная в диссертации модель является перспективной для моделирования многих геофизических процессов, однако, автор ограничивается только приложением модели к цунами. Было бы неплохо проанализировать применимость модели для расчёта таких геофизических явлений, как внутренние волны, краевые волны, штормовые нагоны, приливные течения и т. д.
4. В диссертации не приводится сравнение расчетов с реальными мареографными данными для конкретных цунами.
5. В работе приводятся достаточно хорошее сравнение вычислительных и экспериментальных результатов, которые суммированы в базе данных верификационных задач, а также приводятся сравнения с некоторыми аналитическими решениями. Однако автор никак не анализирует сопоставимость поведения свойств аналитического и численного решения.

Отмеченные недостатки не оказывают решающего влияния на оценку работы.

12. Заключение

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 оползневоего происхождения.

Диссертация по содержанию и оформлению удовлетворяет 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 заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя. Каких-либо признаков плагиата или недобросовестного цитирования не обнаружено.

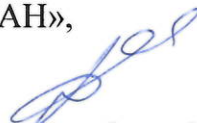
Автореферат диссертации в достаточной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям п. 25 Положения о присуждении ученых степеней.

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 ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв подготовлен на основании заключения совместного заседания Семинара отдела теории волн ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН» и Общеинститутского научного семинара ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН» 21 сентября 2016 г., протокол №3.

Заведующий отделом теории волн
ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник


23.09.2016

С.Г. Демышев

Заведующий отделом океанографии
ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»,
доктор физико-математических наук,
профессор


23.09.2016

А.Е. Букатов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Морской гидрофизический институт РАН»
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
(8692)54-04-52, director@mhi-ras.ru

Подписи С.Г. Демышева, А.Е. Букатова заверяю:

Ученый секретарь

ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»





Д.В. Алексеев

23.09.2016