

18. 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.
19. 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.
20. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978.
21. Rusche H. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at high phase fraction: PhD thesis, Imperial College of Science, Technology & Medicine, Dep. of Mech. Eng., London. 2002.
22. Talaia M. A. R. Terminal velocity of a bubble rise in a liquid column // International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering. 2007. Vol. 1, N 4.
23. Cuenot B., Magnaudet J., Speranto B. The effect of slightly soluble surfactants on the flow around a spherical bubble // J. Fluid Mech. 1997. Vol. 339. P. 25–29.
24. Esmaeeli A., Tryggvason G. Direct numerical simulation of bubbly flows. Part 2. Moderate Reynolds number array // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 385. P. 325–358.
25. Baz-Rodriguez S., Aguilar-Corona A., Soria A. Rising velocity for single bubbles in pure liquids // Revista Mexicana de Ingenieria Quimica (Mexico). 2012. Vol. 11, N 2. P. 269–278.

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*

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –

Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

²Нижегородский государственный технический университет

им. Р. А. Алексеева, г. Нижний Новгород

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00267, 15-45-02061).

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.

Современные методы исследования волн цунами основаны, как правило, на теории мелкой воды и ее 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 оползневоего 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, взрывные 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 происхожде-

ния необходимо разработать вычислительную технологию, вбирающую весь существующий опыт вычислительной гидродинамики.

Основной целью является разработка физико-математических моделей и сквозной вычислительной технологии для моделирования волн цунами космогенного и оползневого происхождения. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- разработка методики расчета волн цунами космогенного и оползневого происхождения на основе уравнений Навье–Стокса;
- внедрение существующих методов ускорения гидродинамических расчетов для эффективного использования разрабатываемой технологии при моделировании распространения цунами на любые расстояния на системах петафлопсного класса;
- систематизация задач и разработка базы данных, содержащей минимальный базис задач валидации, предназначенных для тестирования и калибровки методов расчета распространения волновых возмущений;
- верификация метода на примере задач, имеющих достоверные экспериментальные данные;
- анализ данных произошедших событий и апробация разработанных технологий на примере моделирования цунами, возникшего в ходе астероидно-кометного взаимодействия;
- анализ данных произошедших событий и апробация разработанных технологий на примере моделирования цунами, возникшего в ходе схождения оползня со склонов надводных вулканов.

В первом разделе представлен полностью неявный метод расчета уравнений Навье–Стокса для многофазных течений. Для задач геофизики, каковыми являются и волны цунами, масштаб существенно отличается от промышленного – это тысячи километров и часы протекания физического явления, которое необходимо моделировать. Применение метода SIMPLE, представленного в первой главе, включающего явную составляющую, накладывает определенные ограничения как на шаг по времени, так и на сходимость решения. В промышленных 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.

Представлены уравнения Навье–Стокса для многофазных течений и описание полностью неявного метода их дискретизации. В отличие от классического алгоритма SIMPLE, который осуществляет связь скорости и давления *полуявно*, здесь представлен совмещенный алгоритм решения скоростей и давления. Совмещение осуществляется за счет неявной дискретизации слагаемых градиента давления и массового потока в уравнениях сохранения импульса и неразрывности, что позволяет избежать шагов предиктора и корректора. Получаемые таким образом неявные коэффициенты суммируются в одну общую диагонально-доминантную матрицу, которую целесообразно решать с использованием многосеточных методов. Представлены основные формулы дискретизации уравнений полностью неявным методом, вид коэффициентов, а также основные шаги вычислительной процедуры. Для уравнения переноса объемных долей описаны «сжимающие» схемы, позволяющие точно отслеживать движение границы раздела сред многофазной системы.

Описана параллельная реализация предложенного метода в пакете программ ЛОГОС. Алгоритм распараллеливания подразумевает использование фиктивных ячеек, которые представляют собой временные копии реальных счетных ячеек, распложенных на соседнем процессе и используемых для удобства реализации счетных параллельных алгоритмов. При синхронизации данных происходит пересылка значений в фиктивные ячейки из их действительных прообразов с соответствующих MPI-процессов (рис. 1 слева).

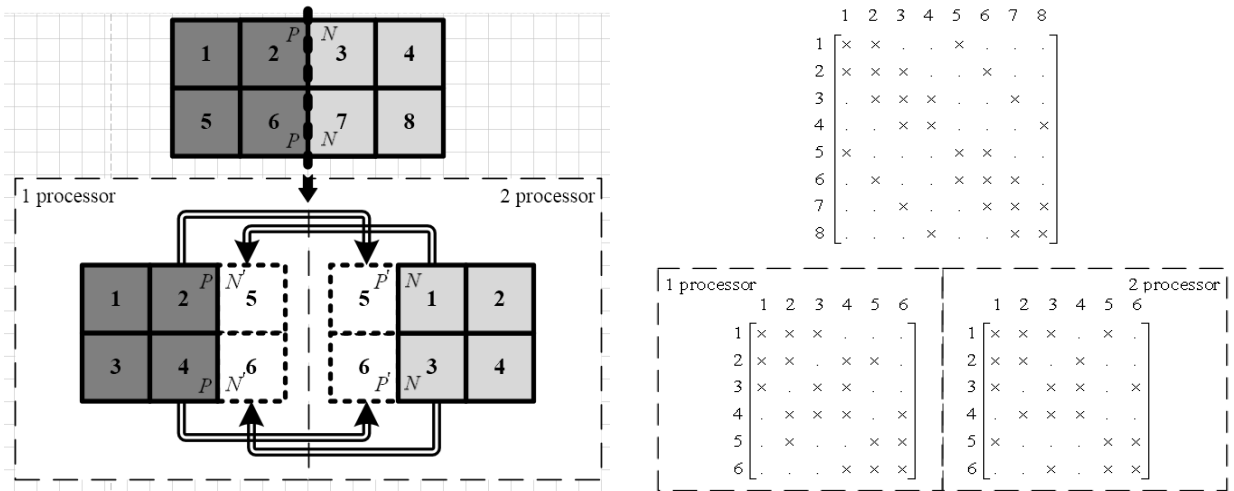


Рис. 1. Слева – пример декомпозиции расчетной модели из 8 контрольных объемов; справа – портреты матриц СЛАУ давления в однопроцессорном (справа сверху) и двухпроцессорном (справа снизу) вариантах. Элементы фиктивной матрицы выделены пунктиром, символ «x» означает наличие связи между ячейками, символ «.» означает отсутствие связи

Параллельная реализация решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающей в результате дискретизации полностью неявным методом, основывается на многосеточных технологиях (рис. 8 справа). Получаемая матрица СЛАУ в данном случае является векторной и требует модификации многосеточного алгоритма, используемого для однофазной системы. Основная модификация заключается в переопределении операций умножения, деления и в способе хранения коэффициентов матрицы. Операция умножения заменяется на операцию умножения матрицы на вектор, а операция деления – на вычисление обратной матрицы. Для хранения коэффициентов используются те же массивы, но с длиной, увеличенной в количество раз, равное размеру блока. Соответственно доступ к коэффициентам организован со смещением, равным размеру блока. Такая модификация позволяет решать матрицы с произвольным размером блока, в том числе равным единице (однофазный вариант). Для обоснования выбора оптимальных настроек многосеточного решателя, обеспечивающих минимальное количество итераций, приводятся результаты численных экспериментов турбулентного течения в плоском асимметричном диффузоре, развитого турбулентного течения в канале и течения в канале с обратным уступом. Представлены результаты оценки эффективности распараллеливания метода на задачах течения в канале за обратным уступом и задаче об обрушении плотины на дно резервуара с препятствием, которые показывают весьма неплохую масштабируемость при использовании тысячи процессоров (таблица). Также оценка эффективности полностью неявного метода в сравнении с классическим алгоритмом SIMPLE. Показано, что сходимость предложенного полностью неявного метода достигается за 200 итераций, тогда как для сходимости классического алгоритма SIMPLE требуется почти в пять раз больше итераций (рис. 2). Эффективность предложенного метода налицо.

Практически все течения со свободной поверхностью – нестационарные, поэтому основная цель валидации сводится к необходимости сравнения с экспериментальными данными физических характеристик на определенный момент времени или оценке временного периода их колебаний. Здесь представлено решение нескольких задач. В результате проведения валидации представленного полностью неявного метода решения уравнений Навье–Стокса было проведено сравнение физических характеристик на определенные моменты времени, полученных по результатам численного моделирования, с экспериментальными данными. Относительная погрешность результатов для всех расчетных случаев не превышает 10 %, что говорит о возможности применения разработанного метода для моделирования задач гидродинамики со свободной поверхностью. Для многих из представленных здесь задач, скорее всего, погрешность можно уменьшить путем измельчения сетки и подбором численных схем. Качественная картина протекания процесса также дает хорошее

согласование с экспериментом. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что предлагаемая модель позволяет с достаточной точностью прогнозировать динамику процессов, происходящих при движении жидкости со свободной поверхностью.

Эффективность параллельной реализации

| Количество процессоров | Количество ячеек на один MPI-процесс | Время, с | S_p | E_{avr}^{STK} , % |
|------------------------|--------------------------------------|----------|-------|---------------------|
| 8 | 1799085 | 287523,6 | 7,6 | 95,1 |
| 16 | 899542 | 151600,5 | 14,9 | 93,0 |
| 32 | 449771 | 77656,8 | 28,1 | 87,7 |
| 64 | 224885 | 45839,4 | 52,6 | 82,2 |
| 128 | 112442 | 26081,5 | 104,4 | 81,5 |
| 256 | 56221 | 15545,0 | 175,1 | 68,4 |
| 512 | 28110 | 9580,1 | 284,1 | 55,5 |
| 1024 | 14055 | 8263,2 | 329,3 | 32,2 |

Здесь S_p – коэффициент ускорения параллельной реализации относительно одного процесса, E_{avr}^{STK} – средняя эффективность выполнения всех MPI-процессов.

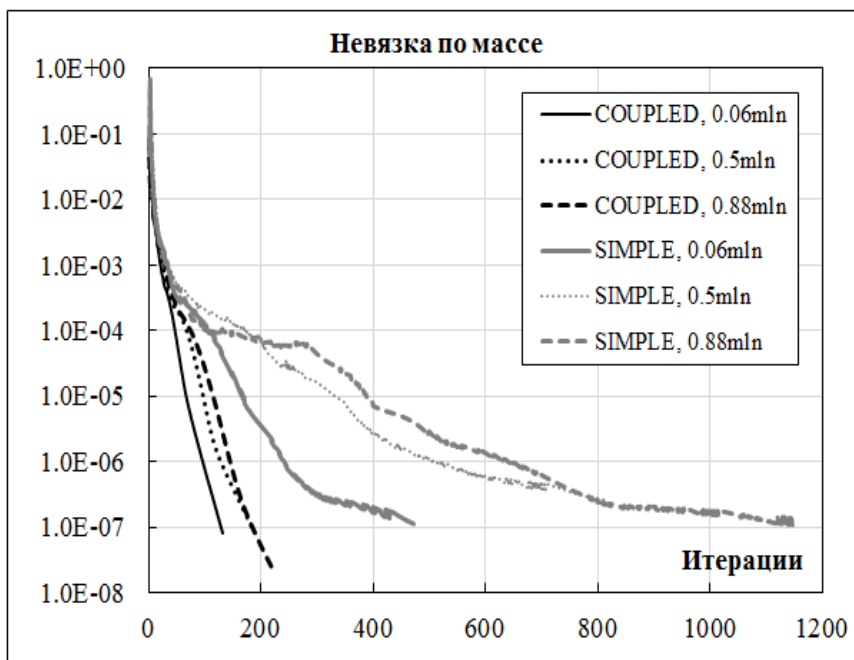


Рис. 2. Сравнение эффективности полностью неявного метода с классическим алгоритмом SIMPLE

Представлены результаты верификации метода для расчета цунами оползневой типа на примере моделирования схода надводного и подводного оползня. Данные задачи являются международными тестами, имеющими экспериментальные данные. Схематично конфигурации экспериментов изображены на рис. 3.

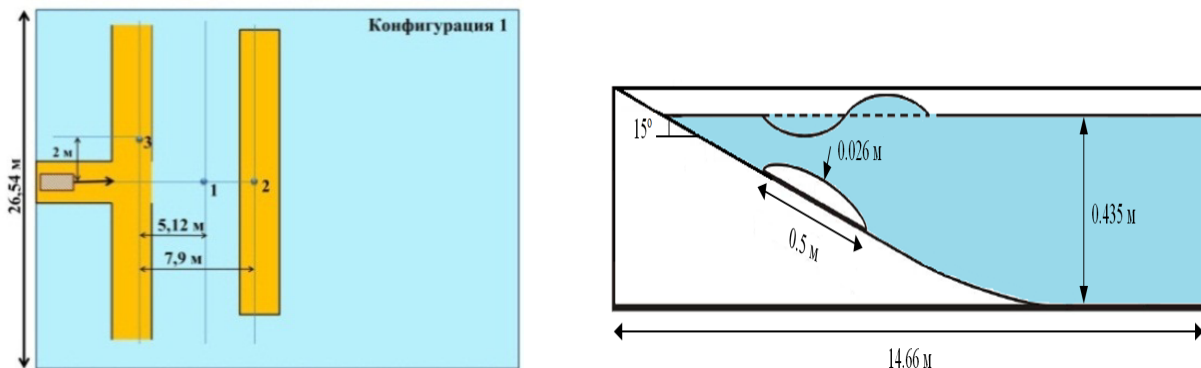


Рис. 3. Схема экспериментов – слева надводный оползень (■ – расположение оползня, ● – расположение мареографов), справа – подводный оползень

Для моделирования в обоих случаях использовалась расчетная сетка, состоящая примерно из 10 млн. ячеек (рис. 4) и построенная по специальной технологии. В области схода оползня и распространения волны сетка имеет сгущение для более точного описания движения оползня и характеристик течения.

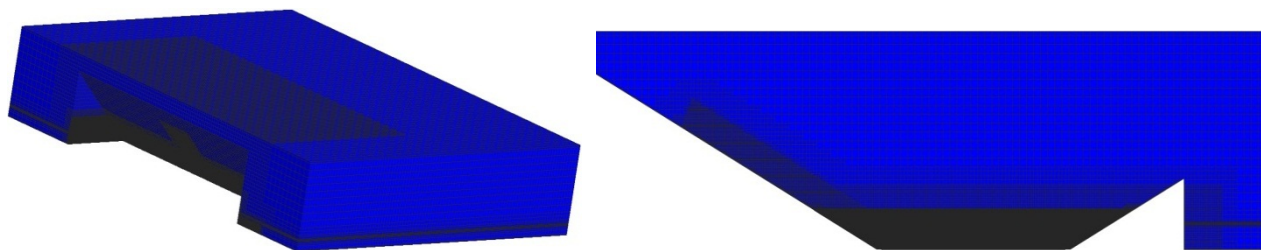


Рис. 4. Расчетная сетка (слева – общий вид, справа – сечение)

Параметры всех трех фаз – воды, воздуха и оползня – выбирались в соответствии с натурными экспериментами. На рис. 5 приведены результаты моделирования схода подводного оползня, а на рис. 6 – надводного, а на рис. 7 и 8 сравнение мареографных записей, полученных в ходе эксперимента и расчета. Как видно из этих графиков, результаты моделирования достаточно неплохо согласуются с экспериментом.

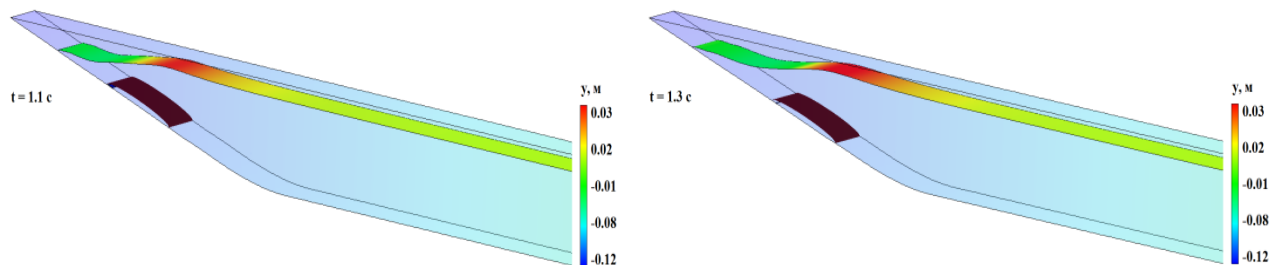


Рис. 5. Изменение уровня воды в бассейне при сходе подводного оползня

Представлены результаты исследования по оценке приемлемых сеточных размеров и шага по времени, выраженных в безразмерных параметрах относительно параметров волны, необходимых для обеспечения точности решения, достаточной для геофизических приложений.

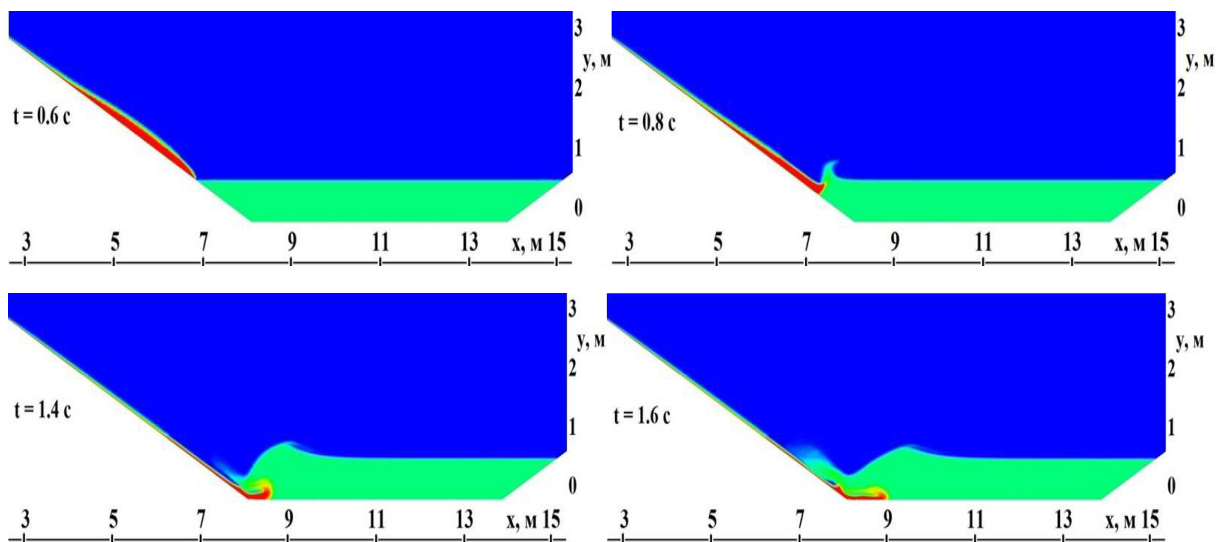


Рис. 6. Изменение уровня воды в бассейне при сходе надводного оползня

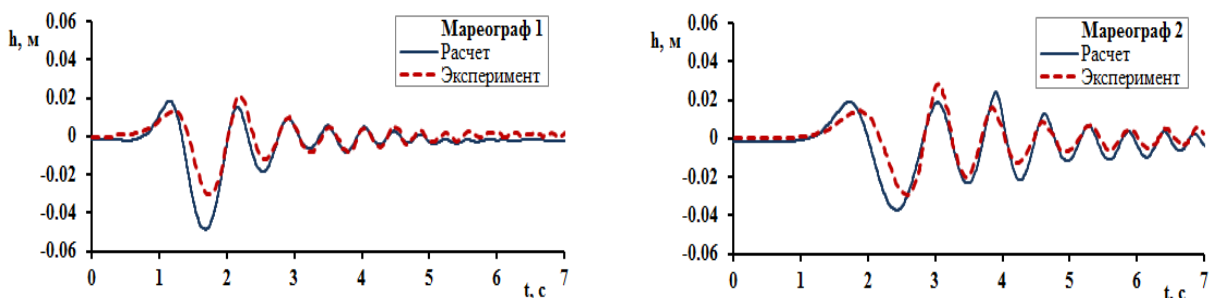


Рис. 7. Сравнение мареографных записей для схода подводного оползня

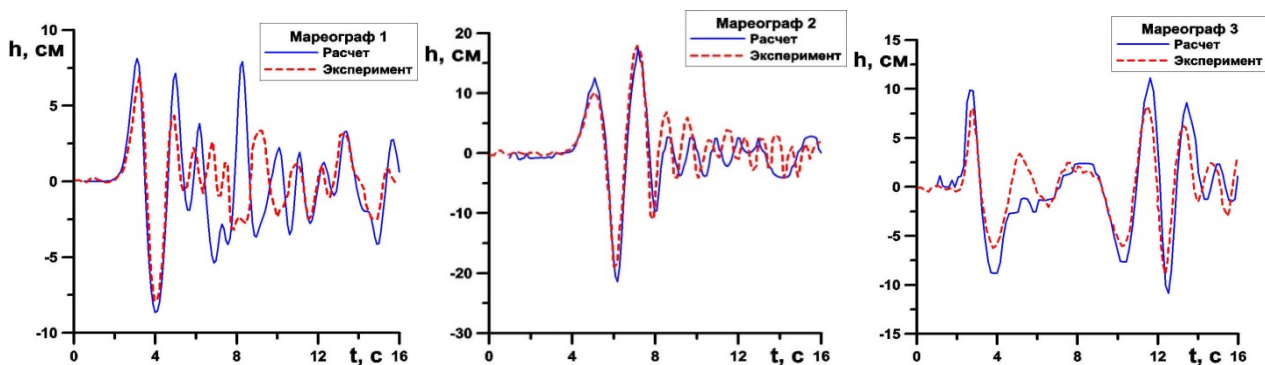


Рис. 8. Сравнение мареографных записей для схода надводного оползня

Описано применение разработанного метода для моделирования волн цунами оползневого происхождения, при этом акцент делается на моделирование в реальных акваториях Мирового океана. Представлена технология построения трехмерных сеточных моделей для моделирования цунами с учетом батиметрии, а также описана интерфейсная часть пакета программ ЛОГОС для задания начальных данных и наложения граничных условий, что составляет отчуждаемую технологию для использования ее независимыми исследователями. Построение трехмерной сеточной модели подразумевает несколько этапов: построение поверхностной сетки по батиметрическим данным детализацией необходимых областей (например, области схода оползня или входа метеорита) (рис. 9), построение сеточной модели в основной акватории распространения со сгущением на границе раздела «вода-воздух» и объединение частей в единую расчетную сетку (рис. 10). Построение сетки

в основной акватории осуществляется генератором блочно-структурированной сетки и адаптируется под береговую линию, путем обрезания в последней «водной» точке. Если необходимо в какой-то акватории считать накат, то в этой области необходимо построить сетку аналогично этапу 1 с необходимой детализацией (рис. 9). Далее, на полученную сеточную модель осуществляется наложение граничных условий в интерактивном виде в интерфейсе пакета программ ЛОГОС (рис. 11) и запуск на счет.

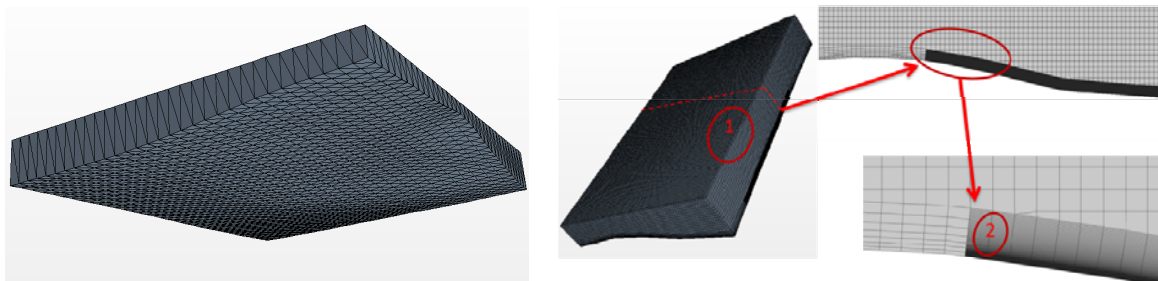


Рис. 9. Слева – поверхностная сетка с выделением топологических особенностей на основе батиметрических данных; справа – детализация области схода оползня (1) и поверхности склона в зоне схода (2)

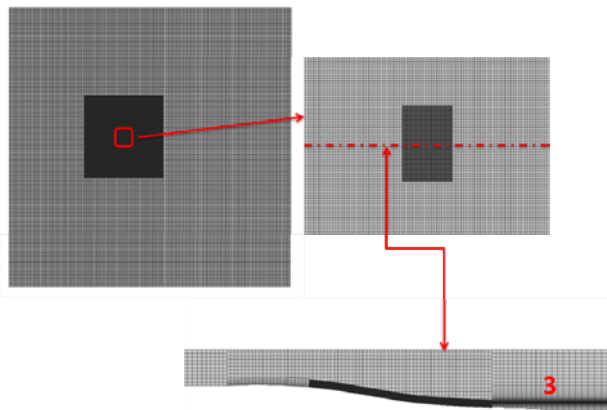


Рис. 10. Основная расчетная область со сгущением границы раздела «вода–воздух» (3) (черный квадрат в центре – сетка этапа 1 – рис. 9)

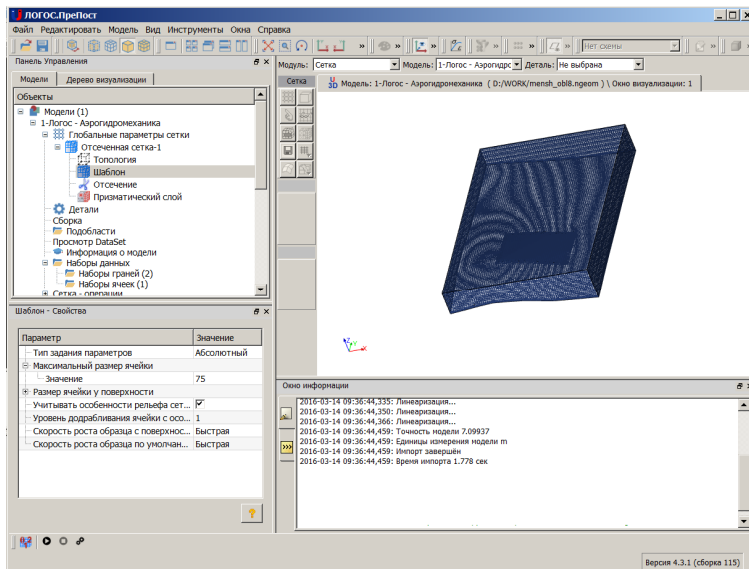


Рис. 11. Окно препроцессора ЛОГОС с внедренной технологией

Представлены исторические и экспедиционные данные о цунами на острове Монтсеррат (Карибское море). Главным результатом экспедиционного исследования является доказательство того, что вулканическое извержение на острове Монтсеррат, случившееся в ночь 12–13 июля 2003 года, вызвало волну цунами, зарегистрированную на островах Монтсеррат и Гваделупа. Высота волны на острове Монтсеррат составляет 4 м, и на острове Гваделупа 1 м. Данный факт должен быть включен в каталог цунами как почти достоверное событие (рис. 12).



Рис. 12. Распределение высот волн вдоль побережья острова Гваделупа, полученное в ходе экспедиции

Представлены результаты моделирования Монтсерратского цунами 2003 года 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 трем методам с идентичным источником, сопоставляются между собой (рис. 13).

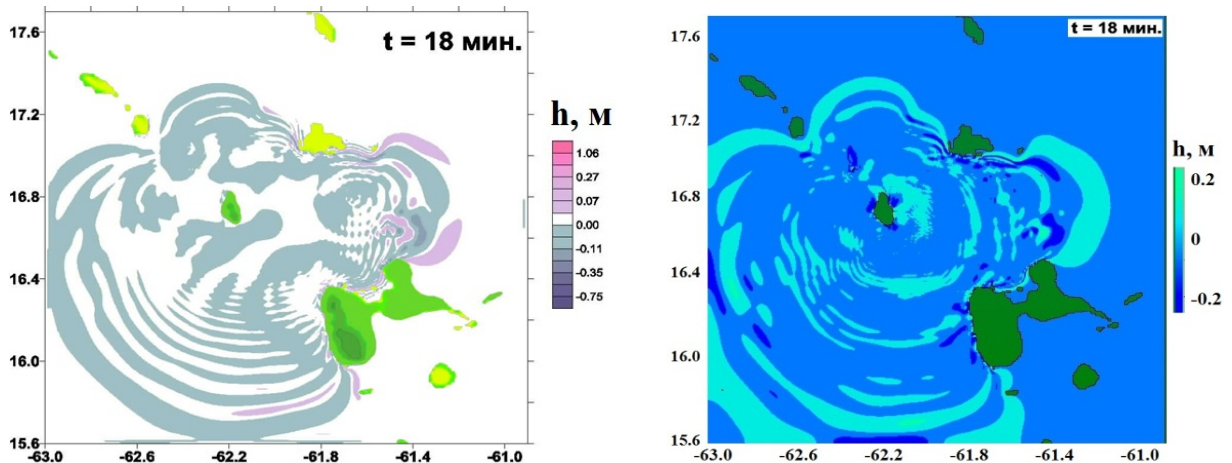


Рис. 13. Волновые картины распространения цунами на различные моменты времени – GEOWAVE (слева) и расчеты по ЛОГОС (справа)

Получаемые в результате моделирования количественные характеристики волновой картины в бассейне можно оценить по мареографным данным (рис. 14). Наиболее близкое совпадение дают уравнения Навье–Стокса и уравнения нелинейно-дисперсионной теории. Первые приходящие волны на всех мареографах регистрируются 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 раз-

ные результаты. ЛОГОС и GEOWAVE дают практически схожий результат для «первых» волн отрицательной амплитуды, TUNAMI же «замечает» их гораздо позже. Далее описано цунами с моделируемым сходом пирокластического потока. В данной постановке все составляющие системы (вода, воздух, оползень) моделируются отдельными фазами со своими физическими характеристиками. Размеры оползня соответствуют параметрами объема пирокластического потока, сошедшего в море. Движение пирокластического пласта происходит за счет действия силы тяжести, начальная скорость не задавалась. Во время численного эксперимента измеряется скорость входа оползня в воду, а также уровень моря в мареографных точках, аналогичных предыдущим расчетам.

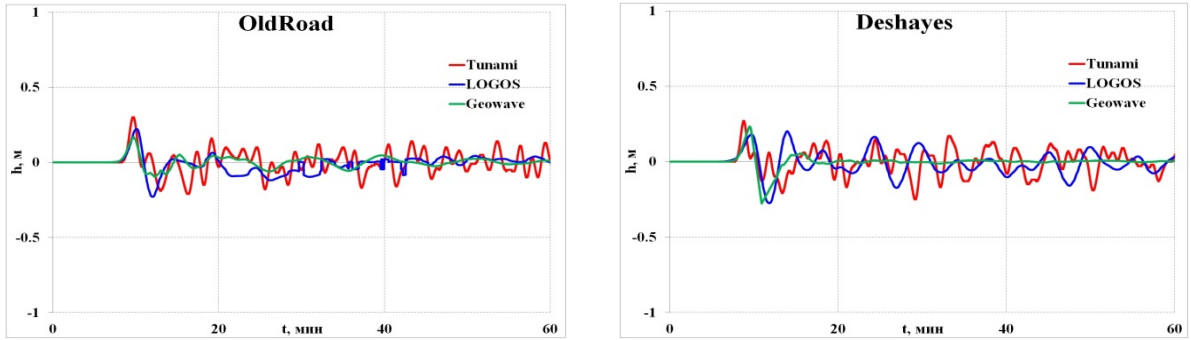


Рис. 14. Сравнение записей мареографов на острове Гваделупа и Антигуа

На рис. 15 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.

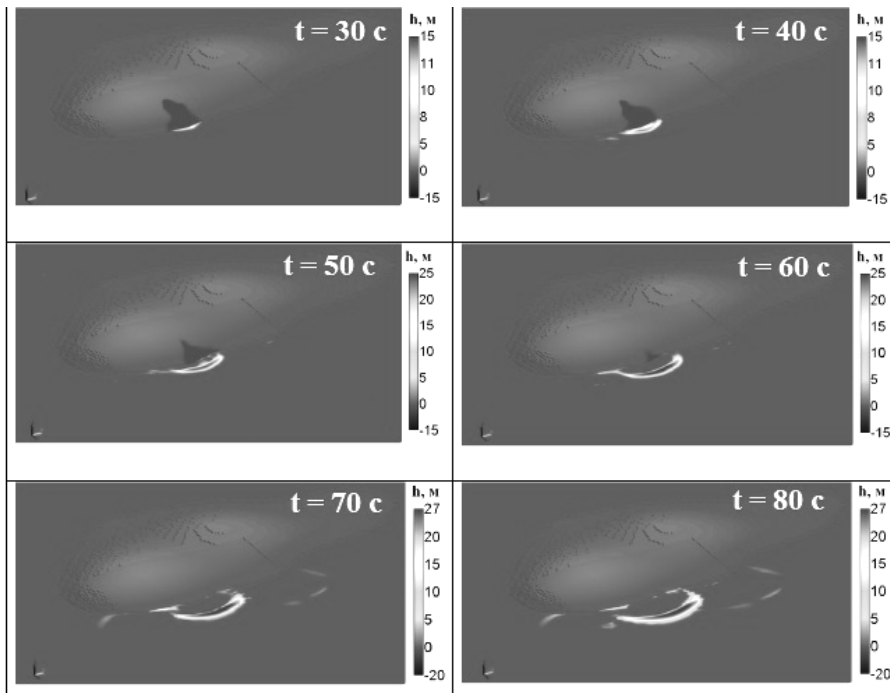


Рис. 15. Трехмерная волновая картина с детализацией волновых возмущений

Первые пришедшие волны на северо-западную часть острова Гваделупа существенно отличаются. В этом случае высота волны, полученная по ЛОГОС, в два раза выше, что лучше согласуется с наблюдениями. Мареограф «OldRoad», расположенный на о. Антигуа, показывает результат

и того выше, что больше соответствует действительности, учитывая, что этот остров находится в непосредственной близости к о. Монтсеррат.

Нелинейно-дисперсионные уравнения дают здесь гораздо большее затухание. Последующие волны описываются по-разному, и уравнения Навье–Стокса дают более выраженный колебательный характер, тогда как волны, рассчитанные по нелинейно-дисперсионной модели, также быстрее затухают. В итоге все применяемые модели показали, что на северо-западной части острова Гваделупа (мареограф в п. Дешейз) возникает волна цунами, хотя «мелкая вода» и нелинейно-дисперсионная теория показывают более скромный результат по амплитуде. Модель, основанная на уравнениях Навье–Стокса, гораздо ближе к наблюдениям. Нетрудно предположить и на самом деле это очевидно – все дело в описании источника цунами. Таким образом уравнения Навье–Стокса более точно воспроизводят источник оползневой цунами.

На рис. 16 представлена эволюция волны цунами по части бассейна Карибского моря. Используемая в данных расчетах сеточная модель построена с детализацией области схода оползня и состоит примерно из 20 (двадцати) млн. трехмерных ячеек. На этой сетке полностью неявным методом интегрирования уравнений Навье–Стокса распространение цунами до 40 минут физического времени считается около 72 часов на 320 процессорах. Количественное сравнение также можно осуществить по мареографным записям, представленным на рис. 17.

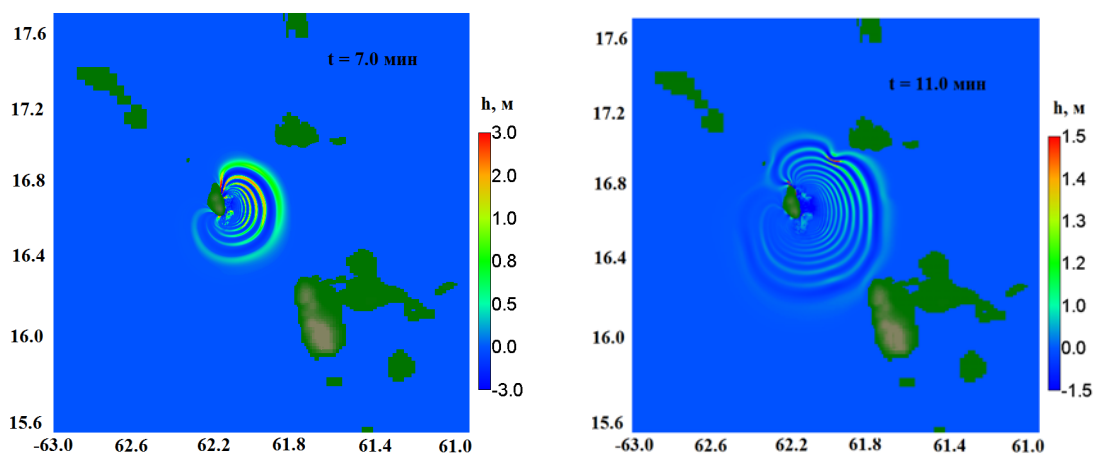


Рис. 16. Распространение цунами по Карибскому морю

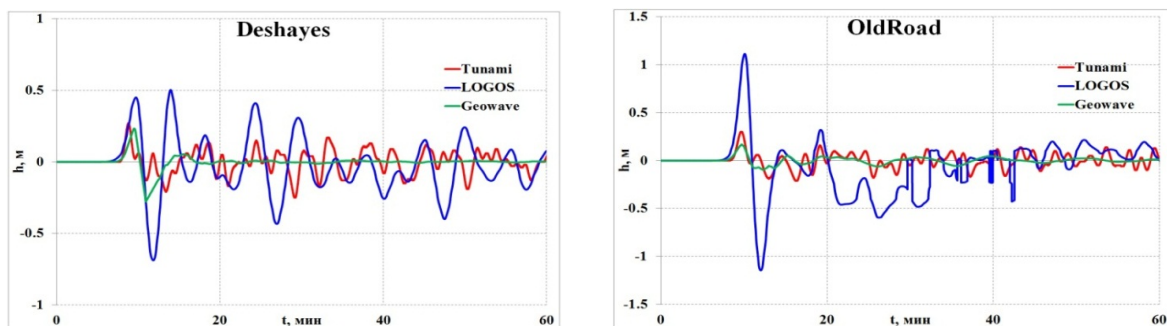


Рис. 17. Сравнение мареографных данных по трем подходам к моделированию

Далее обсуждается математическое моделирование в проблеме космогенных цунами. Представлены существующие вычислительные технологии моделирования этого явления и предложен подход, основанный на базе уравнений Навье–Стокса, позволяющий совместить все стадии моделирования – источник, распространение и накат воедино. Представлен краткий очерк по астероидно-кометной опасности и существующие методы расчета соударения с гидросферой. Предложен алгоритм расчета действующих на тело сил, ориентированный на произвольные неструктурированные сетки. Представлены результаты моделирования космогенных цунами источниками различных типов – эквивалентного очага цунами и динамического очага с временной динамикой астероида при

входе в воду. Показано, что существенные различия в эволюции источника в рамках этих двух моделей (рис. 18).

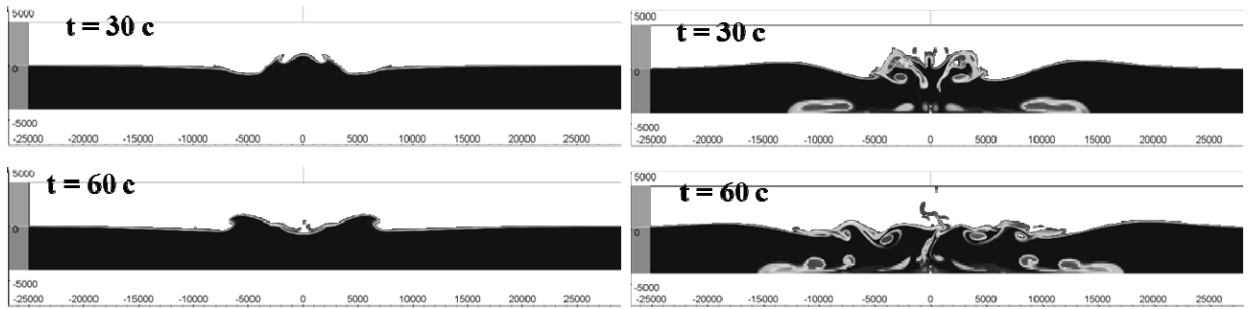


Рис. 18. Смещение водной поверхности (серо-белым цветом изображен воздух, темным – вода): слева – от эквивалентного очага, справа – от входящего тела (по осям отложены метры)

При использовании второй модели трансформация водной поверхности и толщи воды наиболее полно соответствует физике процесса, наблюдаемого в природе. В ее рамках более четко описываются уединенные волны, выходящие из источника, наблюдается их некая периодичность, что отсутствует при использовании эквивалентного очага. Высоты волн на некоторых стадиях процесса также существенно различаются, что в итоге сказывается на моделировании распространения волн цунами в открытом океане и их накате на берег. Изложены результаты моделирования падения метеорита в воду при вхождении под углом. При падении под углом образовавшаяся каверна имеет несимметричную структуру с выделяющимся всплеском по ходу падения тела – передний всплеск (рис. 19). За телом при небольших скоростях поднятия поверхности воды («задний» всплеск) практически не наблюдается, тогда как по ходу падения смещение уровня воды достигает нескольких метров. По мере увеличения скорости падения высота основного выброса увеличивается (рис. 20). Увеличивается и высота выброса, образуемая за телом, при этом одновременно с этим выбросом увеличивается и сам размер каверны. Передний всплеск имеет «серповидную» форму и поэтому будет обрывать как на внутреннюю сторону каверны, так и на внешнюю по ходу падения тела.

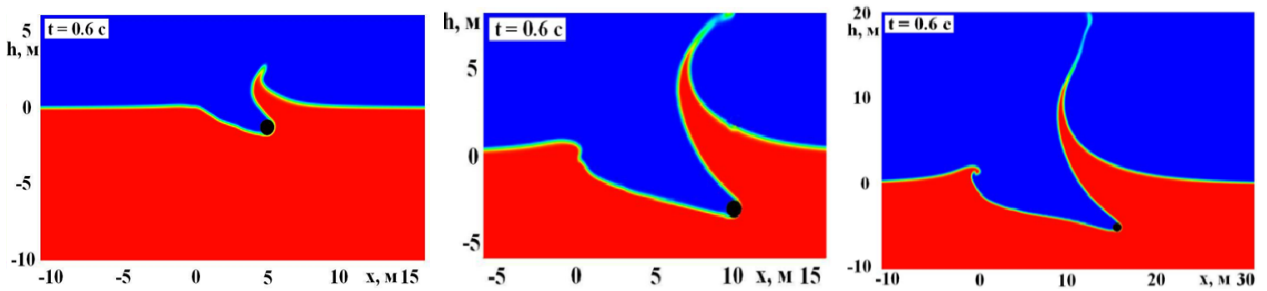


Рис. 19. Падение тела под углом 20° со скоростью (слева направо – 10 м/с, 30 м/с, 60 м/с, тело – черный кружок, красная фаза – вода, синяя – воздух)

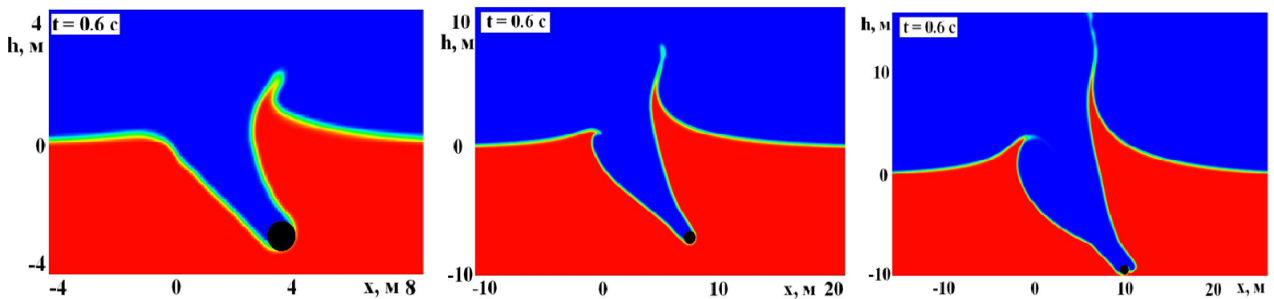


Рис. 20. Падение тела под углом 45° со скоростью (слева направо – 10 м/с, 30 м/с, 60 м/с, тело – черный кружок, красная фаза – вода, синяя – воздух)

Изменение параметров каверны при увеличении скорости падения происходит более резко, а самое существенное изменение наблюдается при небольших углах падения. Величины параметров каверны ниже 20 градусов выбиваются из общей картины изменения. Скорее всего, это связано с тем, что при малых углах падения нет образования ярко выраженной каверны и тело какое-то время скользит по поверхности воды и незначительно погружаясь, потом резко тонет. Изменение параметров каверны после 20° происходит по квазилинейному закону. Эта тенденция сохраняется вплоть до вертикального падения и имеет такой же характер при существенном увеличении скорости. Увеличение угла падения до близкого к вертикальному выравнивает амплитуды выбросов воды по ходу и за ходом падения тела. На рис. 21 приведены изменения параметров каверны для различных скоростей и углов падения.

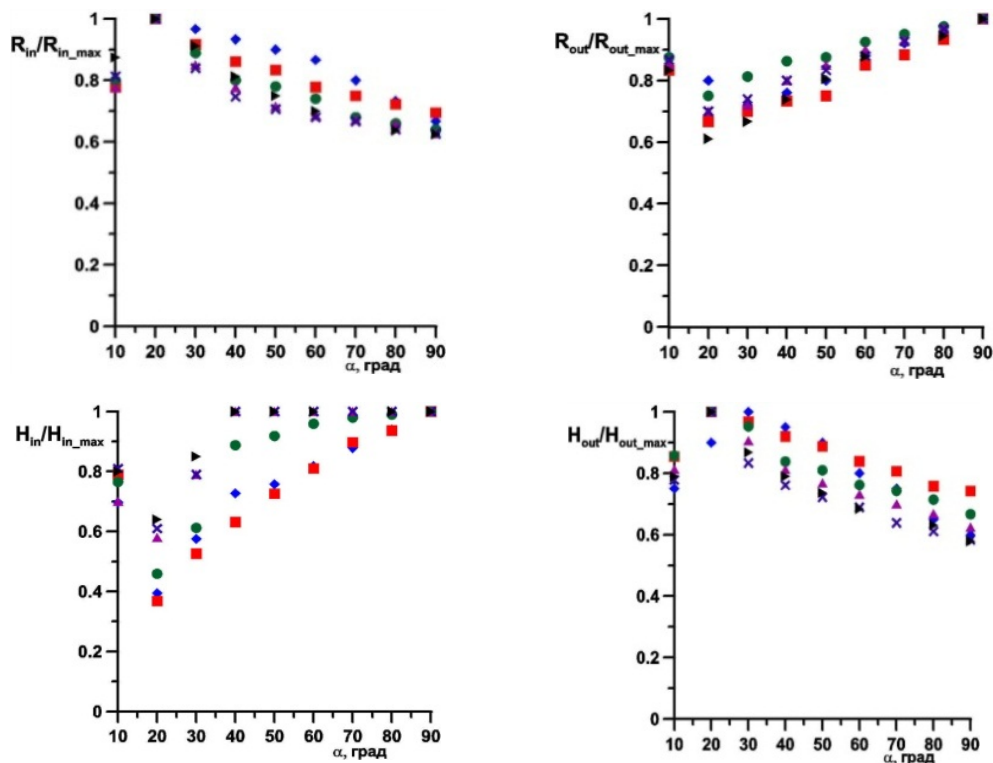


Рис. 21. Нормированные значения параметров каверны (► – 200 м/с, × – 150 м/с, ▲ – 100 м/с, ● – 60 м/с, ■ – 30 м/с, ◆ – 10 м/с)

Представлены результаты моделирования падения метеорита в озеро Чебаркуль в 2013 году. 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. 22).

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 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. 23).

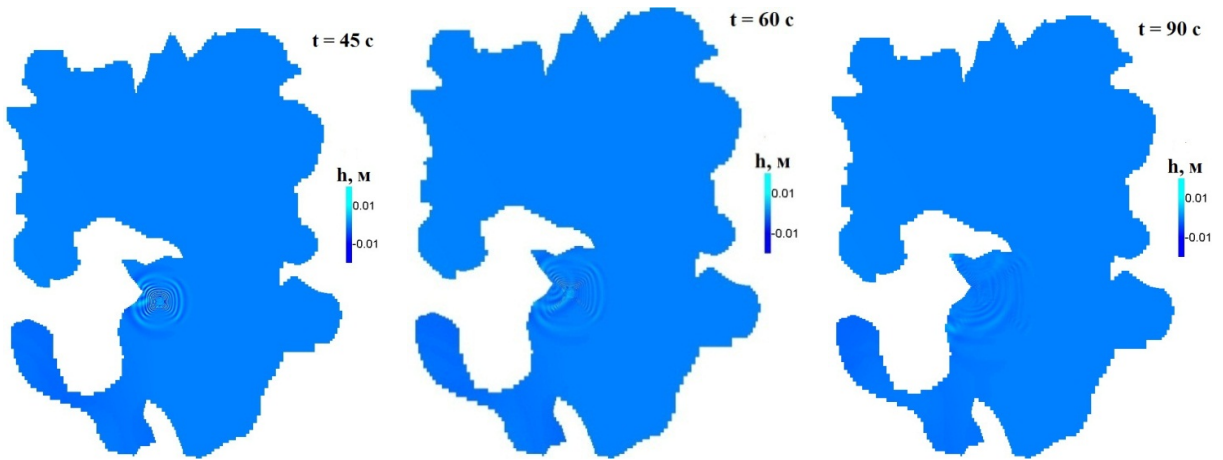


Рис. 22. Распространение цунами по озеру Чебаркуль

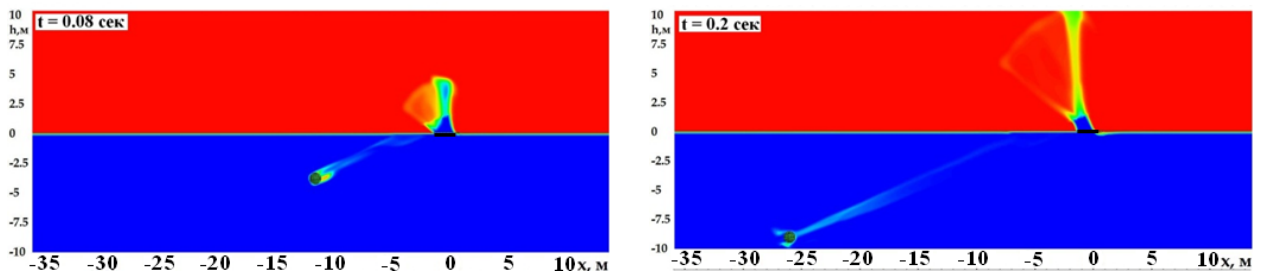


Рис. 23. Возмущение объемной доли (синим – вода, красным – воздух) в сечении расчетной области с учетом ледовой поверхности

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. 24 представлены картины распределения давления во всей расчетной области на разные моменты времени при прохождении метеоритом толщи воды.

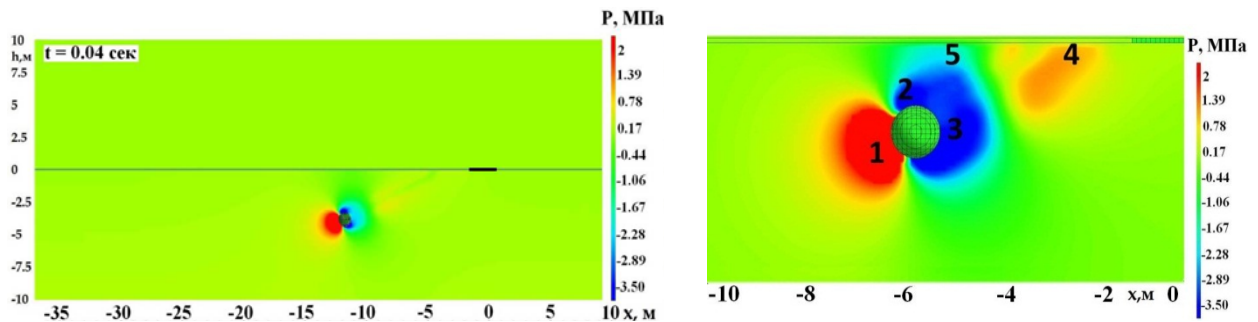


Рис. 24. Поле давления в расчетной области (горизонтальная линия – лед, черная короткая полоска – область входа)

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

зывает 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.

Литература

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. М.: Физматлит, 2013.
2. Волков К. Н., Дерюгин Ю. Н., Козелков А. С., Емельянов В. Н., Тетерина И. В. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках. М.: Физматлит, 2014.
3. 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. Vol. 22, N 1. P. 44–57.
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 // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 2013. Вып. 4. С. 44–56.
5. Волков К. Н., Дерюгин Ю. Н., Емельянов В. Н., Козелков А. С., Тетерина И. В. Алгебраический метод в задачах вычислительной физики // *Вычислительные методы и программирование*. 2014. Т. 15. С. 183–200.
6. 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.
7. Козелков А. С., Курулин В. В. Численная схема для моделирования турбулентных течений несжимаемой жидкости с использованием вихреразрешающих подходов // *Вычислительная математика и математическая физика*. 2015. Т. 55, №7. С. 135–146.
8. 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. Vol. 67. P. 176–191.
9. 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.
10. Козелков А. С., Куркин А. А., Пелиновский Е. Н. Влияние угла входа тела в воду на высоты генерируемых волн // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2016, № 2. С. 166–176.
11. 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. Т. 56, № 8. С. 154–165.
12. Козелков А. С. Методика численного моделирования цунами оползневой типа на основе уравнений Навье–Стокса // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2016. Т. 9, № 2. С. 218–236.