

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПЛЕСКОВ ВОЛН ЦУНАМИ НА ОТДЕЛЬНЫЕ УЧАСТКИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ РОССИИ

*Бейзель С. А.<sup>1</sup>, Гусяков В. К.<sup>2</sup>, Рычков А. Д.<sup>1</sup>, Чубаров Л. Б.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск, [chubarov@ict.nsc.ru](mailto:chubarov@ict.nsc.ru)*

<sup>2</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

### **Введение**

При решении практических задач снижения ущерба от цунами детальная информация об ожидаемой дальности и глубине заливания территории населенного пункта, возможных скоростях течений имеет первостепенное значение. Такая информация дает возможность определения размеров зон эвакуации, назначения временных убежищ и выбора маршрутов движения к ним. Оценка этих параметров даже при известной высоте волны на урезе воды (либо на какой-то фиксированной глубине) представляет собой сложную задачу, требующую применения специальных методов расчета, отличных от используемых для моделирования распространения цунами на глубокой воде.

Хорошо известно, что при сложной и изрезанной береговой линии высоты и дальности наката на сухом берегу существенно зависят не только от высоты подходящей к мелководью волны цунами, но и от ее длины (периода), а также от направления подхода к конкретной бухте или заливу. Лучшим примером в этом отношении являются высоты наката на побережье Санрику, измеренные после разрушительного цунами Тохоку 11 марта 2011 года [8]. На основании приборных записей, сделанных донными датчиками, установленными на промежуточных глубинах [5], можно считать, что в области побережья, лежащей непосредственно против очага землетрясения, высота подходящей волны цунами составляла 5–7 метров и была примерно одинаковой на протяжении почти 300 км по фронту, изменяясь не более чем на 30–40%. Это подтверждает также анализ высот наката, измеренных на выступающих в море мысах, которые на большом протяжении вдоль побережья были также примерно одинаковы и составляли 10–12 метров. Высоты же заплеска, измеренные в заливах и в вершинах бухт, изменялись в существенно более широком интервале (от 10 до 40 метров), т.е. диапазон их вариаций составляет более 400%. Столь же значительны были вариации по глубине заливания территории, прилегающей к заливам и бухтам. Отсюда видна важность оценки эффектов наката волн на сухой берег для конкретных участков побережья и изучения вариаций наката в заливах и бухтах при различных параметрах и положениях источника.

Содержание настоящей статьи связано с отработкой методики сочленения программы расчета распространения цунами на глубокой воде с программой расчета наката на сухой берег и с использованием этой методики для определения характеристик заплеска цунами от модельного землетрясения для одного из защищаемых пунктов Дальневосточного побережья России – Северо-Курильска. За пределами публикации остаются результаты авторов, связанные с детальным исследованием характеристик заплесков и в двух других защищаемых пунктах – Малокурильское и Усть-Камчатск, выбор которых для первоочередного исследования был обусловлен:

- 1) их расположением в разных частях (южной, центральной и северной) Курило-Камчатской сейсмогенной зоны;
- 2) различной ориентацией подводной акватории по отношению к направлению подхода прямой волны (северо-запад, северо-восток, юго-восток) – при доминирующем юго-восточном направлении подхода прямой (распространяющейся от очага) волны цунами;
- 3) различной конфигурацией прибрежной акватории, вблизи которой расположен защищаемый пункт. Для Малокурильского – это круглая бухта с узким входом, для Северо-Курильска – широкий полукруглый залив, для Усть-Камчатска – эстуарий и дельта крупной реки (р.Камчатка), устье которой закрыто песчаной косой (Дембиевская коса) от прямого воздействия подходящей волны цунами, при этом сам поселок отделен от океана достаточно широкой протокой, соединяющей устьевую часть реки с озером Нерпичье.

Отработка методики расчета наката для этих трех различных по географическим условиям пунктов Курило-Камчатского побережья позволяет надеяться, что предлагаемая методика будет хорошо работать в большинстве других береговых ситуаций, возможных на весьма протяженном Дальневосточном побережье РФ, с характерным для него большим разнообразием морфологических особенностей береговой зоны.

### **Методика расчета наката**

Предлагаемая авторами методика расчета наката на выбранные участки «защищаемого» побережья волн цунами, возникших в результате гипотетических модельных сейсмических очагов, предполагает в общем случае расчет на блочных (вложенных) сетках.

При этом используется стандартная технология расчета на вложенных сетках, когда возмущение в малую подобласть передается из вмещающей ее глобальной области через начальные данные и граничные условия в узлах грубой сетки вдоль всех внешних морских границ малой подобласти.

Момент начала расчета наката может не совпадать с моментом начала расчета распространения, что обеспечивает некоторую экономию расчетного времени в случаях, когда начальное смещение водной поверхности находится достаточно далеко от «защищаемого» участка побережья и в течение некоторого времени волновой процесс внутри малой подобласти не происходит. Момент подхода волны к малой подобласти и, соответственно, момент начала расчета наката волн, определяется в ходе предварительных расчетов распространения волн от выбранного модельного источника в глобальной области на грубой сетке.

Созданный авторами вычислительный инструментариум реализован в виде отдельного модуля, встроенного в зарегистрированный ранее исполнителями программный комплекс MGC [4] и позволяющего рассчитывать поля свободных поверхностей в заданные моменты времени; поля каждой из компонент скорости в те же моменты времени; картины «свечений» – массивы максимальных значений свободной поверхности в каждом узле мелкой сетки за все время расчета наката; максимальные значения модуля скорости волн в каждом узле мелкой сетки за все время расчета; маски зоны затопления побережья; длительности затопления побережья, рассчитываемые как суммарное время, которое изначально «сухие» узлы сетки на побережье были затопленными в ходе наката волн.

### **Модели и алгоритмы расчета характеристик наката волны цунами на прибрежную зону**

Математические модели, алгоритмы и методики моделирования генерации и распространения волны цунами вплоть до начального положения линии уреза, на которой ставились условие «непротекания» (вертикальная стенка), применялись в глобальной области всюду за исключением малых областей, в которых осуществлялось моделирование наката волны цунами, выполняемое авторами с использованием известных численных алгоритмов, реализованных в виде комплекса программ [3], позволяющего проводить расчеты на вложенных блочных разностных сетках, относящихся к дальней и ближней зонам. Здесь под дальней зоной понимается прямоугольная область, охватывающая часть побережья и океаническую зону, в которой зарождается и распространяется к берегу волна цунами. Ближней зоной является подобласть дальней зоны, включающая в себя часть суши и часть океана, через границы которой проходит волна цунами при ее движении к побережью.

В этом комплексе программ реализованы алгоритмы явной схемы Мак-Кормака [7] (для расчета распространения волн) и метода крупных частиц [1] – для моделирования наката волн на побережье. Алгоритм решения состоял из двух основных этапов. На первом из них на основной (грубой) сетке на каждом новом шаге по времени в глобальной зоне получалось численное решение, которое на границах ближней зоны принималось в качестве граничных условий. Для пересчета таких значений с грубой сетки на мелкую использовалась линейная интерполяция, как по пространству, так и по времени (в случаях, когда текущий временной шаг мелкой сетки оказывался меньше соответствующего шага сетки грубой). В этой зоне методом крупных частиц рассчитывались все параметры движения волны, которые затем использовались для корректировки значений на грубой сетке.

Использование «классического» метода частиц в ячейках для решения рассматриваемого здесь класса задач оказывается невозможным в силу статистического характера получаемого с его помощью решения, которое, в частности, не удовлетворяет условию гидростатического равновесия в покоящейся воде и значительно искажает процесс распространения волн. Метод крупных частиц лишен этого недостатка и позволяет получить сбалансированную разностную схему. При его реализации используется равномерная прямоугольная сетка, потому что, во-первых, побережье является достаточно сильно изрезанным и весьма проблематично построить криволинейную сетку, пригодную для решения уравнений математической модели и, во-вторых, в процессе наката волны происходит затекание воды во впадины, наличие которых обусловлено рельефом суши (устье рек, каньоны и т.п.), а также обтекание различного рода возвышенностей, поэтому использовать

адаптивную сетку, «привязанную» к линии уреза, не представляется возможным.

Реализация метода крупных частиц проводилась также в два этапа. На первом (эйлеровом) этапе в исходных уравнениях математической модели теории мелкой воды отбрасывались все конвективные члены, и решаемая система записывалась в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial u_\lambda}{\partial t} + \frac{g}{R_E \cos(\phi)} \frac{\partial(H-h)}{\partial \lambda} &= -u_\lambda C_R + \alpha u_\phi, \quad C_R = g k_f^2 \frac{\sqrt{u_\lambda^2 + u_\phi^2}}{H^{4/3}}, \\ \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + \frac{g}{R_E} \frac{\partial(H-h)}{\partial \phi} &= -u_\phi C_R - \alpha u_\lambda. \end{aligned} \quad (1)$$

На втором (лагранжевом) этапе решались уравнения переноса

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{R_E \cos(\phi)} \left[ \frac{\partial(Hu_\lambda)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(H \cos(\phi)u_\phi)}{\partial \phi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u_\lambda}{\partial t} + \frac{1}{R_E} \left[ \frac{1}{2 \cos(\phi)} \frac{\partial(u_\lambda^2)}{\partial \lambda} + u_\phi \frac{\partial u_\lambda}{\partial \phi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + \frac{1}{R_E} \left[ \frac{u_\lambda}{\cos(\phi)} \frac{\partial u_\phi}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u_\phi^2)}{\partial \phi} \right] &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $H(\lambda, \phi, t)$ ,  $h(\lambda, \phi)$  – полная глубина воды и отсчитываемый от поверхности «спокойной» воды профиль дна соответственно,  $u_\lambda(\lambda, \phi, t)$ ,  $u_\phi(\lambda, \phi, t)$  – компоненты вектора скорости по направлениям  $\lambda$  и  $\phi$  соответственно,  $R_E$  – средний радиус Земли,  $\alpha = 2\omega_E \sin(\phi)$ ,  $\omega_E$  – угловая скорость вращения Земли,  $k_f$  – коэффициент шероховатости (коэффициент Шези). Средний радиус Земли  $R_E = 6371$  км,  $\omega_E = 7.292115 \cdot 10^{-5} 1/c$ .

Для решения уравнений (1)–(2) строилась явная разностная схема первого порядка точности. Применение схемы первого порядка точности, обладающей к тому же монотонными свойствами, для получения численного решения с достаточным разрешением картины заплеска волны цунами на побережье вполне оправдано в силу необходимости смягчения нежелательных численных эффектов, обусловленных изрезанностью берегового рельефа суши. При построении разностной схемы использовалась сетка с разнесенными узлами, в которых определялись сеточные функции  $H_{i,j}$  и  $h_{i,j}$ . Компоненты скорости  $u_\lambda$ ,  $u_\phi$  определялись на серединах соответствующих граней ячеек.

Разностная схема первого этапа записывалась следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{i,j} &= H_{i,j}^n, \\ \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} &= \\ &= (u_{\lambda,i+1/2,j}^n - g \Delta t ((H-h)_{i+1,j}^n - (H-h)_{i,j}^n) / (R_E \cos(\phi_j) \Delta \lambda) + \Delta t \alpha u_\phi) / (1 + \Delta t C_R), \\ \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} &= \\ &= (u_{\phi,i,j+1/2}^n - g \Delta t ((H-h)_{i,j+1}^n - (H-h)_{i,j}^n) / (R_E \Delta \phi) - \Delta t \alpha u_\lambda) / (1 + \Delta t C_R). \end{aligned} \quad (3)$$

На втором этапе для уравнений переноса (2) использовалась противопотоковая разностная схема:

$$\begin{aligned} H_{i,j}^{n+1} &= \tilde{H}_{i,j} - \Delta t ((\tilde{q}_{i+1/2,j} - \tilde{q}_{i-1/2,j}) / \Delta x + (\tilde{q}_{i,j+1/2} - \tilde{q}_{i,j-1/2}) / \Delta y), \\ \tilde{q}_{i+1/2,j} &= \begin{cases} \tilde{H}_{i,j} \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} & \text{if } \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} > 0, \\ \tilde{H}_{i+1,j} \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} & \text{if } \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} < 0, \end{cases} \quad \tilde{q}_{i,j+1/2} = \begin{cases} \tilde{H}_{i,j} \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} & \text{if } \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} > 0, \\ \tilde{H}_{i,j+1} \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} & \text{if } \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогичным образом записывались выражения для вычисления значений  $(u_\lambda)_{i+1/2,j}^{n+1}$  и  $(u_\phi)_{i,j+1/2}^{n+1}$ . Условием устойчивости разностной схемы является выполнение неравенства

$$\Delta t \leq \alpha \cdot \min \left\{ \frac{\Delta x}{|u_\lambda| + \sqrt{gH}}, \frac{\Delta y}{|u_\phi| + \sqrt{gH}} \right\} \text{ во всех узлах разностной сетки, где } 0 < \alpha < 1 \text{ – эмпирический}$$

коэффициент запаса устойчивости. Для расчета параметров течения в узлах сетки, попадающих в область суши, все параметры течения, в том числе и величина отклонения свободной поверхности от невозмущенного уровня  $\eta = H - h$  полагались равными нулю. В узлах сетки на границе воды и суши система уравнений мелкой воды записывалась в недивергентном виде, и на лагранжевом этапе для решения уравнений переноса использовались односторонние противопотоковые разности. Положение линии уреза определялось путем ее «улавливания» в узел разностной сетки.

### Верификация численных алгоритмов и валидация математической модели

Численные методы расчета наката волн на берег верифицировались на хорошо известных тестовых задачах [6] в одномерной и двумерной постановках.

В одномерном случае рассматривалась задача о накате уединенной волны на плоский откос с углом наклона  $\beta$ , сопрягающийся с участком дна постоянной глубины  $H_0$ . Для оценки качества результатов расчетов в двумерных случаях использовались материалы также хорошо известного натурального эксперимента, выполненного в исследовательской лаборатории ВМС США, воспроизводящего взаимодействие уединенной волны, распространяющейся в бассейне постоянной глубины с расположенным в центральной части такого бассейна коническим островом.

Сопоставление полученных численных результатов с натурными данными и с результатами аналитического анализа тестовых задач показали, что математическая модель и построенный на ее основе вычислительный алгоритм вполне адекватно воспроизводят процесс взаимодействия волн с препятствиями.

Результаты также демонстрируют сходимость к экспериментальным данным при адекватном подборе свойств (шероховатость) заливаемой суши.

### Пример моделирования наката волны цунами на побережье

Следуя принятой авторами технологии, для защищаемого пункта (здесь – Северо-Курильск) были построены детальные цифровые массивы топографии и батиметрии в соответствующей малой области. Источником информации для построения цифрового образа топографии суши послужил массив SRTM-3sec (SRTM version 2.1, [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM3/Eurasia/](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/)). Массив батиметрии создавался с использованием оцифрованных авторами изображений прилегающих к «защищаемым» участкам побережья акваторий, полученных из набора батиметрических карт C-MAP ООО «Компания «Век Камчатка Плюс» M-AN-C013.12 Kamchatka peninsula and Kuril islands, а также изображений доступных морских навигационных карт. В качестве батиметрического массива для глобальной области использовался фрагмент цифрового массива GEBCO-30sec.

Параметры вычислительного эксперимента для защищаемого пункта Северо-Курильск, включая границы глобальной и малой областей, время начала и окончания расчетов, приведены в Таблице 1. Пространственные шаги сетки для глобальной области составляли 10 угловых секунд, малой – 1 угловая секунда (около 30 метров), по каждому направлению. В качестве модельного источника был рассмотрен гипотетический сейсмический очаг с магнитудой  $M_w = 8.4$ , параметры которого приведены в Таблице 2.

Таблица 1. Параметры расчетных областей для моделирования распространения волн цунами и их наката на побережье

Границы глобальной области град.	Границы малой подобласти град.
153.8–158.8°E 47.0–52.0° N	156.1–156.3°E 50.6–50.725° N

Таблица 2. Список параметров модельного очага цунамигенного землетрясения с магнитудой  $M_w = 8.4$ , использовавшихся для предварительных расчетов наката на «защищаемые» участки побережья

Эпицентр, град.	L, км.	W, км.	$\delta$ град.	$\lambda$ , град.	$\theta$ , град.	$D_0$ , м.	$H_{top}$ , км.
156.75° E 50.98°N	215	75	15	90	38	5.5	25

В качестве результатов численного моделирования заплеска цунами, предоставляющих и возможность качественной оценки его адекватности, здесь приводится сопоставление расчетной и наблюдаемой зоны заплеска в районе Северо-Курильска (рис. 1), анализируя которое следует учесть,

что использованный в расчетах очаг не вполне соответствовал очагу известного исторического события ноября 1952 г. Распределение продолжительности заливания в зоне Северо-Курильска и поле скоростей течения в момент его наиболее интенсивной фазы представлены на рис. 2.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-05-00894, 12-07-00406), программы Интеграционных фундаментальных исследований СО РАН (проекты 117А, 37Б) и Президентской программы «Ведущие научные школы РФ» (грант № НШ-6293.2012.9).



Рис. 1. Сопоставление зон затопления во втором Курильском проливе: натурные данные о цунами 4.11.1952 г. (слева) – заштрихована зона затопления берега [2] и результаты, рассчитанные для гипотетического цунами (справа).

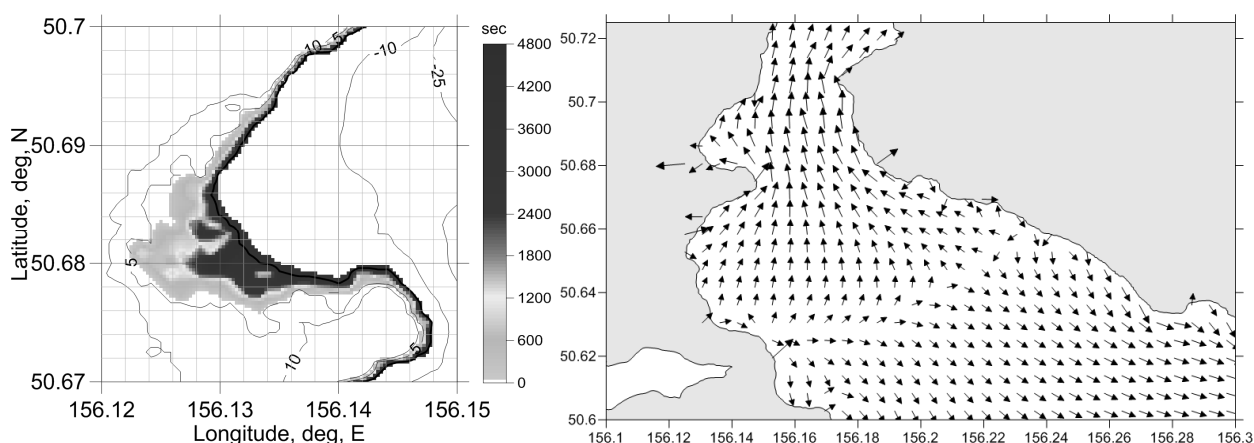


Рис. 2. Распределение продолжительности заливания в зоне Северо-Курильска (слева) и поле скоростей течения в окрестности г. Северо-Курильск в момент его наиболее интенсивной фазы (справа).

### Список литературы

1. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука. 1982. 392 с.
2. Саваренский Е.Ф., Тищенко В.Г., Святловский А.Е., Добровольский А.Д., Живаго А.В. Цунами 4–5 ноября 1952 г. // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1958. № 4. С. 36–37.
3. Рычков А.Д., Бейзель С.А., Чубаров Л.Б., Программа для ЭВМ: Модуль расчета наката волн цунами на берег RunUp-LP // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2013617980.
4. Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А. Программа расчета характеристик воды цунами сейсмического происхождения MGC // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2011614598.
5. Kawai H., Sato M., Kawaguchi K., Seki K. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake tsunami observed by GPS buoys // J. Jap. Soc. Civil Eng., Ser. B2. 2011. 67. P. 1291–1295.
6. Long-wave runup models. Editors: Yeh H., Liu P., Synolakis C. World Scientific, Singapore. 1996. 404 p.
7. MacCormack R.W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // J. Spacecraft and Rockets. 2003. 40. No. 5. P. 757–763.
8. Mori N., Takahashi T. and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group. Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku earthquake tsunami // Coastal Engineering J. 2012. 54. No. 1. P. 1–27.