

СУПЕРВЫЧИСЛЕНИЯ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ ГЕОФИЗИКИ — ЦУНАМИ

А. С. Козелков^{1,2}, Р. М. Шагалиев¹, С. М. Дмитриев², Ю. Н. Дерюгин¹,
А. А. Куркин², Е. Н. Пелиновский²

¹ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
(ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ»), 607188, Саров*

² *Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.А. Алексеева
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603950, Нижний Новгород*

УДК 517.968

В работе представлен полностью неявный метод расчета уравнений Навье–Стокса для многофазных течений. Для задач геофизики, каковыми являются и волны цунами, масштаб существенно отличается от индустриального — это тысячи километров и часы протекания физического явления, которое необходимо моделировать. Применение классического метода SIMPLE, включающего явную составляющую, накладывает определенные ограничения как на шаг по времени, так и на сходимость решения. В индустриальных приложениях, это свойство алгоритма SIMPLE не столь критично из-за относительно малых времен расчета. В задачах же геофизики эти ограничения уже будут играть существенную роль. Описана параллельная реализация предложенного метода в пакете программ ЛЮГОС, основанная на многосеточном методе, который позволяет существенно ускорить вычислительную процедуру с весьма эффективным распараллеливанием на нескольких тысячах процессоров

Ключевые слова: параллельная реализация, цунами, геофизика, многосеточный метод

Введение

Создание физико-математических моделей и вычислительных технологий для изучения движения жидкости и газа, в частности для описания таких грандиозных 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 6 % 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, решения задач прогнозирования, необходимы комплексные исследования, направленные на изучение механизмов генерации волн цунами сейсмическими источниками, оползнями, вулканическими извержениями и падениями небесных тел. Необходима разработка адекватных физико-математических моделей распространения цунами в океане переменной глубины от источников различного типа, а также моделей взаимодействия цунами с инфраструктурой прибрежной зоны. Эти задачи охватывают широкий круг проблем механики сплошных сред, геофизики, гидродинамики и других разделов науки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проекта №16-01-00267, №17-05-00067).

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, а также их численное решение составляют один из ключевых этапов математического моделирования. В настоящее время система уравнений Навье–Стокса для моделирования волн цунами практически не применяется. 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. Многие из таких процессов, такие как высокоскоростные соударения и падения, плавление, излучение, обрушение, испарение и другие, невозможно воспроизвести в лабораторных условиях на Земле. Развитие существующих и построение новых физико-математических моделей для реалистичного моделирования этих процессов представляют достаточно актуальную и сложную проблему для современной математической физики и механики жидкости и газа. Уровень развития в этой области находится на самой начальной стадии, поскольку численные расчеты двумерных, а тем более трехмерных, физико-математических задач весьма трудоемки и сводятся к описанию лишь отдельных стадий и обособленных процессов.

Проблема описания цунами несейсмического происхождения включает ряд гидродинамических задач, для которых требуется развитие новых и адаптация уже существующих вычислительных технологий:

1. Возбуждение цунами несейсмического происхождения — падение небесного тела, эксплозивные извержения вулканов, сход в воду селей и оползней. На этой стадии необходимо выявить связь параметров в очаге с полем начального смещения водной поверхности.
2. Выяснение основных факторов, влияющих на распространение сильно нелинейных волн цунами в открытом океане, — взаимодействие с воздушными потоками и неровностями дна.
3. Обрушение и накат цунами на берег. Исследование особенностей шельфовой зоны, влияющей на усиление волны, а также воздействие волны на инфраструктуры побережья.

Существующие стратегии численного моделирования цунами несейсмического происхождения, как, впрочем, и сейсмического, подразумевают использование различных моделей на разных стадиях, от образования начального возмущения на поверхности до наката волн на сушу. Современный уровень развития вычислительных технологий, которые уже применяются в инженерной практике при проектировании высокотехнологичных технических изделий, позволяет перевести моделирование в проблеме цунами на качественно новый уровень. Адаптация и доработка существующих алгоритмов численного решения уравнений Навье–Стокса позволит объединить моделирование всех стадий цунами воедино, что, несомненно, скажется на качестве исследований процесса в целом. Уровень развития схем дискретизации позволит с достаточной детализацией описывать требуемые отдельные физические и амплитудные характеристики, а адаптация существующих суперкомпьютерных технологий ускорения расчета позволит в приемлемые сроки просчитать распространение цунами на любые расстояния. Накопленный к настоящему времени обширный фонд, содержащий разнообразные теоретические, численные экспериментальные материалы по методам решения уравнений Навье–Стокса, требует адаптации к проблеме моделирования волн цунами. Для изучения процессов и прогностического моделирования цунами несейсмического происхождения необходимо разработать вычислительную технологию, вбирающую весь существующий опыт вычислительной гидродинамики.

1 Описание модели

В работе представлен полностью неявный метод расчета уравнений Навье–Стокса для многофазных течений [1, 2]. Для задач геофизики, каковыми являются и волны цунами, масштаб существенно отличается от индустриального — это тысячи километров и часы протекания физического явления, которое необходимо моделировать. Применение классического метода SIMPLE, включающего явную составляющую, накладывает определенные ограничения как на шаг по времени, так и на сходимость решения. В индустриальных

приложениях, это свойство алгоритма SIMPLE не столь критично из-за относительно малых времен расчета. В задачах же геофизики эти ограничения уже будут играть существенную роль. Поэтому для адаптации этого метода к моделированию волн цунами в реальных акваториях Мирового океана, кроме обобщения его на случай многофазных течений, необходимо сделать полностью неявную модификацию, тем самым сняв жесткие ограничения на шаг по времени и повысив сходимость итерационного процесса. Описана параллельная реализация предложенного метода в пакете программ ЛОГОС, основанная на многосеточном методе [3, 4], который позволяет существенно ускорить вычислительную процедуру с весьма эффективным распараллеливанием на нескольких тысячах процессоров [5].

2 Результаты

2.1 Верификация метода

Представлены результаты верификации метода для расчета цунами оползневого Пипа на примере моделирования схода надводного и подводного оползня. Данные задачи являются международными тестами, имеющими экспериментальные данные. Схематично конфигурации экспериментов изображены на рис. 1.

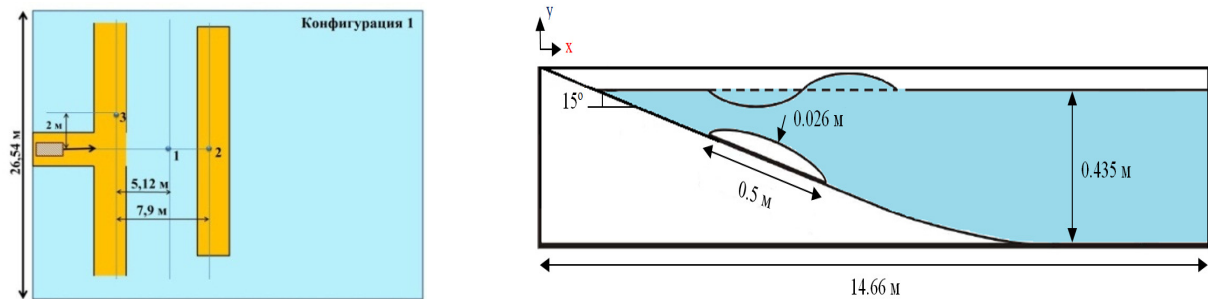


Рис. 1: Схема экспериментов: слева — надводный оползень (— расположение оползня, — расположение мареографов), справа — подводный оползень

Для моделирования в обоих случаях использовалась расчетная сетка, состоящая примерно из 10 млн. ячеек (рис. 2) и построенная по специальной технологии [2, 6]. В области схода оползня и распространения волны сетка имеет сгущение для более точного описания движения оползня и характеристик течения

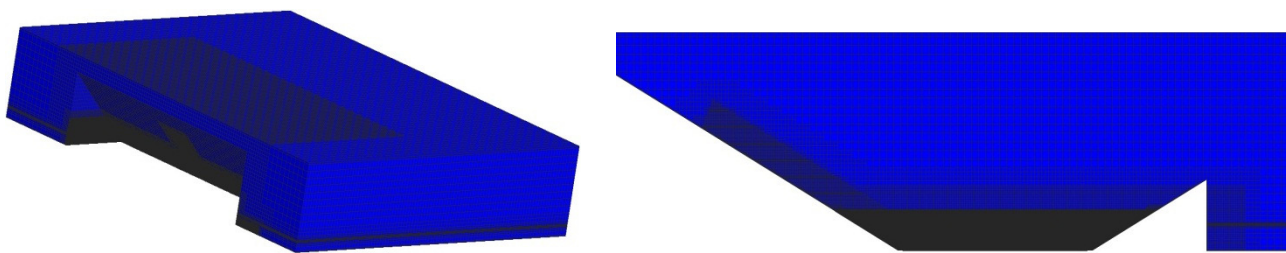


Рис. 2: Расчетная сетка (слева — общий вид, справа — сечение)

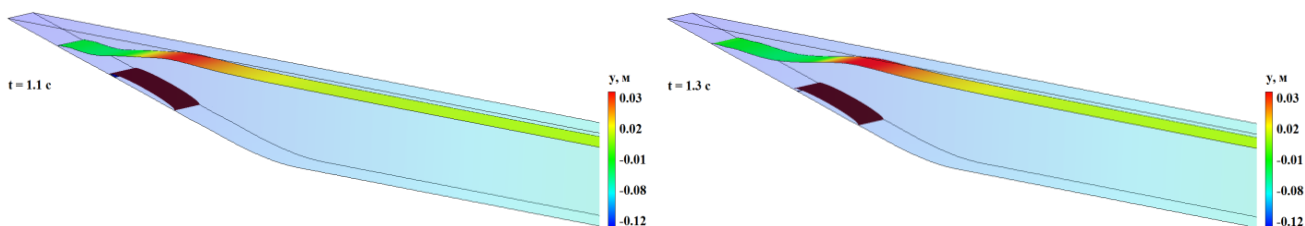


Рис. 3: Расчетная сетка (слева — общий вид, справа — сечение)

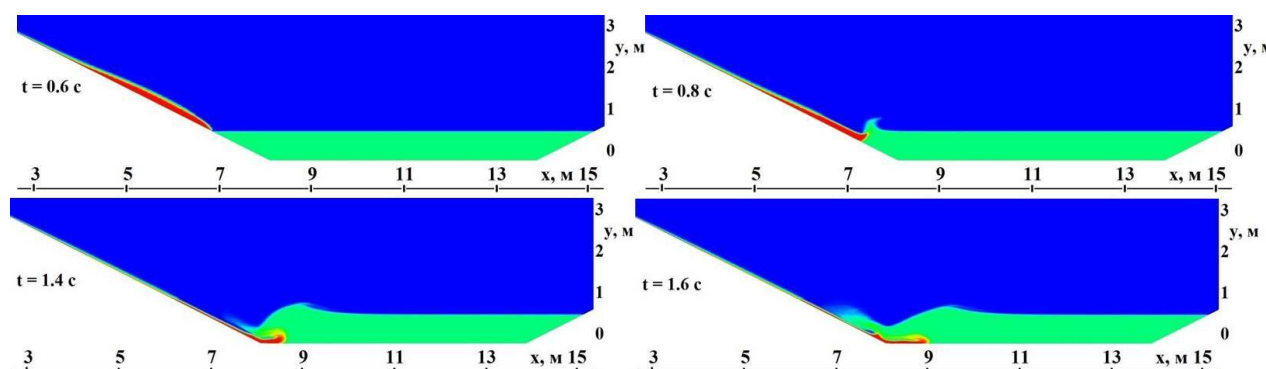


Рис. 4: Изменение уровня воды в бассейне при сходе надводного оползня

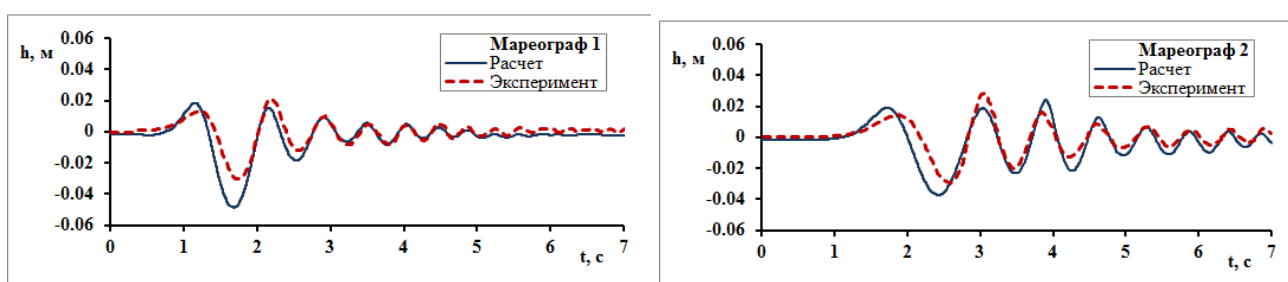


Рис. 5: Сравнение мареографных записей для схода подводного оползня

Параметры всех трех фаз — воды, воздуха и оползня — выбирались в соответствии с натурными экспериментами. На рис. 3 приведены результаты моделирования схода подводного оползня, а на рис. 4 — надводного, а на рис. 5 и 6 сравнение мареографных записей, полученных в ходе эксперимента и расчета. Как видно из этих графиков, результаты моделирования достаточно неплохо согласуются с экспериментом.

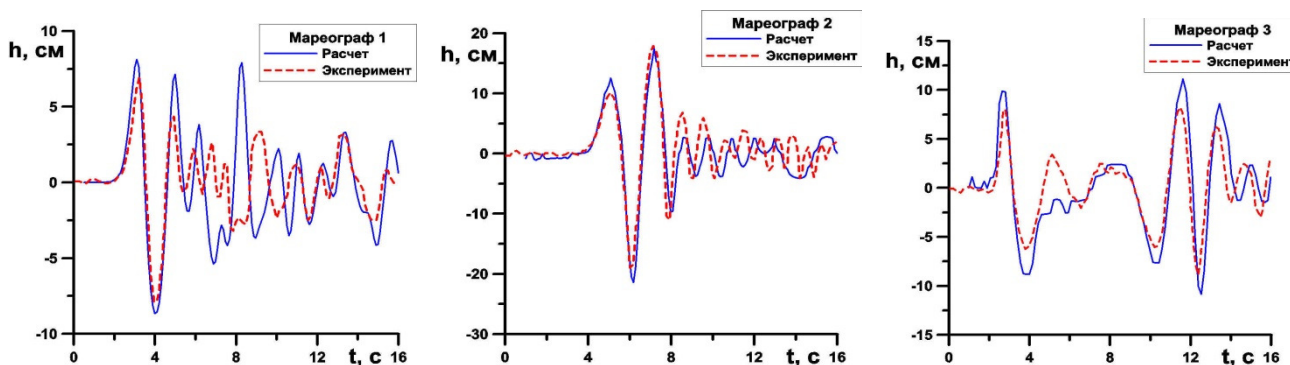


Рис. 6: Сравнение мареографных записей для схода надводного оползня

2.2 Монтсерратское цунами 2003 года

Представлены результаты моделирования Монтсерратского цунами 2003 года [7] на основе трех подходов — решения нелинейных уравнений мелкой воды (TUNAMI), решения уравнений нелинейно-дисперсионной теории (GEOWAVE) и решения уравнений Навье–Стокса (ЛОГОС). Результаты, полученные по всем трём методам с идентичным источником, сопоставляются между собой (рис. 7)

Получаемые в результате моделирования количественные характеристики волновой картины в бассейне можно оценить по мареографным данным (рис. 8). Наиболее близкое совпадение дают уравнения Навье–Стокса и уравнения нелинейно-дисперсионной теории. Первые приходящие волны на всех мареографах ре-

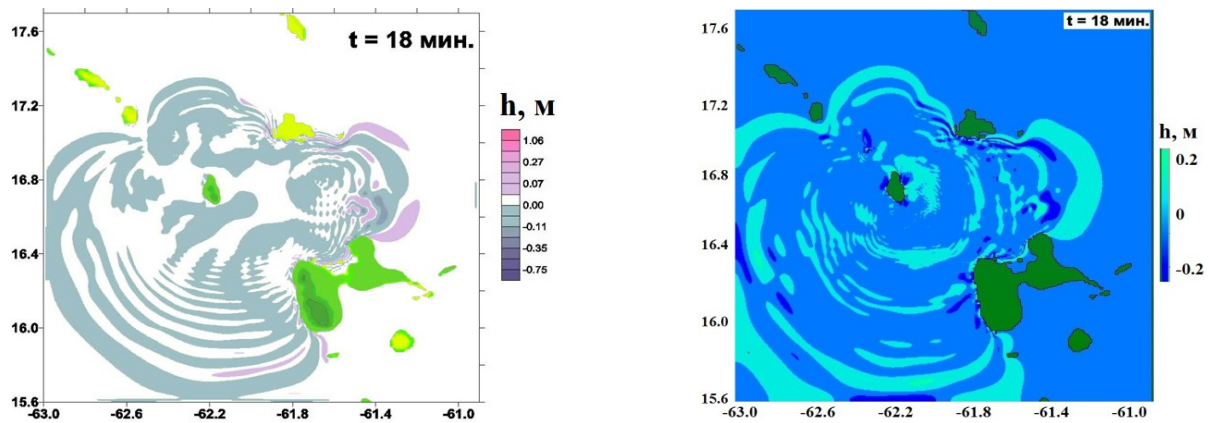


Рис. 7: Волновые картины распространения цунами на различные моменты времени — GEOWAVE (слева) и расчеты по ЛОГОС (справа)

гистрируются одинаково точно и примерно одной и той же высоты — результат, полученный по ЛОГОС, располагается где-то по «золотой» середине между TUNAMI и GEOWAVE. Во всех трех мареографах для первой волны «мелкая вода» дает чуть завышенный результат. Основные различия в высотах начинают наблюдаться позже, причем модели дают разные результаты. ЛОГОС и GEOWAVE дают практически схожий результат для «первых» волн отрицательной амплитуды, TUNAMI же «замечает» их гораздо позже.

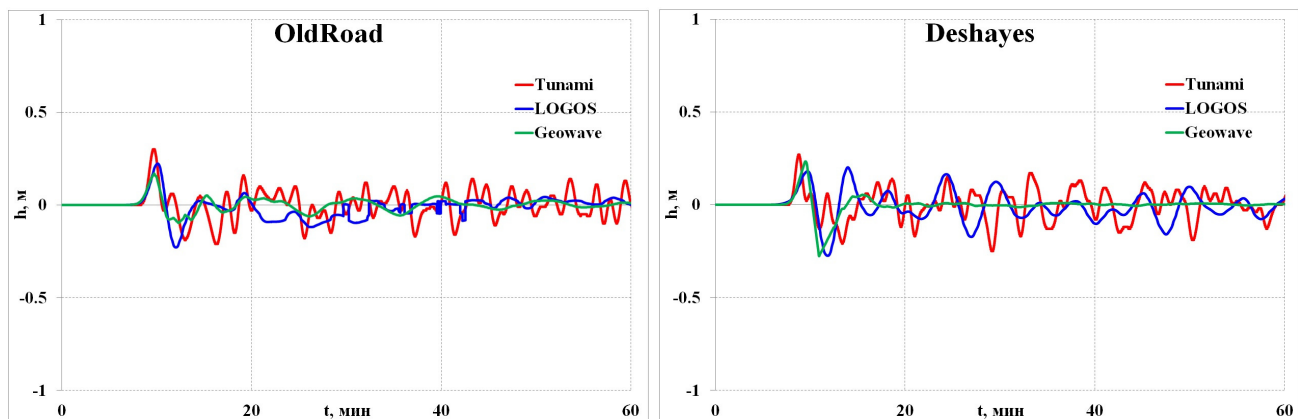


Рис. 8: Сравнение записей мареографов на острове Гваделупа и Антигуа

На рис. 9 продемонстрирована трехмерная волновая картина в области входа оползня. Как можно видеть, модель, основанная на уравнениях Навье–Стокса, дает более детальную картину схода, нежели ранее рассмотренные модели. Двигаясь по склону горы, оползень принимает форму его рельефа, точно огибая все его особенности.

2.3 Падение метеорита в озеро Чебаркуль в 2013 году

Представлены результаты моделирования падения метеорита в озеро Чебаркуль в 2013 году[8]. Численные эксперименты по генерации волн цунами проводились как на чистой воде, так и с учетом ледовой поверхности. Все параметры экспериментов соответствовали наблюдаемому падению. Примерно через 30 секунд после падения волна достигает ближайшего берега и ее высота составляет около 10 см. На момент времени 45 секунд отчетливо видно отражение волны от берега. Через 90 секунд после падения волна практически затухает и до противоположного берега не доходит (рис. 10).

Для оценки разрушения ледового покрова и возможной зоны заплеска воды на поверхность льда представлены результаты моделирования идеализированного случая падения метеорита в уже пробитое отверстие на поверхности льда. При падении метеорита в отверстие высота образовавшегося султана составляет

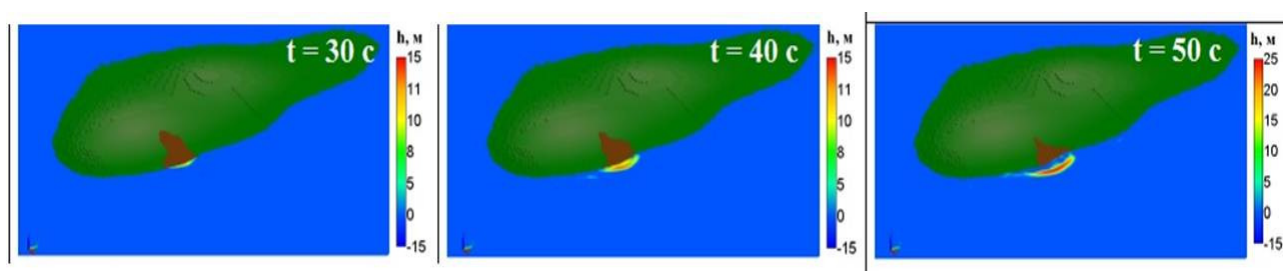


Рис. 9: Трехмерная картина схода оползня

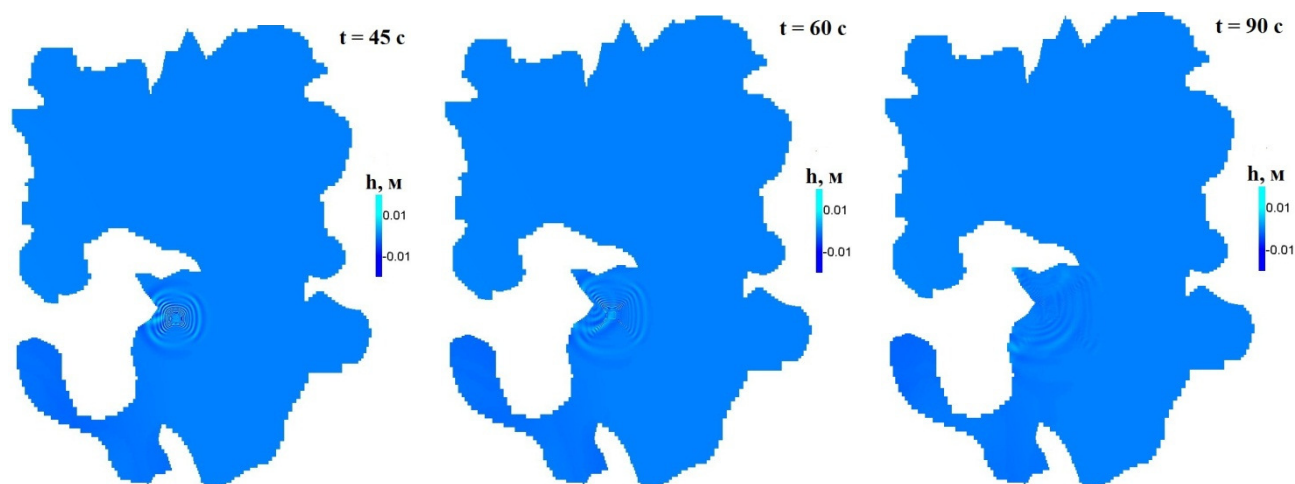


Рис. 10: Распространение цунами по озеру Чебаркуль

более десяти метров и наблюдается в момент времени 0.2 с. При этом султан поднимается практически вертикально вверх без уклона в какую-либо сторону. Большая часть этого султана состоит из брызг, а высота выброса основной массы воды составляет около 2,5 м (рис. 11).

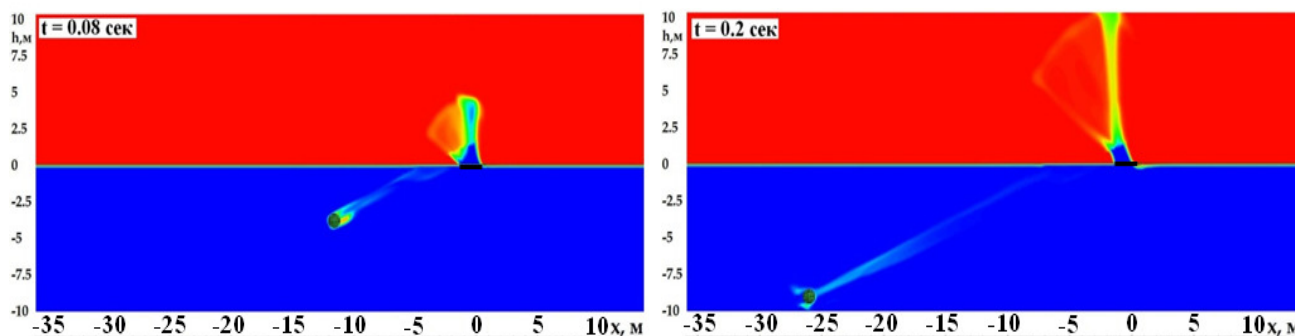


Рис. 11: Возмущение объемной доли (синим — вода, красным — воздух) в сечении расчетной области с учетом ледовой поверхности

Во время челябинского события размер образовавшейся полыньи был в несколько раз больше диаметра самого метеорита, то есть вокруг области падения наблюдалось разрушение ледового покрова на площади гораздо большей, чем площадь столкновения. Для анализа этого явления необходимо исследовать картину распределения давления в исследуемой области. На рис. 12 представлены картины распределения давления во всей расчетной области на разные моменты времени при прохождении метеоритом толщи воды.

Сразу после вхождения метеорита в жидкости наблюдается ударная волна, порождающая зону повышенного давления около ледовой поверхности (точка 4). Около самого тела жидкость движется ускоренно

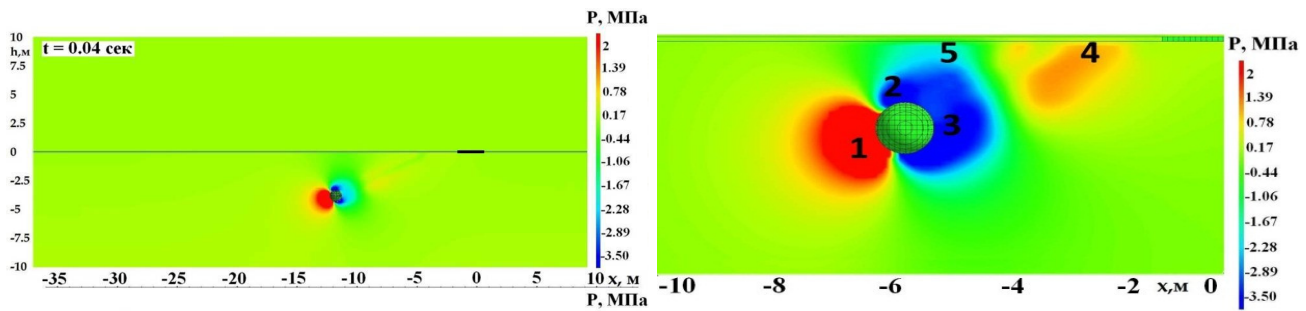


Рис. 12: Поле давления в расчетной области (горизонтальная линия — лед, черная короткая полоска — область входа)

от точки 1 (точка торможения) до точки 2 (и симметричная ей точка на другой стороне тела). В точке торможения давление максимально. По мере отдаления от середины тела (точка 2) происходит замедление движения и давление понижается, а на задней стороне тела (около точки 3) давление вновь повышается, но в очень узкой зоне. Картина распределения давления показывает зону возможного разрушения льда, которая состоит из двух областей — зоны повышенного давления в области ударной волны (точка 4) и зоны пониженного давления, образовавшейся после прохождения тела (точка 5). При этом в зоне повышенного давления возможное разрушение льда будет наблюдаться при выталкивании его вверх, а в зоне пониженного давления возможное разрушение будет происходить при движении его вниз. Оценку разрушения ледового покрова можно сделать на основе эмпирических данных и с большой долей вероятности можно утверждать, что в этом месте ледяной покров был разрушен в зоне, равной примерно 6 м от области непосредственного падения, т.е. общий размер полыньи, полученный в расчетах, составляет около 7 м, что хорошо согласуется с наблюдаемыми данными.

Список литературы

- [1] Козелков А.С., Мелешкина Д.П., Куркин А.А., Тарасова Н.В., Лашкин С.В., Курулин В.В. Полностью неявный метод решения уравнений Навье–Стокса для расчета многофазных течений со свободной поверхностью // Вычислительные технологии, 2016, т. 21, №5, с. 4–76.
- [2] Козелков А.С. Методика численного моделирования цунами оползневой типа на основе уравнений Навье–Стокса // Вычислительная механика сплошных сред, 2016, том 9, №2, стр. 218–236.
- [3] 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, 536с.
- [4] Козелков А.С., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С., Пучкова О.Л., Лашкин С.В. Реализация метода расчета вязкой несжимаемой жидкости с использованием многосеточного метода на основе алгоритма SIMPLE в пакете программ ЛОГОС, журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2013, вып. 4, стр. 44–56.
- [5] Козелков А.С., Шагалиев Р.М., Курулин В.В., Ялозо А.В., Лашкин С.В. Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях // Вычислительная математика и математическая физика, 2016, том 56, № 8, с. 154–165.
- [6] Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Tyatyushkina E.S., Kurulin V.V., Tarasova N.V., Landslide-type tsunami modelling based on the Navier-Stokes Equations // Science of tsunami Hazards, Journal of Tsunami Society International, 2016, vol. 35, № 3, p. 106–144.
- [7] Pelinovsky E., Zahibo N., Dunkly P., Edmonds M., Herd R., Talipova T., Kozelkov A.S., Nikolkina I. Tsunami generated by the volcano eruption on July 12–13, 2003 at Montserrat, Lesser Antilles // Science of Tsunami Hazards, 2004, v. 22, № 1, p. 44–57.

- [8] 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.

Козелков Андрей Сергеевич — д.ф.-м.н., заместитель начальника отдела, начальник научно-исследовательской лаборатории Института теоретической и математической физики ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ»; старший научный сотрудник кафедры «Прикладная Математика» Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.А. Алексеева;
e-mail: askozelkov@mail.ru;

Шагалиев Рашид Мирзагалиевич — д.ф.-м.н., заместитель директора ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», заместитель научного руководителя ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», первый заместитель директора Института теоретической и математической физики ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ» по вопросам математического моделирования и вычислительным системам;
e-mail: RMShagaliy@vniief.ru.

Дмитриев Сергей Михайлович — д.т.н., профессор, ректор Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.А. Алексеева,
e-mail: dmitriyev@ntu.ru.

Куркин Андрей Александрович — д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная Математика», Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.А. Алексеева;
e-mail: aakurkin@gmail.com.

Пелиновский Ефим Наумович — д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Прикладная Математика», Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.А. Алексеева;
e-mail: pelinovsky@gmail.com.

Дата поступления — 26 мая 2017 г.