

Дождевые паводки и водокаменные сели 2014, 2015 гг. в бассейне р. Кынгарги были сформированы вследствие выпадения обильных и очень локальных по территории выпадения осадков в горах. С локальностью выпадения обильных осадков в горах связана сложность своевременного выявления таких опасных ситуаций. А полное отсутствие наблюдательной сети в горах делает это просто невозможным. Установка автоматических осадкомеров, оборудованных системой оповещения по GSM каналу в высокогорной части бассейна р. Кынгарги и прилегающей горной территории, а также оборудование сети автоматических гидрометрических наблюдений поможет в понимании закономерностей формирования экстремальных осадков и уровней воды в селеопасных водотоках и в перспективе способствовать своевременному выявлению формирования опасных ситуаций в горах.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке ИОО РГО и ООО «Премьер-Энерго» (Договор № 16/03/02).

Кураков С.А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012, № 4 (155), с. 29-32, УДК 551.508:53.087.

Макаров С.А., Черкашина А.А., Атутова Ж.В., Бардаш А.В., Воронай Н.Н., Кичигина Н.В., Мутин Б.Ф., Осипова О.П., Ухова Н.Н. Катастрофические селевые потоки произошедшие в поселке Аршан Тункин-ского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. – Иркутск: изд-во ИГ СО РАН им.В.Б. Сочавы, 2014. – 111с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Ангара-Енисейский район. Ангара. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – Т.16. Вып. 2. – 595 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХОДА ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОТОКА СЕЛЕВОГО ТИПА И ЦУНАМИ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

КОЗЕЛКОВ А.С.^{1,2}, КУРКИН А.А.², ПЕЛИНОВСКИЙ Е.Н.^{2,3}

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»)

(607188, Нижегородская область, г. Саров, пр-т Мира 37, askozelkov@mail.ru)

²Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.А. Алексеева (НГТУ им. Р.Е. Алексеева) (603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина 24, aakurkin@gmail.com)

³Институт Прикладной Физики РАН (ИПФ РАН) (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова 46, pelinovsky@gmail.com)

MODELING OF MOVEMENT VOLCANIC MUD FLOW AND LANDSLIDE TSUNAMI ON THE BASIS OF NAVIER-STOKES EQUATIONS

KOZELKOV A.S.^{1,2}, KURKIN A.A.², PELINOVSKII E.N.^{2,3}

¹Russian Federal Nuclear Center, All-Russian Research Institute of Experimental Physics, (607188, Russia, Nizhny Novgorod oblast, Sarov, pr. Mira 37, askozelkov@mail.ru)

²Alekseev State Technical University (603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Minina 24, aakurkin@gmail.com)

³Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences (603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Ul'yanova 46, pelinovsky@gmail.com)

Банк данных волн цунами содержит более 2200 зарегистрированных на Земле событий и свыше 9000 наблюдений береговых высот волн [Сайт лаборатории Цунами]. Из этого числа более 10 % составляют цунами, порожденные обвалами подводных и надводных оползней, а 5 % – вулканогенными источниками, сходом пирокластических потоков, образованных в результате вулканического взрыва. Согласно накопленным данным, цунами, порождаемые оползнями, имеют самую высокую амплитуду заплеска на берег, которая может достигать нескольких сотен метров. К наиболее известным цунами оползневого типа относятся случаи в заливе Литуйя на Аляске (1853,

1936, 1958 гг.), Норвегии (1936 г.) и Гренландии (2000). Самая большая высота волны цунами высотой 60 метров наблюдалась в бухте Литуйя в 10 июля 1958 года в результате схода сейсмогенного обвала, при этом максимальный заплеск в самой бухте составил 525 метров. Волны, возбуждаемые подводными и надводными оползнями, достигают максимально возможных заплесков непосредственно около источника на расстояниях 10-15 километров вдоль береговой линии. Однако, цунами такого типа может распространяться существенно дальше, если оползень является следствием землетрясения – они могут сохранять свой разрушительный потенциал на сотни километров.

Поверхностные волны, порождаемые сходом оползня, имеют свою специфику. Зарождение волны в прибрежной зоне с малой глубиной осуществляется в достаточно длительное время, сравнимое с временем перемещения оползня, а характерный размер оползня зачастую сравним с глубиной. В отличие от цунами сейсмического происхождения, цунами оползневого типа являются более короткими [Dutykh, 2009], что обуславливает необходимость учета дисперсии волн. Для моделирования таких волн используют нелинейно-дисперсионные уравнения теории мелкой воды, способными воспроизводить дисперсию [Гусев, 2013]. Применение трехмерных моделей для генерации цунами оползневого типа сводится к применению специальных систем на базе уравнения Лапласа [Сесioni, 2010]. Попытка применения трехмерных моделей, основанных на полных уравнениях Навье-Стокса, сводится пока к единичным работам [Horrillo, 2013], по причине их вычислительной дороговизны. Однако с существенным ростом вычислительных ресурсов, наблюдающимся в последнее время, и их возрастающей доступностью, разработка и применение таких моделей становится актуальной задачей.

Основной проблемой использования уравнений Навье-Стокса в научных и промышленных приложениях является их существенная вычислительная дороговизна. В настоящее время ведутся системные исследования, направленные на разработку методов ускорения гидродинамических расчетов и повышения точности [Волков, 2013]. В данной работе представлена технология расчета цунами оползневого типа на основе полностью неявного метода решения полных трехмерных уравнений Навье-Стокса, описывающих многофазные течения. Оползень моделируется отдельной фазой со своей вязкостью и плотностью. Полностью неявная схема также является весьма устойчивой. Работоспособность технологии проверяется на известных экспериментальных данных. Демонстрируется возможность применения технологии для расчета всех стадий цунами оползневого типа.

Основные уравнения модели и способ численного решения

Рассмотрим систему «воздух-вода» как совокупность двух несжимаемых сред, разделенных границей раздела. Будем использовать односкоростное приближение, в котором уравнение неразрывности и уравнение сохранения импульса едины как для воды, так и для воздуха, и решаются для результирующей среды, свойства которой линейным образом зависят от объемной доли [Hirt, 1981]. Такой подход достаточно распространен и дает хорошие результаты при решении задач со свободной поверхностью, в том числе и для волн цунами [Козелков, 2015, 2016]. В рамках этого приближения движение данной системы описывается уравнениями Навье-Стокса, включающими уравнения неразрывности, сохранения импульса, а также уравнением для объемных долей фаз:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u} = -\nabla \cdot \sum_k (\alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla \cdot \sum_k (\alpha^{(k)} \mu^{(k)} \nabla \mathbf{u}) - \nabla p + \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{g} \\ \frac{\partial}{\partial t} \alpha^{(k)} \rho^{(k)} + \nabla \cdot (\alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

здесь $\mathbf{u}$ – трехмерный вектор скорости, $\rho^{(k)}$ – плотность фазы k , и $\alpha^{(k)}$ – ее объемная доля, p – давление, $\mu^{(k)}$ – молекулярная вязкость фазы k , $\mathbf{g}$ – ускорение свободного падения. Данная система решается напрямую без использования осреднения по Рейнольдсу и последующего замыкания моделью турбулентности. Это позволяет разрешивать турбулентные структуры, минимальный масштаб которых определяется сеточным разрешением.

Дискретизация системы (1) может быть осуществлена любым известным способом [Волков, 2013]. Оптимальным выбором дискретизации является метод конечных объемов, обладающий хорошими консервативными свойствами и позволяющий осуществить дискретизацию сложных вычислительных областей на произвольных неструктурированных сетках с ячейками произвольной формы. Основная сложность при численном решении системы (1) заключается в определении

связи поля давления с полем скорости. Процедура согласования поля давления с полем скорости должна приводить к одновременному удовлетворению уравнений неразрывности и сохранения импульса. Наиболее распространенными являются методы типа SIMPLE, основанные на процедуре коррекции давления или принципе расщепления неизвестных [Тарасова, 2015]. Для численного решения итоговая система уравнений должна быть дополнена начальными и граничными условиями. На твердых стенках (например, дно бассейна) градиент давления и объемных долей и значение скорости равно нулю. На «свободных» границах фиксируется статическое давление, градиенты скорости и объемных долей равны нулю. При моделировании геофизических задач, верхнюю границу необходимо располагать на высоте, достаточной для исключения «выплескивания» воды из расчетной области. В начальный момент времени, вода и воздух находятся в состоянии покоя, т. е. все компоненты скорости равны нулю, давление имеет гидростатическое распределение. Объемная доля фаз (например, воды и воздуха) определяется в соответствии с заданным уровнем положения свободной поверхности.

Расчет движения оползневых структур в рамках данной модели осуществляется с помощью отдельной фазы, имеющей свою плотность и вязкость, также как вода и воздух, т. е. получается трехфазная гидродинамическая система. Дополнительных граничных условий для моделирования оползня не требуется – все взаимодействия с жидкостью и воздухом моделируются соответствующими слагаемыми исходной системы уравнений. Полностью неявная формулировка численной схемы снимает жесткие ограничения на шаг по времени и гарантирует устойчивость итерационного процесса при максимально возможном числе Куранта.

Представленная методика реализована в пакете программ ЛОГОС — программном продукте, предназначенном для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [Волков, 2013; Козелков, 2015, 2016; Тарасова, 2015, Kozelkov, 2015]. Пакет программ ЛОГОС успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач, включая расчеты турбулентных и нестационарных течений [Kozelkov, 2015], а также волн цунами космического происхождения [Козелков, 2015, 2016].

Валидация технологии

Валидация предложенной методики проведем на эксперименте, описанном в [Mohammed, 2010], в которых описывается серия экспериментов, проведенная в трехмерном бассейне с пневматической установкой для генерации цунами деформируемыми гранулированными оползнями. Схематично конфигурация бассейна изображена на рис. 1.

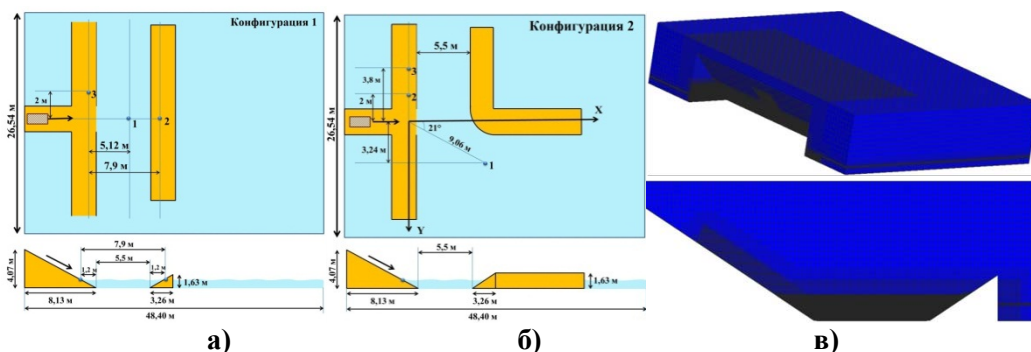


Рис. 1. Конфигурации бассейна (а,б; — расположение оползня, — расположение мареографов) расчетная сетка (в; сверху — общий вид, снизу — сечение).

Оползень начинает движение по наклонной плоскости с заданной начальной скоростью 3,8 м/с. Во время эксперимента измеряется скорость входа оползня в воду, а также высота поверхности воды в ряде мареографных точек, которые расположены как на «открытой» воде (мареографы с номером 1), так и в непосредственной близости к искусственным препятствиям с целью измерения заплеска (мареографы с номерами 2, 3). При этом мареограф с номером 1 в «конфигурации 1» расположен непосредственно на пути распространения волны, а в «конфигурации 2» его измерение нацелено на огибающую препятствие волну.

Для моделирования использовалась расчетная сетка, состоящая из 10 млн ячеек (рис.1в). В области схода оползня и распространения волны, сетка имеет сгущение для более точного описания движения оползня и характеристик течения. Параметры всех трех фаз – воды, воздуха и оползня выбирались в соответствии с экспериментом. Высота уровня воды от дна бассейна 0,6

метра. Размеры оползня составляют $2,1 \times 1,2 \times 0,3$ м, причем задний его край находится на расстоянии 2,8 м от верхнего края наклонной плоскости. Моделирование осуществляется с автоматическим выбором шага по времени в соответствии с заданным числом Куранта равным единице. Картина входа оползня в воду и распространения до преград для обеих конфигураций одинакова, поэтому ниже ограничимся представлением результатов для конфигурации 1. На рис. 2 представлено поле скорости среды на различные моменты времени входа оползня в воду.

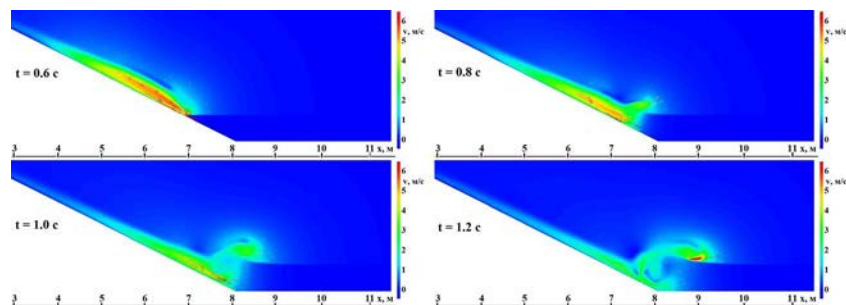


Рис. 2. Поле скорости среды в различные моменты времени.

Из рисунка видно, что на момент входа в воду ($t = 0,6$ с.), оползень имеет скорость около 5,5 м/с, что хорошо согласуется с экспериментом. Максимальная скорость движения среды наблюдается для водной фазы в момент опрокидывания волны ($t = 1,2$ с.) и превышает значение 6 м/с. Картина распределения скоростей позволяет видеть возмущения и воздушной среды, которые совсем незначительны (около 1 м/с) по сравнению с другими фазами, что говорит о правомерности пренебрежением сжимаемостью воздуха. В момент опрокидывания волна имеет амплитуду около 50 см., что практически соответствует уровню воды в бассейне (рис. 3).

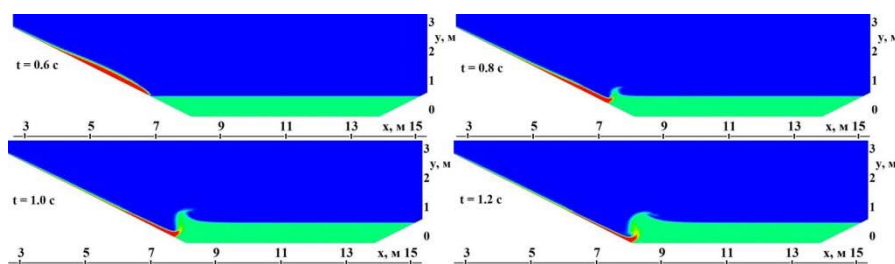


Рис. 3. Изменение уровня воды в бассейне в различные моменты времени.

После опрокидывания первой волны, оползень еще продолжает движение по дну бассейна. После схода основной его массы на момент времени 2 с., образуется вторая волна амплитудой в 2 раза меньшая, чем первая. На момент времени 4 с. оползень полностью сходит в бассейн, а по его поверхности друг за другом движутся две волны. На момент времени 6 с., наблюдается картина заплеска волны на искусственные «фьорды», причем их амплитуда примерно одинакова и составляет около 10 см. Заплеск волны наблюдается и на «фьорды» с которых сошел оползень и по величине он примерно такой же. Получаемые в результате моделирования количественные характеристики волновой картины в бассейне можно оценить по мареографным данным (рис. 4).

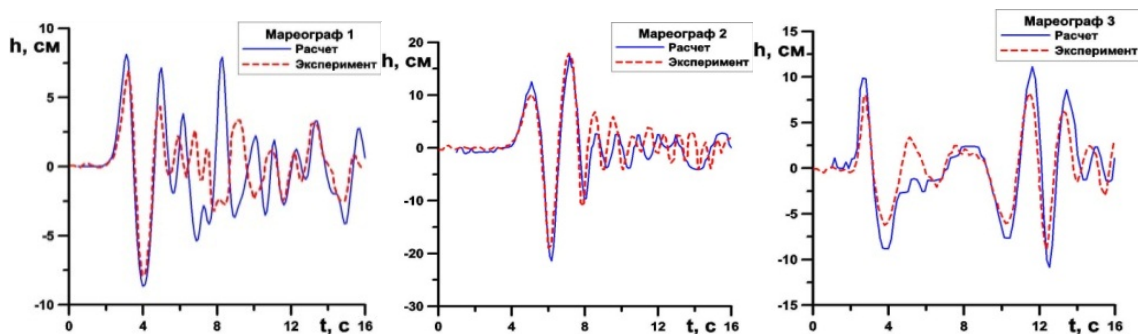


Рис. 4. Записи мареографов для конфигурации 1.

Как видно из рисунков, в численном расчете мареографами регистрируются все пришедшие волны, причем их амплитуда практически совпадает с полученной в эксперименте. Это касается как первых волн, так и последних. Единственное существенное отличие в численном эксперименте было получено для мареографа 1 в конфигурации 1 для «средних» пришедших волн. Здесь, в численном расчете процессы переотражения волны более усилили ее амплитуду, чем это наблюдалось в эксперименте, хотя в эксперименте тоже есть некое усиление, хотя существенно слабее. Для фьорда 2 все мареографы также дали хорошее совпадение по волновой картине.

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

Сайт лаборатории Цунами. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tsun.sssc.ru/hiwg>.

Dutykh D., Dias F. Energy of tsunami waves generated by bottom motion // Proc. R. Soc. A, 2009, vol. 465. p. 725–744.

Гусев О.И., Шокина Н.Ю., Кутергин В.А., Хакимзянов Г.С. Моделирование поверхностных волн, генерируемых подводным оползнем в водохранилище // Вычислительные технологии, 2013, т. 18, № 5. С. 74-90.

Cecioni C., Bellotti G., Modeling tsunamis generated by submerged landslides using depth integrated equations // Applied Ocean Research. 2010, v. 32. p. 343-350.

Horrillo J., Wood A., Kim G.B., Parambath A., A simplified 3-D Navier-Stokes numerical model for landslide-tsunamis: Application to the Gulf of Mexico // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, v. 118. p.6934–6950.

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.

Hirt C.W., Nichols B.D., Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981, v. 39. p. 201-225.

Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Курулин В.В., Тятюшкіна 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 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.

Тарасова Н.В., Козелков А.С., Мелешикина Д.П., Лашкин С.В., Денисова О.В., Сизова М.А. Особенности применения алгоритма SIMPLE для расчета сжимаемых течений // Журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2015, вып.3. С. 20-34.

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, DOI 10.1007/s10915-015-0075-7.

Mohammed F., Frits H.M., Experiments on tsunamis generated by 3D Granular Landslides // Submarine Mass Movements and Their Consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research. 2010, v. 28. p. 705-718.

КАДАСТР СЕЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

КОНДРАТЬЕВА Н.В.¹, АДЖИЕВ А.Х.¹, БЕККИЕВ М.Ю.¹, ГЕДУЕВА М.М.¹, ПЕРОВ В.Ф.³,
РАЗУМОВ В.В.¹, СЕЙНОВА И.Б.², ХУЧУНАЕВА Л.В.¹

¹«Высокогорный геофизический институт», 360030, Нальчик, пр. Ленина ¹,
kondratyeva_nat@mail.ru; ²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Географический факультет, ЛСЛ и С. 119991, ГСП-1, Ленинские горы, Москва

CADASTRE OF MUDFLOW DANGER IN THE SOUTH OF THE EUROPIAN PART OF RUSSIA

KONDRATIEVA N.V.¹, ADZHIEV A.H.¹, BECKIEV M.U.¹, GEDUEVA M.M.¹, PEROV V.F.²,
RAZUMOV V.V.¹, SEYNOVA I.B.², HUCHUNAEVA L.V.¹
High-Mountain Geophysical Institute, 360030, Nalchik, Lenina 2, kondratyeva_nat@mail.ru; 119991,
Lenin Hills, MSU. Faculty of Geography, Laboratory of snow avalanches and debris flow.

Изучением селевых явлений на Кавказе занимались и занимаются многие советские и российские ученые. Работ, посвященных селевой тематике достаточно много, но значительная ведомственная разрозненность издающихся научных трудов и отсутствие единого методического центра