

# РАСПОЛОЖЕНИЕ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СВОЕВРЕМЕННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ С ИХ АМПЛИТУДНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

А.С. АСТРАКОВА, Д.В. БАННИКОВ, С.Г. ЧЕРНЫЙ  
*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия*  
e-mail: anna.astrakova@gmail.com, cher@ict.nsc.ru

М.М. ЛАВРЕНТЬЕВ (мл.)  
*Новосибирский государственный университет, Россия*

В работе ставится задача оптимального расположения заданного числа датчиков для наискорейшего обнаружения волны цунами с учетом амплитудной фильтрации возмущений. Для этого строится функционал, обеспечивающий минимальное время обнаружения возмущения из любой точки возможного возникновения волны цунами. Кроме того, чтобы распознать среди множества возмущений волны цунами, задаются функционалы и ограничения отсеивающие прочие возмущения. При расчете времён добегания и амплитуд возмущений используется длинноволновое приближение зависимости скорости волны от глубины. Решение задачи в различных постановках осуществляется с помощью генетического алгоритма и в случае двухцелевой оптимизации представляет собой фронт Парето. Алгоритм исследуется на тестовой акватории с использованием модельных амплитуд.

*Ключевые слова:* генетический алгоритм, оптимальное расположение датчиков, волны цунами, амплитуда волны.

## Введение

В работе [1] была решена задача оптимального размещения датчиков для заблаговременного обнаружения волны цунами. В настоящей работе кроме оптимизации по времени обнаружения также вводится учёт амплитудной характеристики возмущения. Ставится и решается задача расположения заданного количества датчиков таким образом, чтобы они за кратчайшее время могли обнаружить возмущение, возникшее в любой точке области возможного формирования волн цунами, при одновременном отборе возмущений по значениям их амплитуд. Рассматривается оптимизационная постановка данной задачи реализующаяся в виде двухцелевой оптимизации и одноцелевой оптимизации с ограничением.

## 1. Общая постановка задачи

Пусть  $\Omega$  - область, включающая часть акватории с переменной глубиной дна  $h$ , участки суши и зону расположения источников волн цунами  $\mathbf{P}$ . Через  $\mathbf{D}$  обозначим фрагмент акватории  $\Omega$ , в которой могут устанавливаться датчики обнаружения волн цунами. Известна область источников волн цунами  $\mathbf{P}$  из  $\Omega$ . Назовём конфигурацией  $L$  датчиков вектор  $\mathbf{Q} = \{\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_L\}$ ,  $\mathbf{q}_i$  из  $\mathbf{D}$ , представляющий одно из возможных решений задачи.

Требуется определить  $\mathbf{Q}$ , обеспечивающую обнаружение возмущения из любой точки области  $\mathbf{P}$  за минимальное время. При этом должны выполняться условия отсеивания возмущений, не вызывающих цунами. Для этого возможны несколько критериев отсеивания. Можно потребовать чтобы наибольшее возмущение от каждого источника регистрировалось всей конфигурацией или чтобы по крайней мере два датчика регистрировали волну, если её амплитуда не меньше заданного порога  $d$ .

## 2. Критерии расположения датчиков

### 2.1. Минимальное время обнаружения

Пусть  $\tau(\mathbf{p}_j, \mathbf{x})$  - минимальное время добегания волны цунами от точки  $\mathbf{p}_j$  из  $\mathbf{P}$  до произвольной точки  $\mathbf{x}$  из  $\Omega$ . Определение  $\tau(\mathbf{p}_j, \mathbf{x})$  ведется с помощью метода, изложенного в работе [2], при этом локальная скорость распространения возмущения определяется из длинноволнового приближения и равна  $\sqrt{gh}$  [3].

Время первого обнаружения волны цунами из  $\mathbf{p}_j$  конфигурацией  $\mathbf{Q}$  составит

$$t(\mathbf{p}_j, \mathbf{Q}) = \min_{1 \leq i \leq L} \tau(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i). \quad (1)$$

Гарантированное время обнаружения конфигурацией  $\mathbf{Q}$  возмущения, возникшего в любой из точек  $\mathbf{p}_j \in \mathbf{P}$ , определится как

$$T(\mathbf{Q}) = \max_{1 \leq j \leq P} t(\mathbf{p}_j, \mathbf{Q}). \quad (2)$$

Расположение датчиков, которое обеспечит минимум  $T(\mathbf{Q})$ , будет улавливать возмущение с любой точки области  $\mathbf{P}$  за минимальное время.

### 2.2. Амплитудная фильтрация возмущения

#### 2.2.1. Реальная и модельная амплитуда возмущения

Для регистрации волны цунами необходимо знать распределение её амплитуды от источника по акватории. На рис. 1a приведено распределение от некоторого источника. Характерный вид зависимости по любому из направлений от источника возмущения представлен на рис.1b сплошной линией.

Расчет распределений амплитуд проводится отдельной программой на кластере и достаточно трудоемок. Чтобы сэкономить время и провести большее количество тестов рассматривался модельный вид зависимости амплитуды от расстояния. При этом для проведения полноценных численных экспериментов важно, чтобы временной критерий и амплитудные критерии были противоречащими. На рис. 1b штриховой линией приведена форма зависимости, для которой требуемое условие будет выполняться.

Кроме того, необходимо чтобы модельный вид задавался максимально просто. На рис. 1c приведен вид зависимости, сохраняющий свойства второй рассматриваемой формы и удобный для тестирования. Он задается с помощью пяти параметров  $r_1, r_2, r_3, A_{\max}$  и  $A_{mid}$ .

Датчик определяет волну цунами, если амплитуда  $A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i) > d$ . Обозначенная серым область на рис. 1c показывает волну, которую датчик не будет фиксировать.

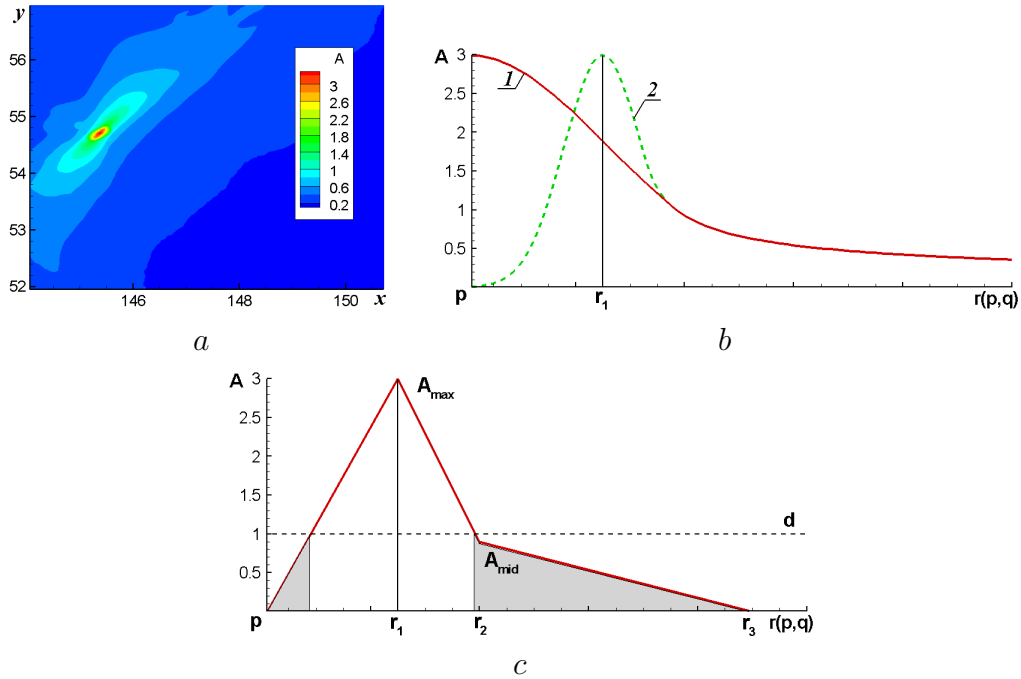


Рис. 1. Распределение значений максимальных амплитуд от источника в некоторой области  $\Omega$  (a), реальная и модельная форма, обозначены соответственно 1 и 2 (b), модельная форма, удобная для тестирования (c).

### 2.2.2. Обнаружение возмущения максимальной амплитуды хотя бы одним датчиком

Максимальная амплитуда от  $\mathbf{p}_j$ , обнаруженная конфигурацией, есть

$$A_j = \max_{1 \leq i \leq L} A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i) \quad (3)$$

Тогда наименьшей амплитудой среди всех источников будет

$$F_A = \min_{1 \leq j \leq P} A_j \quad (4)$$

Расположение датчиков, которое даст максимум  $F_A$ , обеспечит улавливание возмущения с как можно большей амплитудой хотя бы одним датчиком. В этом случае для каждого источника по крайней мере один датчик находит возмущение не меньше  $F_A$ .

### 2.2.3. Определение возмущения при наличии порога по крайней мере двумя датчиками

Введем функцию  $\psi$  следующим образом:

$$\psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i) = \begin{cases} 0, & A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i) > d; \\ d - A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i), & A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i) \leq d. \end{cases} \quad (5)$$

Будем рассматривать все пары  $\mathbf{q}_s$  и  $\mathbf{q}_l$ ,  $s, l \in \overline{1, L}$  различных датчиков, до которых доходит возмущение от источника  $\mathbf{p}_j$ . Если каждый из датчиков пары улавливает сигнал, величина  $\psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_s) + \psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_l)$  равна нулю. Если же амплитуда возмущения хотя бы одного

датчика ниже порога чувствительности  $d$ , эта величина будет положительна. Так как мы ищем как минимум два датчика, которые бы могли фиксировать возмущение, то нужно рассматривать наименьшую величину  $\psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_s) + \psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_l)$  для всех рассматриваемых пар, а именно

$$\min_{s \neq l} (\psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_s) + \psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_l)). \quad (6)$$

Далее рассмотрим

$$\varphi_2(Q) = \max_{1 \leq j \leq P} \min_{s \neq l} (\psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_s) + \psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_l)) \leq 0. \quad (7)$$

В случае, если хотя бы два датчика конфигурации улавливают возмущение из любой точки  $\mathbf{p}_j$ , то  $\varphi_2(Q)$  равна 0, причем  $\varphi_2(Q)$  не может принимать отрицательного значения. Поэтому, также можно рассматривать  $\varphi_2(Q)$  в качестве функционала, минимизируя его.

### 3. Математическая постановка задачи

В общем виде задача о расположении датчиков формулируется следующим образом:

Найти конфигурацию  $\mathbf{Q} = \{\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_L\}$ , обеспечивающую минимумы функционалов

$$\min_{\mathbf{Q} \in \Omega} (F_1(\mathbf{Q}), \dots, F_q(\mathbf{Q})), \quad (8)$$

при наличии фазовых ограничений

$$\mathbf{Q} \in \mathbf{D} \quad (9)$$

и целевых ограничений

$$\varphi_k(\mathbf{Q}) \leq 0, k = 1, \dots, K. \quad (10)$$

Метод решения, используемый для решения поставленной задачи, основан на генетическом алгоритме и подробно описан в [4].

### 4. Экспериментальные результаты

В приведенных ниже модельных задачах рассматривалась прямоугольная область акватории  $\Omega$  с сеткой  $780 \times 600$  (рис.2). В области возможного расположения датчиков  $\mathbf{D}$  глубина дна постоянна и равна  $h=2000$  м, остальная часть  $\Omega$  - суша, прямая  $\mathbf{P}$  - область источников. Модельная амплитуда задается следующими значениями

$$r_1 = 300, r_2 = 400, r_3 = 1000, A_{\max} = 2, A_{\text{mid}} = 0.7. \quad (11)$$

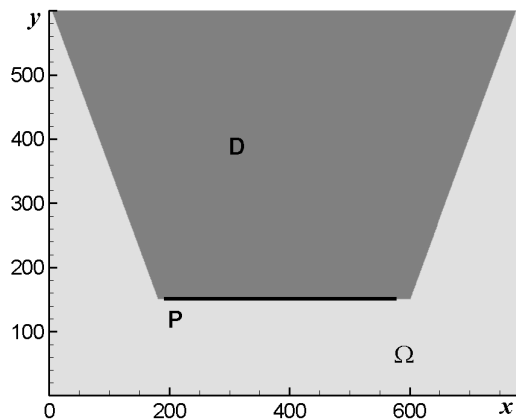


Рис. 2. Область  $\Omega$  с акваторией, подобластью  $\mathbf{D}$  и областью источников  $\mathbf{P}$ .

#### 4.1. Два источника $p_1, p_2$ , один датчик $q_1$

##### 4.1.1. Одноцелевая оптимизация по $F_A$ и $T$ и двухцелевая оптимизация по $T$ и $F_A$

Максимизация только по  $F_A$  дает решение **A**, определяющееся пересечением радиусов окружностей  $r_1 = 300$  от источников (рис. 3а). Минимизация только по  $T$  дает решение **B**, расположенное посередине между источниками. При двухцелевой оптимизации решения должны лежать на линии **AB**. Численные решения этой задачи изображены на этом же рисунке. История сходимости в пространстве функционалов изображена на рис. 3б.

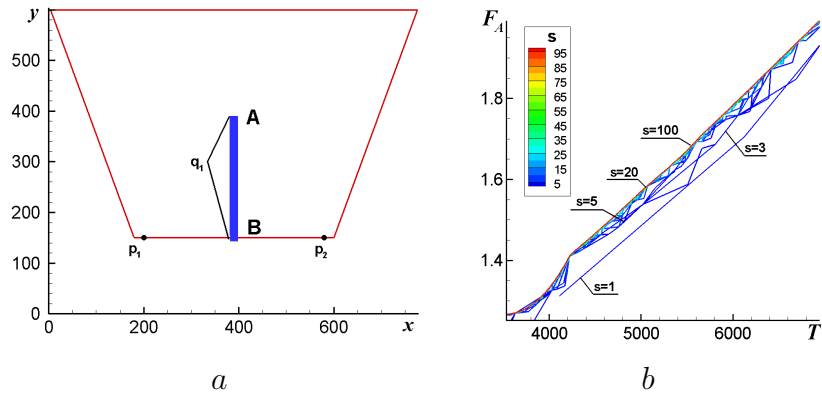


Рис. 3. Численное решение задачи, датчики взяты с фронта Парето (а), сходимость к фронту Парето в пространстве функционалов (б).

#### 4.2. Шесть источников $p_1, \dots, p_6$ , два датчика $q_1, q_2$

Шесть датчиков равномерно распределены между точками (200, 150) и (580, 150). Порог  $d = A_{\max} = 2$ . Модельная амплитуда задавалась следующими значениями

$$r_1 = 100, r_2 = 300, r_3 = 1000, A_{\max} = 2, A_{\text{mid}} = 0.7. \quad (12)$$

##### 4.2.1. Одноцелевая оптимизация с ограничением $\min_{Q \in D} T(Q), \varphi_2 \leq 0$

В этом случае расположение датчиков сильно зависит от значения порога  $d$  (рис. 4а), на рис. 4б изображено как при изменении  $d$  на решении изменяется время обнаружения.

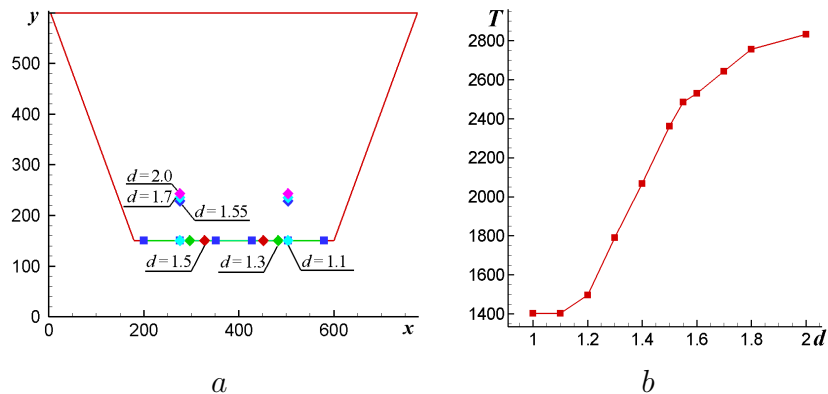


Рис. 4. Расположение датчиков при минимизации только времени обнаружения (а), зависимость времени обнаружения от порога чувствительности (б).

#### 4.2.2. Двухцелевая оптимизация $\min_{\mathbf{Q} \in \mathbf{D}} T(\mathbf{Q}), \min_{\mathbf{Q} \in \mathbf{D}} \varphi_2(\mathbf{Q})$

Решения с фронта Парето приведены на рис. 5а. Их расположение объясняет изменение расположения датчиков при изменении  $d$  при минимизации  $T$  с ограничением  $\varphi_2$ . Сходимость к фронту Парето приведена на рис. 5б.

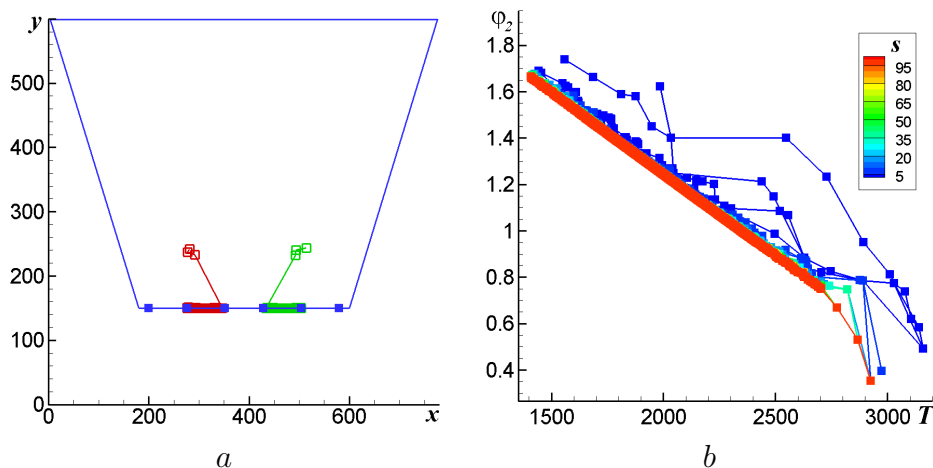


Рис. 5. Численное решение задачи, датчики взяты с фронта Парето (а), сходимость к фронту Парето в пространстве функционалов (б).

## 5. Заключение

Предложены оригинальные постановки задачи о расположении датчиков, учитывающие как время обнаружения волны цунами, так и зависимость её регистрации от амплитудной чувствительности. На основе генетического алгоритма создан эффективный численный метод решения этих задач. На тестовой акватории рассмотрены наиболее интересные, приближенные к реальной жизни постановки. Изучена зависимость функционала регистрации возмущения по амплитуде по крайней мере двумя датчиками от порога чувствительности. Созданы предпосылки, что задача будет результативна в применении к реальным прикладным задачам расположения датчиков.

## Список литературы

- [1] АСТРАКОВА А.С., БАННИКОВ Д.В., ЛАВРЕНТЬЕВ М.М. (мл.), ЧЕРНЫЙ С.Г. Применение генетического алгоритма к задаче оптимального расположения датчиков, Вычислительные технологии, 2009, Т. 14, №5, С. 3-17.
- [2] ЛАМБ Г. Гидродинамика. М.: ОГИЗ, 1947. 930 с.
- [3] MARCUK AN.G. A method for determination of wave rays in non-homogeneous media. / Math. Modelling in Geophysics: Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, 2005. Vol. 10, P. 51-58.
- [4] ЧЕРНЫЙ С.Г., ЧИРКОВ Д.В., ЛАПИН В.Н. и др. Численное моделирование течений в турбомашинах. Новосибирск: Наука, 2006. 202 с.