

*В.С. Косых, Л.Б. Чубаров, В.К. Гусяков, Д.А. Камаев,  
В.М. Григорьева, С.А. Бейзель*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНЫХ ВЫСОТ ВОЛН ЦУНАМИ В ЗАЩИЩАЕМЫХ ПУНКТАХ ПОБЕРЕЖЬЯ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

### **1. Проблема прогнозирования высот волн цунами. Цели разработки методики оценки максимальных высот волн цунами**

Явление цунами представляет собой возникновение длиннопериодных волн (17–400 км) в океанах и морях вследствие подводных землетрясений, извержений подводных или островных вулканов, оползней больших масс земных пород. Считается, что в результате землетрясения происходит подвижка дна, имеющая вертикальную составляющую, вызывающая движение больших масс воды.

При создании СПЦ на дальневосточном побережье СССР в 1958–1959 гг. за основу был принят сейсмический метод прогноза, базирующийся на регистрации опережающих цунами сейсмических волн (магнитудно-географический критерий). По данным регистрации землетрясения определяются координаты его эпицентра и магнитуда. По этим двум величинам на основе анализа исторических данных оценивается возможность возникновения цунами.

Основным недостатком службы предупреждения цунами, выявившимся уже в первые годы ее работы, является большое число ложных тревог (до 80 % процентов случаев). В случае сохранения действующих методов прогноза и правил объявления тревоги цунами на основе только магнитудно-географического принципа при дальнейшем техническом совершенствовании службы ее эффективность будет снижаться за счет возрастания числа ложных тревог.

В настоящее время радикальное решение этой проблемы связывается с использованием в оперативной деятельности результатов моделирования характеристик цунами по сейсмологическим данным, а также использованием гидрофизических данных, получаемых при измерении каких-либо характеристик подходящей к берегу волны цунами, для оперативного уточнения результатов моделирования гидрофизических данных.

Целью разработки методики расчета максимальных высот волн цунами является создание методической и технологической основ для оценки по сейсмологическим данным максимальных высот волн цунами.

Методика должна обеспечивать расчет максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации.

## **2. Поршневая модель генерации волны цунами**

Для моделирования процесса возбуждения цунами используется решение замкнутой системы уравнений динамической теории упругости, описывающей колебания слоя сжимаемой жидкости (модель океана), залегающего на поверхности упругого полупространства (модель земной коры и верхней мантии).

В рамках длинноволнового приближения решение такой системы эквивалентно последовательному решению двух отдельных задач:

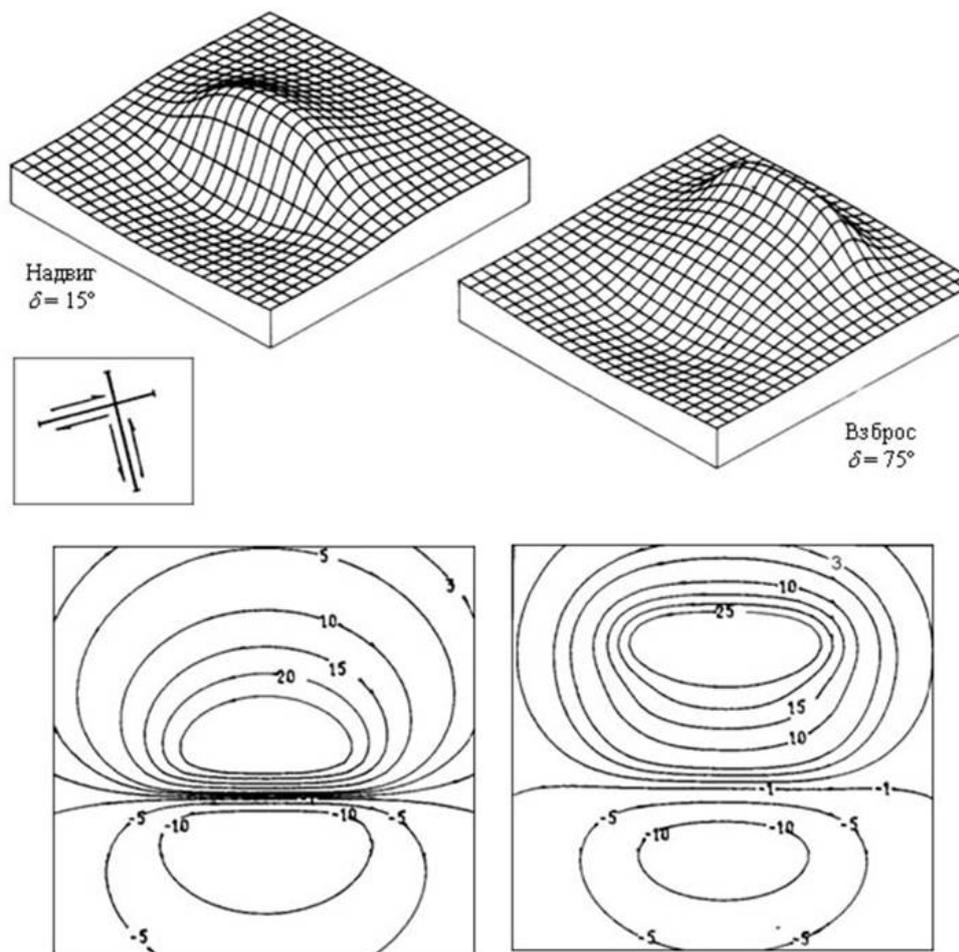
- 1) определение статических (остаточных) деформаций поверхности упругого полупространства, возникающих под действием внутреннего источника дислокационного типа (разрыва сплошности среды);
- 2) вычисление колебаний однородной несжимаемой жидкости в рамках теории мелкой воды при использовании деформаций дна, вычисленных при решении первой задачи, в качестве неоднородных граничных условий.

Такой подход, получивший название «поршневой модели» возбуждения цунами, широко применяется в задачах численного моделирования цунами в случаях, когда известны параметры очага землетрясения и детальная батиметрия дна океана, и в случаях, когда в этот процесс не вовлекается какой-либо вторичный механизм типа подводного оползня или берегового обвала.

### **2.1. Модель очага подводного землетрясения**

Согласно распространенному представлению, сеймотектонические цунами вызываются вертикальными смещениями морского дна, происходящими во время подводного землетрясения на больших площадях. В большинстве случаев фактические (вертикальные) смещения морского дна скрыты толщей воды и труднодоступны для непосредственных измерений. В такой ситуации в качестве начальных данных в программах расчета распространения волн цунами могут использоваться теоретически рассчитанные остаточные смещения от соответствующей модели очага землетрясения с параметрами, полученными из сейсмических наблюдений.

На основании сейсмических данных механизм очагов землетрясений определяется с точностью до двух равновероятных плоскостей, перпендикулярных друг другу. Какая из них реализуется в очаге землетрясения – этого по сейсмическим данным сказать нельзя, поэтому необходимо использовать дополнительную информацию. Идентификация одной из плоскостей в качестве истинной требует выбора типа механизма между *крутым взбросом* и *пологим надвигом* (рис. 1).



**Рис. 1. Основные механизмы очагов подводных землетрясений в периферической части Тихого океана.**

Система напряжений, обеспечивающая подвижки по возможным плоскостям, устанавливается на основании сейсмических данных однозначно.

Оба основных механизма (пологий надвиг и крутой взброс) создают примерно одинаковые вертикальные смещения дна в эпицентральной области.

Поршневая модель основана на решении уравнений статической теории упругости для однородного полупространства с внутренним распределенным источником дислокационного типа. Задача определения остаточного смещения морского дна сводится к решению

уравнения равновесия (уравнения Ляме) для вектора смещения частиц среды  $\bar{U}$  относительно начального ненапряженного состояния

$$(\lambda + \mu) \text{grad div } \bar{U} + \mu \Delta \bar{U} + \bar{F} = 0 \quad (1)$$

при нулевых напряжениях на свободной границе упругого полупространства (при  $z = 0$ )

$$\sigma_z = 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0 \text{ при } z = 0, \quad (2)$$

где  $\bar{U}(x, y, z)$  – вектор смещения частиц среды относительно начального напряженного состояния;  $\mu$  и  $\lambda$  – параметры Ляме упругой среды;  $\bar{F}$  – приложенная сила, отнесенная к единице объема.

Решение задачи (1) – (2) [1, 2, 4–6] строится для единичной вертикальной и горизонтальной сосредоточенной силы, затем делается переход к дипольным силовым источникам, моделирующим подвижку по бесконечно малому элементу разрыва. Далее решение обобщается на случай пространственного источника дислокационного типа. В качестве меры интенсивности такого источника используется величина его сейсмического момента

$$M_0 = \mu \cdot L \cdot W \cdot D_0, \quad (3)$$

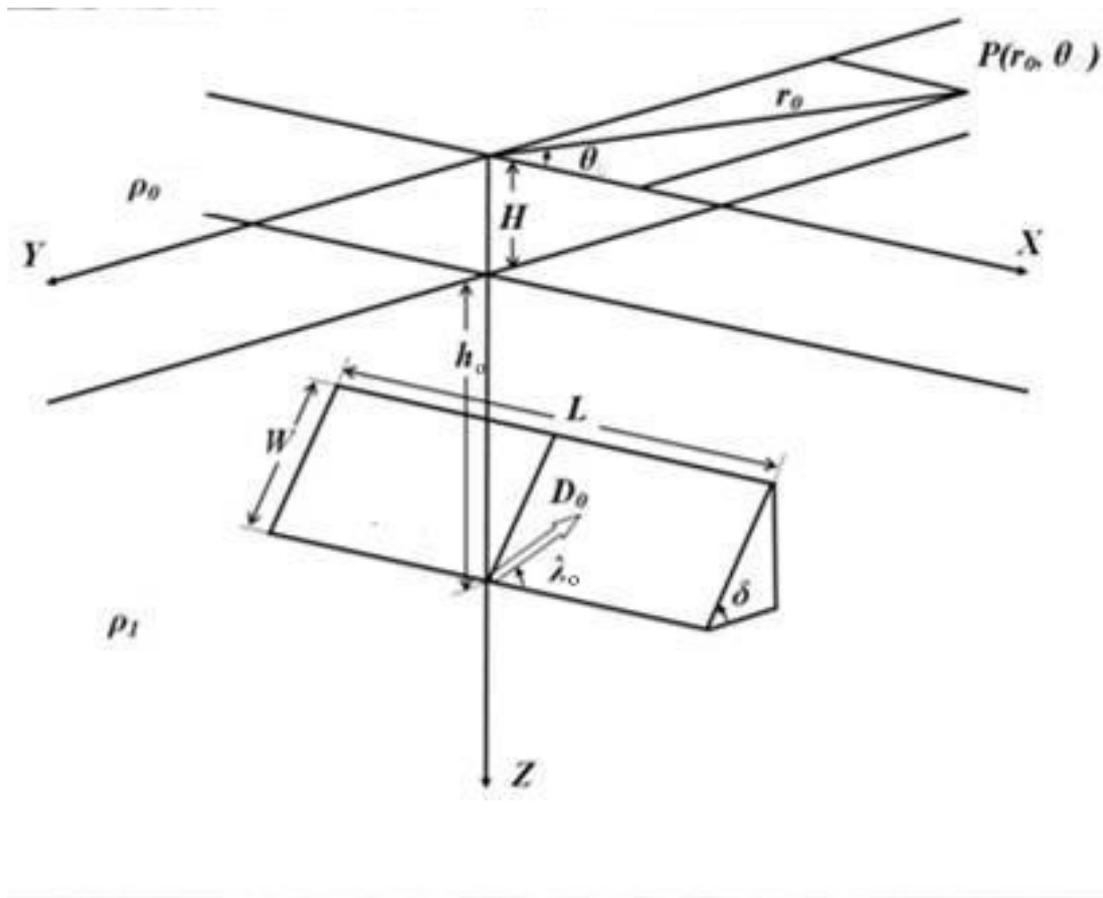
где параметру  $M_0$  по известному корреляционному соотношению [8] может быть сопоставлена величина его моментной магнитуды

$$M_W = 2/3(\lg M_0 - 9). \quad (4)$$

Смещения для пространственного разрыва вычисляются как сумма смещений элементарных разрывов, вызванных точечными силовыми диполями.

Исходными данными для расчетов начальных смещений в очагах цунами являются положение и параметры описанного выше пространственного дислокационного источника, моделирующего очаг подводного землетрясения (рис. 2):

- длина разрыва  $L$ ;
- ширина разрыва  $W$ ;
- глубина верхнего края разрыва  $h_0$ ;
- угол простираия (азимут) разрыва  $\theta$ ;
- угол падения плоскости разрыва  $\delta$ ;
- направление подвижки в плоскости разрыва  $\lambda_0$ ,
- смещение противоположных крыльев разрыва (подвижки)  $D_0$ .



**Рис. 2. Основные параметры очагов землетрясений.**

Значения параметров  $L$ ,  $W$ ,  $h_0$ ,  $D_0$ , углы  $\delta$  и  $\lambda_0$  выбираются на основе информации, полученной из анализа произошедших ранее землетрясений и по результатам анализа сеймотектонических особенностей региона, угол простирания (азимут) разрыва  $\theta$  принимается равным углу простирания глубоководной впадины или ориентации береговой линии в районе очага землетрясения.

## **2.2. Алгоритмическая реализация модели смещения дна океана в очаге землетрясения**

Смещения дна рассчитываются для прямоугольной подобласти, размеры которой примерно вдвое превышают размеры площадки разрыва (величины  $L$  и  $W$ ), в узлах той же сетки, которая используется для расчета распространения цунами. Оценки показывают, что такая подобласть содержит примерно 90 % общего объема перемещения дна бассейна, так что вклад в генерацию цунами неучитываемых деформаций дна во внешней области можно считать достаточно малым. В такой постановке также пренебрегается искажениями поля остаточных смещений, вносимыми неоднородностями свободной границы упругого полупространства (рельефом дна).

Зависимость нарастания смещения от времени аппроксимируется следующей функцией:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ t/\tau_0, & 0 \leq t \leq \tau_0, \\ 1, & t \geq \tau_0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\tau_0$  – характерное время нарастания смещения по разрыву. Значение параметра  $\tau_0$  принимается равным одному шагу по времени разностной схемы, аппроксимирующей систему уравнений, описывающую движение волны цунами в океане.

Перечисленные выше основные параметры подаются на вход программы, предназначенной для расчета начального возмущения на квадратной равномерной сетке в сферических координатах. Сформированный массив начального возмущения подается на вход программы расчета динамических характеристик цунами.

### **2.3. Методика расчета динамических характеристик волн цунами**

Для определения максимальных высот волн цунами в окрестности защищаемых пунктов используются классические уравнения мелкой воды. Построенная на основе этих уравнений численная модель обладает набором физических, географических и математических параметров.

К физико-географическим параметрам относят:

- начальные данные – форма начального смещения свободной поверхности;
- форма границ – очертания берегов и сооружений;
- типы граничных условий;
- батиметрия;
- коэффициент шероховатости донной поверхности.

Математические параметры возникают в ходе построения вычислительных алгоритмов. В модели реализуется алгоритм расчета распространения волн цунами, основанный на различных модификациях конечно-разностной схемы Мак-Кормака [7], с учетом двух типов граничных условий: отражение от вертикальной непроницаемой границы и проход волн за границы расчетной области.

#### **2.3.1. Математическая модель распространения и трансформации волн цунами**

При моделировании реальных событий приходится учитывать кривизну земной поверхности, поэтому при описании законов распространения и трансформации цунами на большие расстояния уравнения гидродинамики записываются на сфере. В географической

системе координат линейные уравнения мелкой воды с учетом воздействия внешних сил Кориолиса и донного трения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \psi} \left[ \frac{\partial (Hu)}{\partial \varphi} + \frac{\partial (Hv \cos \psi)}{\partial \psi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \psi} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} &= f_1, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{g}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} &= f_2. \end{aligned} \quad (6)$$

где  $h$  – полная глубина слоя жидкости, м;  $t$  – время, с;  $R$  – средний радиус Земли, км;  $\psi$  – географическая широта, град;  $\varphi$  – географическая долгота, град;  $H$  – глубина невозмущенного слоя жидкости (океана), м;  $u$  – компонента вектора скорости по географической долготе, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $v$  – компонента вектора скорости по географической широте, м/с;  $\eta$  – смещение свободной поверхности (океана), м;  $f_1 = lv - gk^2 \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$ ;  $f_2 = -lu - gk^2 \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$ ;  $l = 2\omega \sin \psi$ .

При моделировании трансформации волн цунами на их пути от области генерации к защищаемому побережью рассматриваются два варианта взаимодействия волн с границами вычислительной области. Это свободный выход волны за пределы области и отражение от условно возведенной вертикальной стены, с помощью которой моделируются очертания островов, контуры берега и прибрежные сооружения вдоль береговой линии.

На фрагментах внутренней границы, являющихся меридианами, граничные условия имеют вид:

$$u = 0, \partial v / \partial \varphi = 0, \partial \eta / \partial \varphi = 0;$$

а на параллелях, соответственно

$$v = 0, \partial u / \partial \psi = 0, \partial \eta / \partial \psi = 0.$$

На внешних границах  $\Omega(\varphi, \psi)$  ставятся условия Зоммерфельда. В случае используемой системы координат они имеют вид следующих соотношений на параллелях:

$$\begin{aligned} R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm c \frac{\partial \eta}{\partial \psi} &= 0, \\ R \frac{\partial u}{\partial t} \pm c \frac{\partial u}{\partial \psi} &= 0, \\ R \frac{\partial v}{\partial t} \pm c \frac{\partial v}{\partial \psi} &= 0 \end{aligned}$$

и на меридианах:

$$R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \psi} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} = 0,$$

$$R \frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \psi} \frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0,$$

$$R \frac{\partial v}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \psi} \frac{\partial v}{\partial \varphi} = 0,$$

$c = \sqrt{gh}$ , выбор знака  $\pm$  зависит от направления внешней нормали к соответствующей стороне (границе) прямоугольника.

Начальное смещение свободной поверхности океана (возмущение), порожденное модельным цунамигенным землетрясением, рассчитывается по модели сейсмического источника.

Начальные скорости  $u_0$  и  $v_0$  полагаются нулевыми.

### 2.3.2. Вычислительные алгоритмы для моделирования распространения и трансформации волн цунами

Область расчета представляет собой прямоугольник  $\Omega(\varphi, \psi) = \{(\varphi, \psi) : \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2, \psi_1 \leq \psi \leq \psi_2\}$ . Верхняя и нижняя стороны прямоугольника параллельны экватору, а левая и правая проходят по меридианам. Звенья границы “вертикальная стенка” проходят через узлы равномерной прямоугольной сетки так, что всегда параллельны внешним сторонам прямоугольника  $\Omega(\varphi, \psi)$ .

Батиметрия поверхности дна и топография суши являются фиксированными. Математически эти данные представляют собой сеточную функцию  $\tilde{H}(\varphi_i, \psi_j)$ ,  $0 \leq i \leq N_\varphi, 0 \leq j \leq N_\psi$ , определенную в узлах дискретной области  $\bar{\Omega}$ . Значения  $\tilde{H}(\varphi_i, \psi_j)$  определяются как численные значения глубин и высот (возвышение суши над уровнем моря), заданных на равномерной сетке. Отметим, что  $\tilde{H}(\varphi_i, \psi_j)$  совпадает с  $H(\varphi_i, \psi_j)$  – глубиной невозмущенного слоя жидкости – в «водных» точках области  $\bar{\Omega}$ . Значения высот используются при определении заплеска на сухой берег.

В области  $\Omega(\varphi, \psi)$  в плоскости географических координат  $\psi$  и  $\varphi$  вводится равномерная прямоугольная сетка  $\bar{\Omega} = \{(\varphi_i, \psi_j) : \varphi_1 \leq \varphi_i \leq \varphi_2, \psi_1 \leq \psi_j \leq \psi_2, 0 \leq i \leq N_\varphi, 0 \leq j \leq N_\psi\}$  с шагами  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\psi$  по пространственным переменным  $\varphi$  и  $\psi$  соответственно;  $\Delta\tau^n = t^{n+1} - t^n$  – шаг по времени.

Система уравнений (1) во внутренних узлах сетки  $\bar{\Omega}$  аппроксимируется явной двухшаговой конечно-разностной схемой типа Мак-Кормака [7]:

Первый шаг

$$\begin{aligned} \frac{\hat{h}_{ij} - h_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \psi_j} \left[ \frac{H_{ij}^n u_{ij}^n - H_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta \varphi} + \frac{\cos \psi_j H_{ij}^n v_{ij}^n - \cos \psi_{j-1} H_{ij-1}^n v_{ij-1}^n}{\Delta \psi} \right] &= 0, \\ \frac{\hat{u}_{ij} - u_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{g}{R \cos \psi_j} \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta \varphi} &= f_{1ij}^n, \\ \frac{\hat{v}_{ij} - v_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{g}{R} \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{ij-1}^n}{\Delta \psi} &= f_{2ij}^n. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $f_{1ij}^n = l_j v_{ij}^n - gk^2 \frac{u_{ij}^n \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (v_{ij}^n)^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}$ ,  $f_{2ij}^n = -l_j u_{ij}^n - gk^2 \frac{v_{ij}^n \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (v_{ij}^n)^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}$ ,  $l_j = 2\omega \sin \psi_j$ .

Второй шаг

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij}^{n+1} - (h_{ij}^n + \hat{h}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{1}{R \cos \psi_j} \left[ \frac{H_{i+1j}^n \hat{u}_{i+1j} - H_{ij}^n \hat{u}_{ij}}{\Delta \varphi} + \frac{\cos \psi_{j+1} H_{i+1j+1}^n \hat{v}_{i+1j+1} - \cos \psi_j H_{ij}^n \hat{v}_{ij}}{\Delta \psi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - (u_{ij}^n + \hat{u}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{g}{R \cos \psi_j} \frac{\hat{h}_{i+1j} - H_{i+1j}^n - \hat{h}_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \varphi} &= \mathcal{F}_{1ij}, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - (v_{ij}^n + \hat{v}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{g}{R} \frac{\hat{h}_{ij+1} - H_{ij+1}^n - \hat{h}_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \psi} &= \mathcal{F}_{2ij}, \\ \mathcal{F}_{1ij} &= l_j \hat{v}_{ij} - gk^2 \frac{\hat{u}_{ij} \sqrt{(\hat{u}_{ij})^2 + (\hat{v}_{ij})^2}}{(\hat{h}_{ij})^{4/3}}, \quad \mathcal{F}_{2ij} = -l_j \hat{u}_{ij} - gk^2 \frac{\hat{v}_{ij} \sqrt{(\hat{u}_{ij})^2 + (\hat{v}_{ij})^2}}{(\hat{h}_{ij})^{4/3}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для расчета по описанному выше алгоритму необходимо задать значения физических параметров ( $R, \omega, g, k$ ), а также шаг по времени разностной схемы. Последний не является постоянным, а на каждом шаге вычисляется из условия устойчивости:

$$\begin{aligned} K \equiv \frac{\tau^{n+1}}{R} \left( \max_{\bar{\Omega}} (u_{ij}^n) / (\Delta \varphi \min(\cos \psi_1, \cos \psi_2)) + \right. \\ \left. + \max_{\bar{\Omega}} (v_{ij}^n) / \Delta \varphi + \sqrt{g \left( 1 / (\Delta \varphi \min(\cos \psi_1, \cos \psi_2))^2 + 1 / (\Delta \psi)^2 \right) \max_{\bar{\Omega}} (h_{ij}^n)} \right) \leq 1. \end{aligned} \quad (9)$$

где  $K$  – число Куранта. Теоретически желательно использовать значение  $K$ , наиболее близкое к единице, но в расчетах предусматривается некоторый запас устойчивости, поэтому принимается  $K = 0,9$ .

Для стабилизации решения в случае возникновения разного рода вычислительных неустойчивостей используются следующие вспомогательные методы:

- применение искусственной вязкости;
- избирательная фильтрация высокочастотных возмущений свободной поверхности;
- коррекция решения в случае нефизического роста скоростей.

Обеспечение необходимой точности расчета достигается за счет локального сгущения сетки в окрестности защищаемых пунктов.

### **3. Основные технологические этапы выполнения работ по расчету максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации**

Методика выполнения работ включает следующие технологические этапы:

3.1. Утверждение перечня защищаемых пунктов Дальневосточного побережья РФ. На основе изучения сеймотектонической обстановки в цунамигенных зонах, угрожающих этому побережью, определяется схема возможного размещения модельных землетрясений.

3.2. Разработка и утверждение совокупности модельных цунамигенных землетрясений, основанных на модели Подъяпольского-Гусякова-Окады [3]. Эта работа также выполняется с привлечением дополнительных экспертных оценок.

3.3. Создание массива батиметрии, ее коррекция и подбор параметров сглаживания для обеспечения устойчивости расчетов.

3.4. Установка мареографов вблизи защищаемых пунктов.

3.5. Проведение производственных расчетов, в ходе которых определяются:

**а) для каждого модельного землетрясения:**

- максимальные значения уровня водной поверхности в каждом защищаемом пункте,
- минимальные значения уровня водной поверхности в каждом защищаемом пункте,
- максимальная высота волны – полусумма максимальных и минимальных значений уровня в пределах одного колебания в каждом защищаемом пункте;
- максимальный размах колебаний – полусумма максимальных и минимальных значений уровня за все время колебаний в каждом защищаемом пункте;
- диаграмма направленности («свечения» – максимумы и минимумы уровня свободной поверхности во всей области за все время расчета).

Для каждого землетрясения определяется время прихода максимума и минимума волн (по всем защищаемым пунктам), а также названия защищаемых пунктов, в которых эти значения были определены.

**б) для каждого защищаемого пункта:**

- максимальные значения уровня свободной поверхности, порожденные каждым модельным очагом землетрясения;
- минимальные значения уровня свободной поверхности, порожденных каждым модельным очагом землетрясения;
- максимальный размах колебаний – сумма абсолютных величин максимальных и минимальных значений уровня за все время колебаний, порожденные каждым модельным очагом.

Для каждого защищаемого пункта определяются время наступления максимума и минимума, а также имена (индексы) землетрясений, породивших эти экстремальные значения.

#### **4. Выбор параметров модели очага землетрясения**

##### **4.1. Сеймотектоническая характеристика акваторий Дальневосточного региона Российской Федерации**

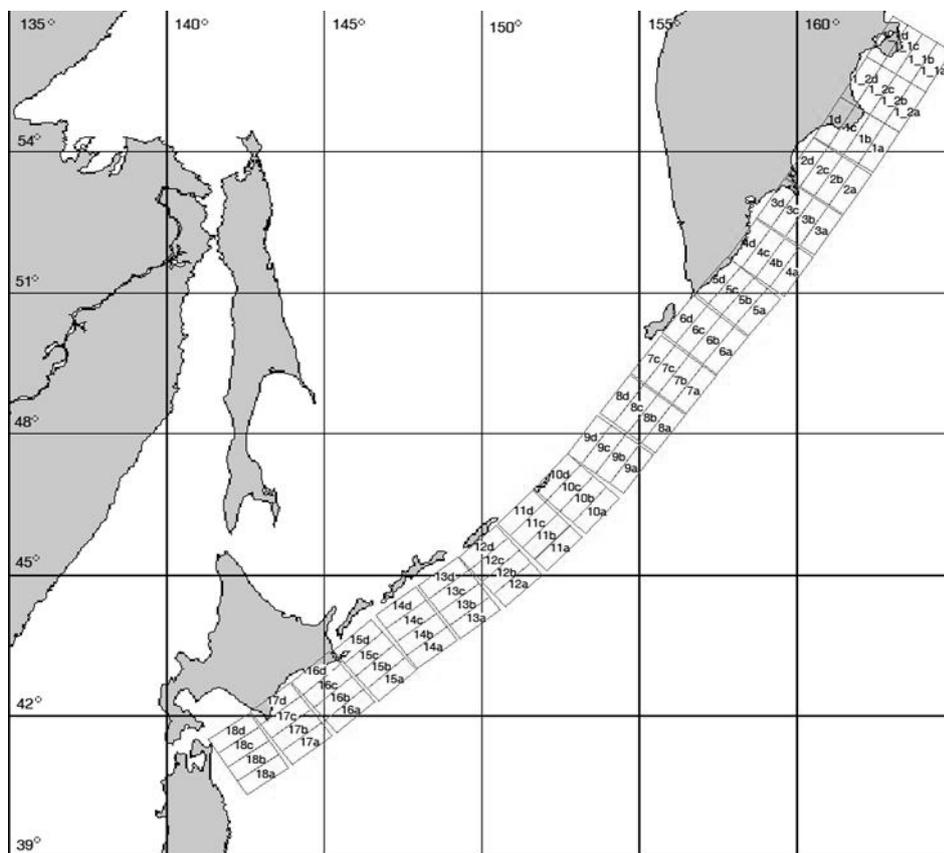
Непосредственную угрозу цунами для восточного побережья Камчатки и Курильских островов представляют очаги мелкофокусных подводных землетрясений, расположенные в основной Курило-Камчатской сеймотектонической зоне, которая протягивается вдоль всего восточного побережья Курильских островов и Камчатки и располагается между внешним краем шельфа и осью глубоководного желоба. На севере эта зона примыкает к Алеутско-Аляскинской сейсмической зоне, подходящей к ней под прямым углом в районе полуострова Камчатский, образуя здесь сложный сеймотектонический узел стыка трех плит – Тихоокеанской, Северо-Американской и Охотской. На юге Курило-Камчатская зона плавно (при небольшом угловом несогласии) сочленяется с Японской сейсмоактивной зоной в районе пролива Цугару, разделяющего острова Хоккайдо и Хонсю. Общая протяженность зоны составляет около 2300 км при средней ширине порядка 150 км.

Согласно концепции тектоники плит, сейсмические процессы в периферийных частях Тихого океана обусловлены поддвигом океанической плиты под континентальную в зонах островных дуг и активных континентальных окраин. Типичным примером такой зоны является Курильская островная дуга.

##### **4.2. Курило-Камчатская зона**

Основную угрозу цунами для побережья Курильских островов несут очаги мелкофокусных подводных землетрясений, расположенные в основной Курило-Камчатской сеймотектонической зоне.

При построении моделей очагов для этого региона за основу было принято распределение модельных очагов землетрясений с магнитудой  $M_w = 7,8$ , которая является пороговой для возбуждения цунами, опасных для восточного побережья Курил и Камчатки. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w = 7,8$  в Курило-Камчатской зоне приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w=7,8$  в Курило-Камчатской зоне.**

Размеры плоскости разрыва для очагов данной магнитуды были приняты равными  $L = 108$  км,  $W = 38$  км при величине подвижки  $D_0 = 2,74$  м.

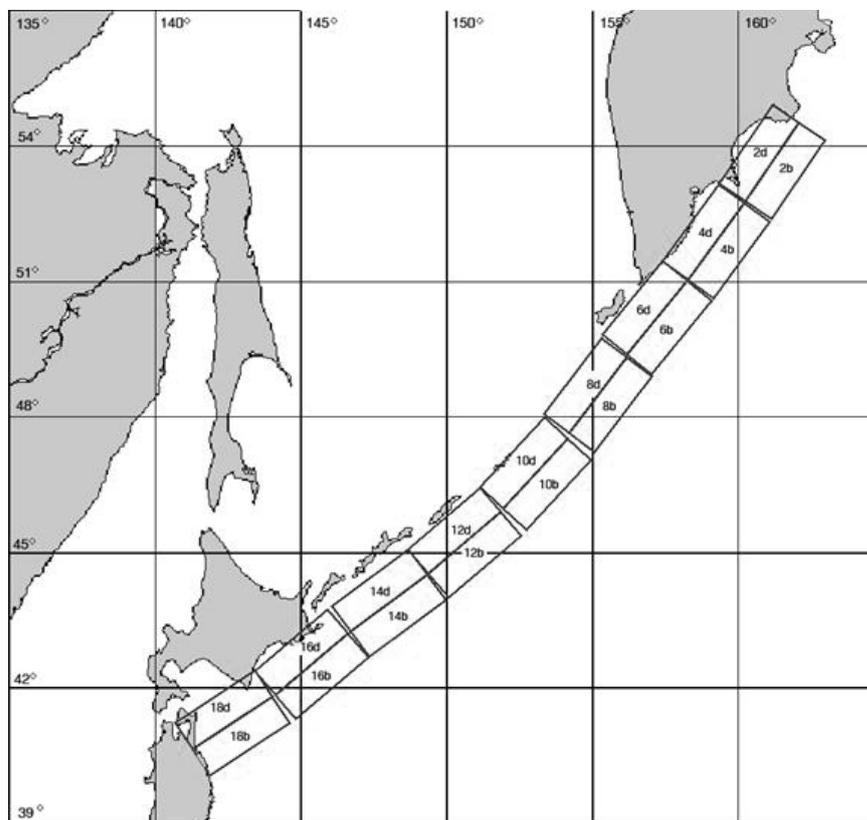
В качестве основного механизма очагов был принят пологий надвиг по главной литосферной границе раздела этой зоны, т.е. границе между поддвигаемой океанической корой и надвигающимся на нее островодужным выступом континентальной литосферы.

Углы падения плоскости разлома были приняты равными  $\delta = 15^\circ$ , направление подвижки  $\lambda = 90^\circ$ .

Четыре полосы таких модельных очагов, с 18 очагами в каждой полосе, равномерно располагаются в зоне субдукции тихоокеанской океанической плиты под азиатскую континентальную плиту. Глубина верхнего края разрыва каждой следующей полосы

закономерно увеличивается (в соответствии с углом падения плоскости разрыва) по мере удаления от оси глубоководного желоба.

Карта модельных землетрясений для более сильных и предельно возможных для южной части Курило-Камчатской зоны землетрясений с магнитудами  $M_w = 8,4$  представлена на рис. 4.



**Рис. 4. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w = 8,4$  в Курило-Камчатской зоне.**

Размеры плоскостей разрывов для этих модельных землетрясений приняты равными:  $L = 215$  км,  $W = 75$  км и  $L = 430$  км,  $W = 150$  км.

Механизмы землетрясений в этом случае были приняты аналогичными механизмам очагов с магнитудой 7,8, т.е. пологие надвиги, происходящие по основной литосферной границе раздела ( $\delta = 15^\circ$ ,  $\lambda = 90^\circ$ ). В каждом блоке поперек простирания сейсмоактивной зоны располагаются по два таких очага, вдоль простирания на всем протяжении зоны располагается девять блоков.

### **4.3. Приморье и Сахалин**

Основная угроза цунами для побережья Приморья и Сахалина исходит от мелкофокусных землетрясений, происходящих в восточной части Японского моря, южной части Татарского пролива и частично от землетрясений в южной части Охотского моря,

происходящих вблизи северного побережья Хоккайдо. Карта модельных землетрясений представлена на рис. 5.



**Рис. 5. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w=7.8$  в Японской и Сахалинской зонах.**

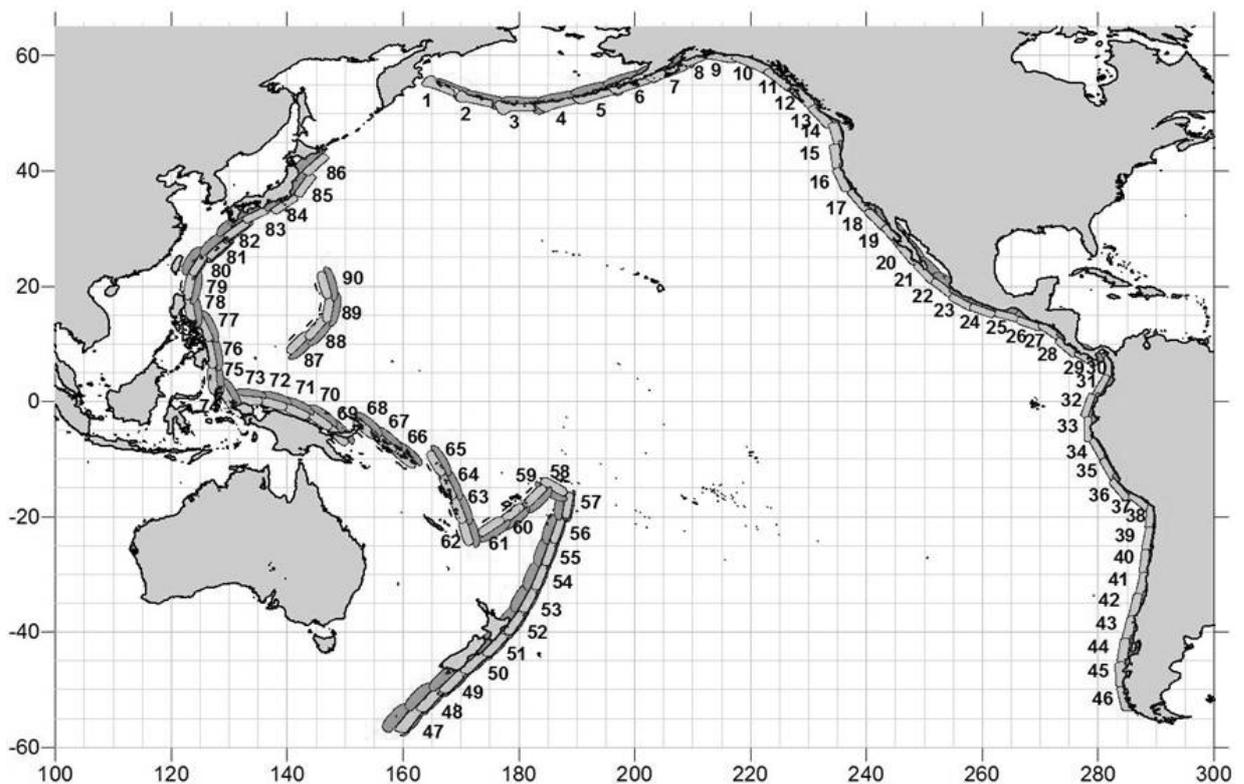
Очаги в восточной части Японского моря аппроксимировались системой подвижек с параметрами:

$$\lambda = 90^\circ, \delta = \pm 70^\circ.$$

Размеры плоскостей разрыва для этих землетрясений были приняты такими же, как и для основной системы очагов, располагающихся вдоль глубоководного желоба, т.е.  $L = 108$  км,  $W = 38$  км,  $D_0 = 2,74$  м.

#### 4.4. Дальняя зона

Схема размещения потенциально опасных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой  $M_w = 9,0$  в дальней зоне приведена на рис. 6. Очаг такого землетрясения представляет собой площадку разрыва длиной  $L = 430$  км, шириной  $W = 150$  км, величиной подвижки  $D = 11,6$  м.



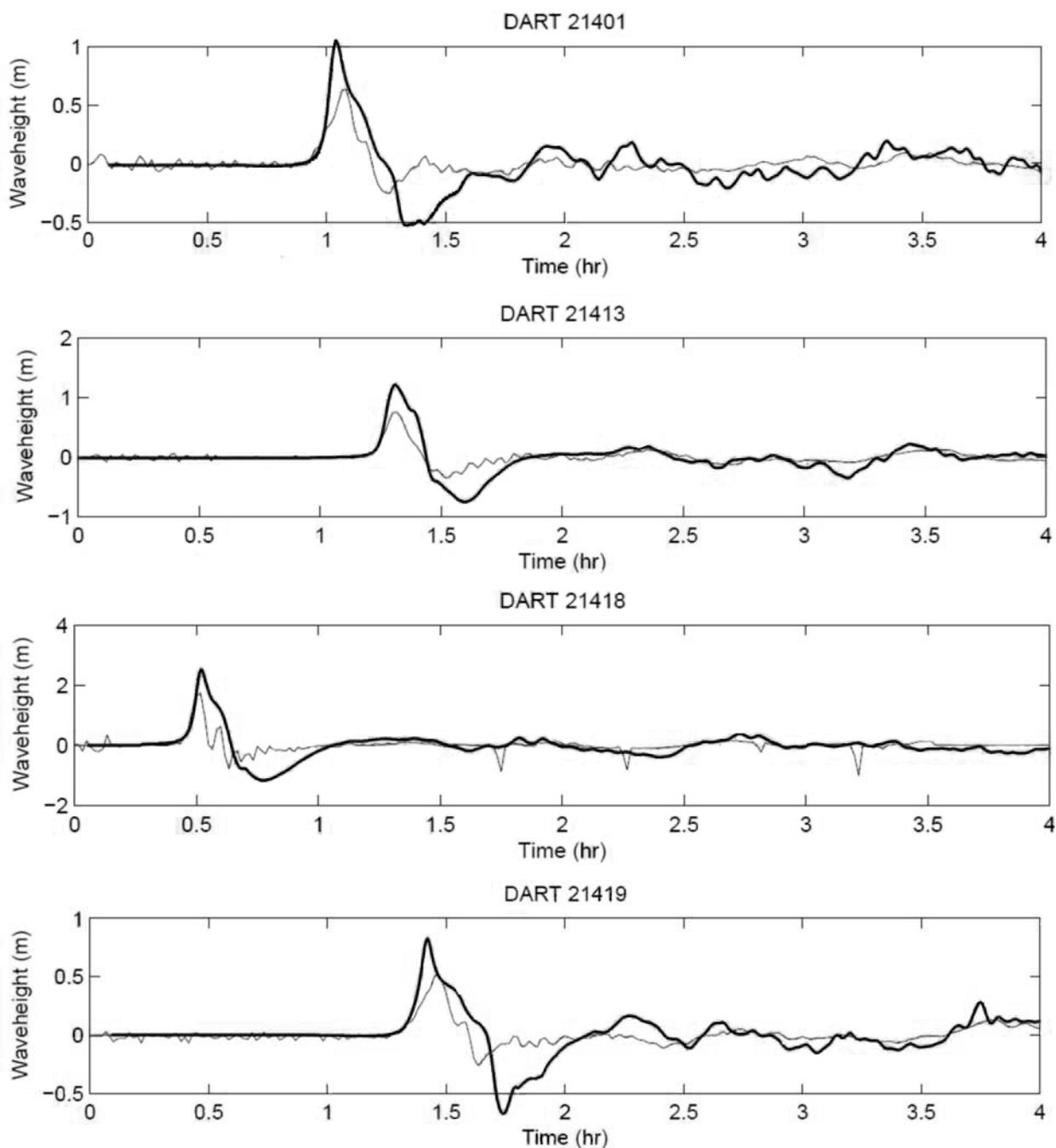
**Рис. 6. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w=9.0$  в дальней зоне.**

На рис. 6 цифрами обозначены группы:

1. Алеутско-Аляскинская группа (1–8),
2. Североамериканская группа (9–22),
3. Центрально-американская группа (23–29),
4. Южноамериканская группа (30–46),
5. Группа Новой Зеландии – Тонга (47–57),
6. Группа Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов (58–74),
7. Филиппинская группа (75– 86),
8. Группа Гуама (87–90).

### **5. Результаты испытания методики**

Тестирование методики проводилось на данных глубоководных (система DART) и прибрежных станций измерений уровня моря для реальных событий цунами 11 марта 2011 года вблизи острова Хоккайдо (Япония). Результаты сравнения измеренных приборами DART и рассчитанных значений уровней моря, приведенные на рис. 7, показывают хорошее соответствие.



**Рис. 7.** Сравнение измерений мареографов рассчитанных уровней моря. Район Тохоку (северо-восток о.Хонсю) цунами 11.03.2011 г. Черная линия – расчеты. Серая линия – данные.

### Заключение

В решении Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологогеофизическим прогнозам Росгидромета от 13 июня 2012 г. отмечено, что:

- в ФГБУ «НПО «Тайфун» совместно с ИВТ СО РАН, ИВМ и МГ СО РАН проводятся работы по созданию методов прогнозирования генерации и распространения волн цунами, баз прогностических данных, используемых в оперативной работе центров предупреждения о цунами Российской системы предупреждения о цунами (СПЦ);

– представленный к рассмотрению метод расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации по сейсмологическим данным (времени в очаге, магнитуде землетрясения, координатам эпицентра) позволяет решать следующие практические задачи по обеспечению функционирования Службы предупреждения о цунами на Дальнем востоке Российской Федерации: определение потенциально опасных для Дальневосточного побережья Российской Федерации цунамигенных землетрясений; построение модельных очагов цунамигенных землетрясений, включая моделирование поля начальных возмущений поверхности океана; моделирование поля максимальных и минимальных высот волн в виде сеток (картин свечения); проведение предварительного математического моделирования с целью оперативного прогнозирования характеристик цунами;

– эффективность представленного метода расчета по сейсмологическим данным (времени в очаге, магнитуде землетрясения, координатам эпицентра) максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации подтверждается сравнением результатов моделирования генерации и распространения волн цунами с данными регистрации волн цунами донными станциями, а также сопоставления с данными регистрации волн цунами береговыми постами измерений уровня моря.

ЦМКП считает необходимым одобрить работу ФГБУ «НПО «Тайфун» совместно с ИВТ СО РАН, ИВМ и МГ СО РАН по созданию метода расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации.

ЦМКП считает необходимым рекомендовать:

– использовать разработанный метод расчета максимальных высот волн цунами по сейсмологическим данным (времени в очаге, магнитуде землетрясения, координатам эпицентра) в качестве основного метода для прогнозирования характеристик цунами в оперативной работе центров предупреждения о цунами Российской СПЦ;

– продолжить разработку методов практической оценки характеристик цунами в интересах Службы предупреждения о цунами в части моделирования наката волн цунами на берег.

### **Список литературы**

1. *Введенская А.В.* Определение полей смещения при землетрясениях с помощью теории дислокации // Известия АН СССР. Серия геофизич. – 1956. – № 3. – С. 277–284.
2. *Введенская А.В.* О поле смещений при разрывах сплошности упругой среды // Известия АН СССР. Серия геофизич. – 1959. – № 4. – С. 516–526.

3. *Гусяков В.К.* Остаточные смещения на поверхности упругого полу пространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. – Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978. – С. 23–51.

4. *Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 176 с.

5. *Лурье А.И.* Пространственные задачи теории упругости. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 491 с.

6. *Снеддон И., Бэрри Д.* Классическая теория упругости. – М.: Физматгиз, 1961. – 220 с.

7. *Федотова З.И.* О применении разностной схемы Мак-Кормака для задач длинноволновой гидродинамики // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. Часть 2. Специальный выпуск. – С. 53–63.

8. *Aki K.* Earthquake mechanism // Tectonophysics. – 1972. – Vol. 13. – P. 423–446.