

Академия наук СССР Сибирское отделение  
В ы ч и с л и т е л ь н ы й    ц е н т р

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОФИЗИКИ:  
ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Сборник научных трудов

Под редакцией  
А.С.Алексеева



Новосибирск 1988

Ан.Г.Марчук

### ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КИНЕМАТИКИ ВОЛН ЦУНАМИ

Одной из задач оперативного прогноза цунами является быстрое и, по возможности, более точное определение времен добегания образовавшейся в результате подводного землетрясения волны цунами до некоторого набора пунктов побережья. Ввиду того, что скорость распространения фронта волны цунами практически не зависит от ее формы и амплитуды, а определяется только глубиной

$$c = \sqrt{gH}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $H$  – глубина, решение кинематической задачи для волн цунами будет общим для любой волны этого типа.

Ранее, в работе [1] автором аналитически была решена задача о кинематике волнового фронта при наличии модельного рельефа дна, имеющего вид наклонной плоскости. Однако в случае произвольного распределения глубины эту задачу без применения численных алгоритмов решить не удастся. Здесь будет приведено несколько методов решения кинематической задачи для волн цунами в областях произвольной батиметрии. Сначала опишем методы построения волновых лучей.

Пусть в рассматриваемой области океана задано произвольное распределение глубин  $H = H(x, y)$ . Процесс распространения возмущений (в частности, волн) в изотропной среде описывается уравнением эйконала:

$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{c^2(x, y)}, \quad (2)$$

где  $c(x, y)$  – скорость распространения волн в точке  $(x, y)$ ,  $\tau(x, y, M) = t$  – кривая фронта в момент времени  $t$ ,  $M(x_0, y_0)$  – источник возмущений.

В работе [2] показывается, что для нахождения траектории луча, выходящего из точки  $M$ , достаточно решить систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{p} \cdot c^2(x, y), \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = \nabla \ln \left( \frac{1}{c(x, y)} \right), \quad (3)$$

где  $\vec{p} = \nabla\tau(x, y, M)$ ,  $\vec{x}$  – вектор с компонентами  $x, y$ .

Положим

$$\vec{x}|_{t=0} = (x_0, y_0), \quad \vec{p}|_{t=0} = \frac{\vec{v}_0}{c(x_0, y_0)}, \quad (4)$$

где  $\vec{v}_0$  – произвольный единичный вектор, задающий начальное направление выхода луча из точки  $M$ . Решая задачу (3), (4), найдем  $x, p$  как функции  $t$  и параметров  $(x_0, y_0)$  и  $\vec{v}_0$ :

$$\vec{x} = f_1(t, x_0, y_0, \vec{v}_0), \quad \vec{p} = f_2(t, x_0, y_0, \vec{v}_0). \quad (5)$$

Для некоторых модельных распределений глубин уравнения (3) могут быть решены аналитически, но для реальной батиметрии необходимо использование численных методов. Наиболее простым и хорошо работающим методом решения задачи (3), (4) является метод Рунге-Кутты.

Если требуется построить лучи от точечного источника цунами, необходимо в начальных условиях (4) менять лишь вектор  $\vec{v}_0$ , задающий начальное направление выхода луча, а координаты  $x_0, y_0$  оставлять неизменными. Но если мы собираемся построить волновые лучи, соответствующие волне, которая в начальный момент была плоской (фронт был прямолинейным), то в условиях (4) надо менять координаты точек выхода лучей  $x_0, y_0$ , оставляя постоянным единичный вектор  $\vec{v}_0$ .

В качестве примера можно привести результаты расчета лучей во Втором Курильском проливе при условии, что исходный фронт волны цунами представляет собой прямую линию (рис.1). По этой картинке легко можно определить угол подхода волны цунами к различным участкам побережья.

Предложим еще один метод построения волновых лучей в случае произвольного распределения глубин. Луч будем находить как траекторию середины короткого отрезка, концы которого движутся в ортогональном к самому отрезку направлении со скоростями, определяемыми формулой (1). Опишем алгоритм построения волнового луча.

Пусть глубина известна во всех точках рассматриваемой области океана. Берем прямолинейный отрезок длиной  $\Delta l$ , соединяющий две точки  $A_0$  и  $B_0$  исходного фронта волны цунами (рис.2). Задаем расчетный шаг по времени  $\Delta t$ . Очередное положение концов  $A_1$  и  $B_1$  движущегося отрезка находим следующим образом: точку  $A_0$  перемещаем на расстояние  $c(A_0) \cdot \Delta t$ , а  $B_0$  - на  $c(B_0) \cdot \Delta t$  в направлении внешней нормали к исходному фронту волны. Соединяем полученные точки и на равном расстоянии  $\Delta l/2$  от середины  $S_1$  полученного отрезка располагаем точки  $A_1$  и  $B_1$ . После этого повторяем это построение снова и находим очередное положение отрезка  $A_2 B_2$  и т.д. Ломаная линия  $S_0, S_1, S_2, \dots$  является приближенной траекторией волнового луча (см. рис.2).

Покажем, что построенная таким образом ломаная действительно аппроксимирует волновой луч. Выпишем вначале, как изменяется составляющая вектора направления волнового луча  $\vec{p}$ :

$$\left( \frac{d\vec{p}}{dt} \right)_x = \vec{i}_x \frac{d}{dx} \ln \frac{1}{c(x,y)} = - \vec{i}_x \frac{1}{c(x,y)} \frac{dc(x,y)}{dx}, \quad (6)$$

здесь  $\vec{i}_x$  - единичный вектор вдоль оси  $Ox$ . Следует также иметь в виду, что  $|\vec{p}| = 1/c(x,y)$ .

Пусть очередное положение в момент времени  $t$  движущегося отрезка  $AB$  параллельно оси  $Ox$ . Длина отрезка равна  $\Delta x$ . Согласно нашему методу за время  $\Delta t$  точка  $A$  переместится на расстояние  $\Delta t \cdot c(x,y)$ , а  $B$  на  $\Delta t \cdot c(x + \Delta x, y)$  ( $x, y$  - координаты точки  $A$ ). Вектором  $\vec{p}$  для каждого из отрезков  $AB$  и  $DE$  будет вектор длиной  $1/c$ , направленный перпендикулярно отрез-

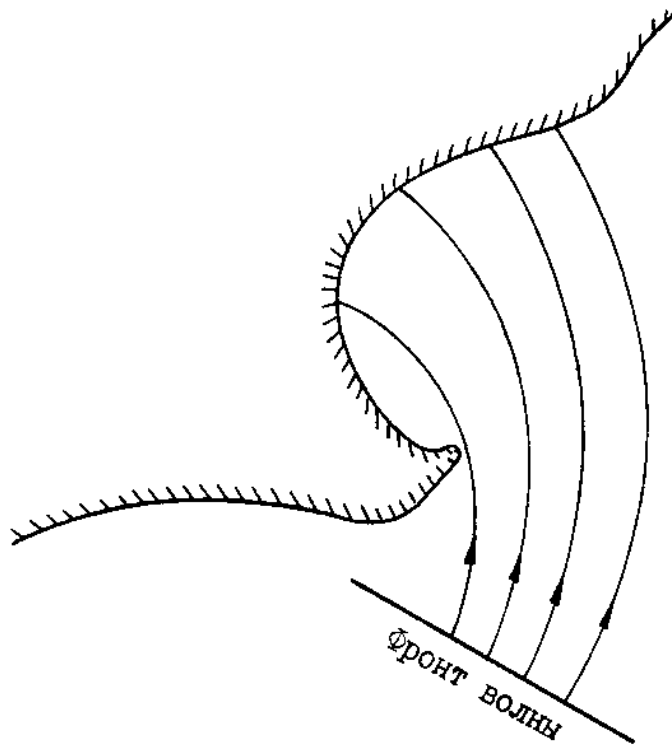


Рис. I

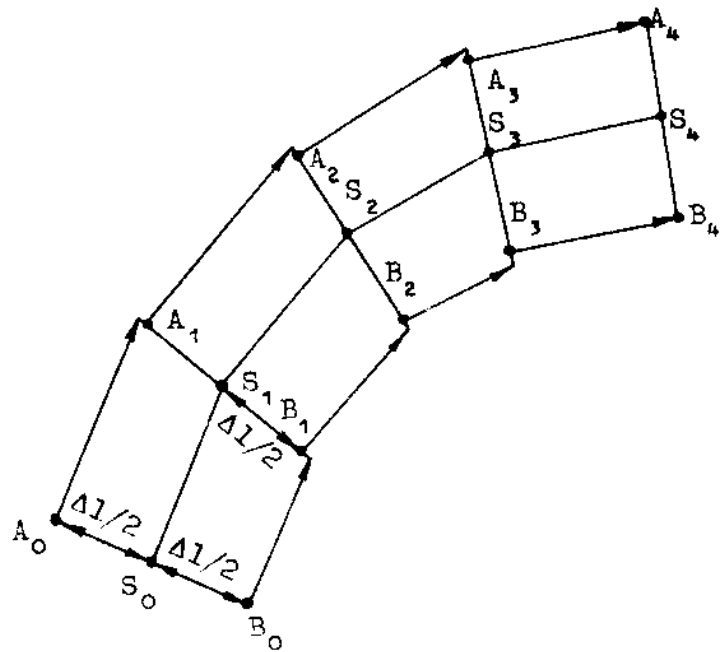


Рис. 2

ку в направлении движения волны. Построим оба вектора  $\vec{p}(t)$  и  $\vec{p}(t + \Delta t)$ , выходящих из одной точки D. На рис.3 это будут отрезки DF и DG. Длина отрезка DG составляет  $1/c(D)$ , а DF -  $1/c(x, y)$ . Координаты точки D по построению равны  $x$  и  $y + c(x, y) \cdot \Delta t$ . Выясним теперь, как выражается проекция на ось  $Ox$  отрезка EG, т.е. вектора  $\vec{p}(t) - \vec{p}(t + \Delta t)$ :

$$\begin{aligned} (\vec{p}(t + \Delta t) - \vec{p}(t))_x &= \frac{1}{c(x, y + c(x, y) \cdot \Delta t)} \cdot \sin \alpha = \\ &= - \frac{c(x, y) \cdot \Delta t - c(x + \Delta x, y) \cdot \Delta t}{c(x, y + c(x, y) \cdot \Delta t) \cdot \Delta t} . \end{aligned} \quad (7)$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \left( \frac{\vec{p}(t + \Delta t) - \vec{p}(t)}{\Delta t} \right)_x &= \\ = - \frac{c(x + \Delta x, y) - c(x, y)}{\Delta x} \cdot \frac{1}{c(x, y + c(x, y) \cdot \Delta t)} . \end{aligned} \quad (8)$$

Левая часть уравнения (8) аппроксимирует составляющую вдоль оси  $Ox$  вектора  $\frac{d\vec{p}}{dt}$ , а первый сомножитель в правой части аппроксимирует производную  $\frac{dc}{dx}$ . Таким образом, если покажем, что и второй сомножитель близок по значению к величине  $1/c(x, y)$ , это будет означать, что направление волнового луча в процессе предложенного построения меняется в соответствии с уравнением (6). Первое уравнение из (3) выполняется в силу построения нашего метода.

Вернемся ко второму сомножителю правой части уравнения (8). Необходимо оценить разность

$$R = \frac{1}{c(x, y + c(x, y) \cdot \Delta t)} - \frac{1}{c(x, y)} . \quad (9)$$

Определим сначала, какой порядок величины имеет производная

от скорости распространения волн. В реальном океане наклон дна, как правило, не превышает 0,1. Например, пусть глубина в каком-то направлении равномерно растёт от 0 до 1 000 м на интервале 10 000 м. В этом случае скорость волны  $c(x, y)$  будет меняться в интервале 0+100 м/с. Если глубина будет меняться от 2 000 до 3 000 м, то величина изменения скорости будет ещё меньше.

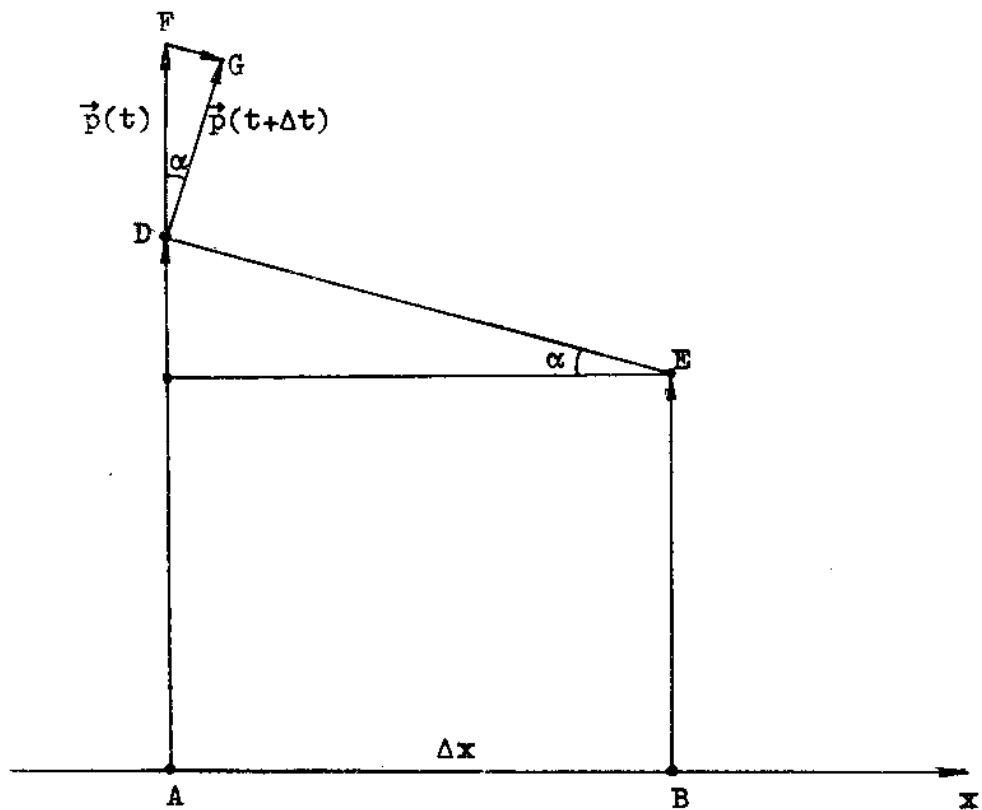


Рис.3

Таким образом, имеем оценку

$$\left| \frac{\partial c}{\partial x} \right| \leq 0,01, \quad \left| \frac{\partial c}{\partial y} \right| \leq 0,01. \quad (10)$$

Если выберем шаг  $\Delta t$  таким, что величина  $\Delta y = c(x, y) \cdot \Delta t$  будет малой по отношению к длине отрезка  $\Delta x$ , то отклонение вто-

рого множителя в правой части уравнения (8) от величины  $1/c(x, y)$  выразится в виде

$$\delta = \frac{c(x, y) - (c(x, y) + \frac{c(x, y + \Delta y) - c(x, y)}{\Delta y} \cdot c(x, y) \cdot \Delta t)}{c(x, y) \cdot c(x, y + \Delta y)} \quad (11)$$

Из ограничений (10) следует, что числитель в выражении (11) не превосходит  $0,01 \cdot c(x, y) \cdot \Delta t$ . Теперь оценка (11) переписывается в виде

$$\delta \leq \frac{0,01 \cdot \Delta t}{c(x, y + \Delta y)} \quad (12)$$

Таким образом, при использовании в расчетах шага по времени  $\Delta t$ , не превышающего нескольких секунд, построенный луч будет довольно близок к истинному. При этом чем меньше градиенты глубин, тем больший шаг по времени можно использовать. Итак, если распределение глубин в рассматриваемой акватории может быть описано функционально, то для некоторых простейших функций глубины траектории волновых лучей могут быть найдены аналитически с помощью методов вариационного исчисления. Так, например, если глубина постоянна, лучи имеют форму прямых линий. Если глубина линейно зависит от одной из координат, то лучи являются циклоидами, а при квадратичной зависимости имеют форму дуг окружностей.

Для построения возможных лучей в реальных акваториях необходимо использовать численные методы, в частности, предложенный здесь алгоритм на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений; основанный на геометрическом построении.

Следует заметить, что методы, основывающиеся на построении волновых лучей, могут привести к неестественным искажениям фронта волны. К тому же для обеспечения достаточной гладкости фронта необходимо из исходного очага выпустить достаточно много лучей или порождать новые лучи в процессе движения фронта. В качестве иллюстрации представлены результаты расчетов изохрон волн цунами лучевым методом для Северо-Курильска (рис. 4) и Петропавловска-Камчатского (рис. 5). Если для Севе-



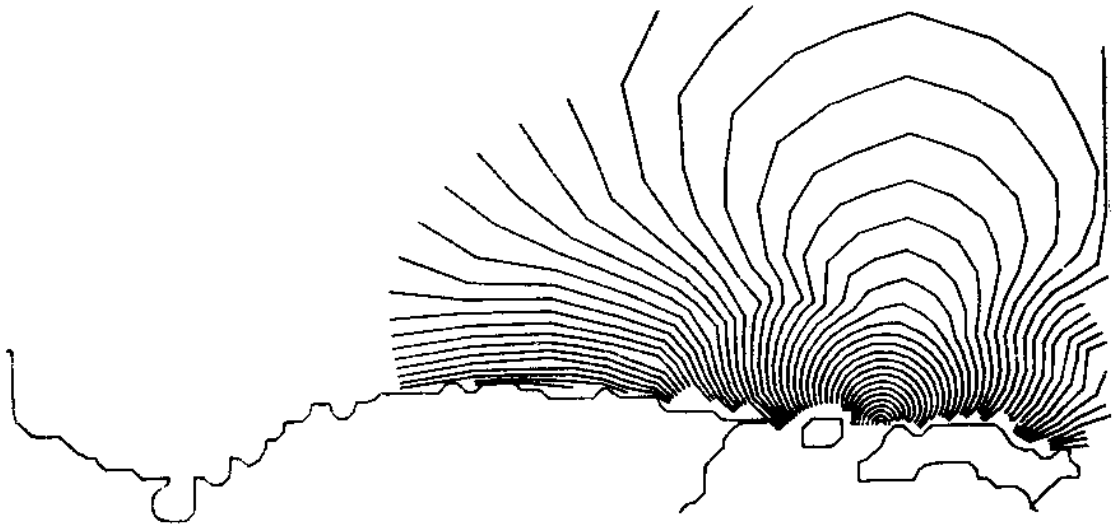


Рис. 4

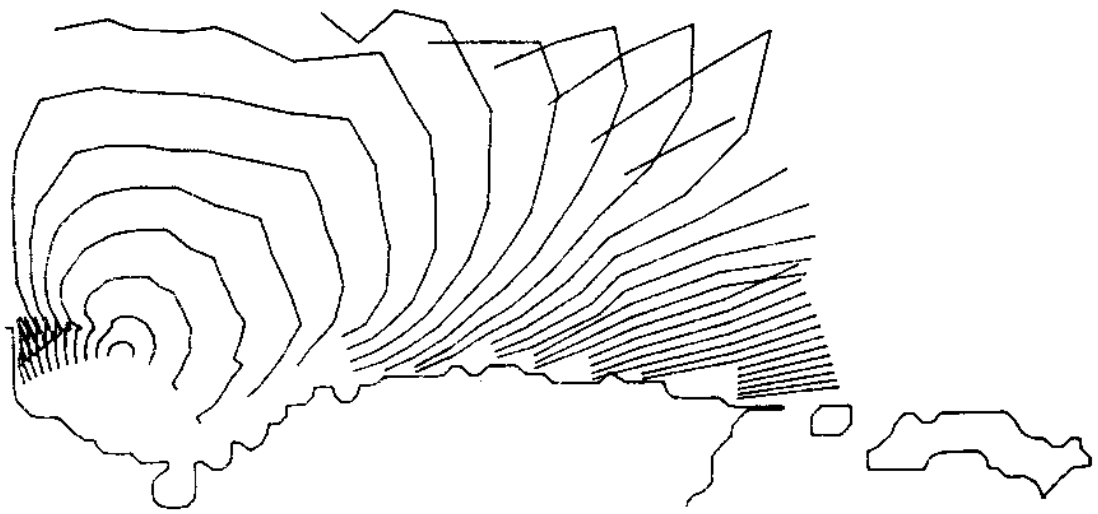


Рис. 5

ро-Курильская изохроны имеют естественный вид, то во втором случае очевидны искажения, вносимые численным методом.

Этого недостатка лишен метод непосредственного решения уравнения эйконала (2), физический смысл которого состоит в том, что фронт волны цунами движется со скоростью  $\sqrt{gh}$  в направлении нормали к нему. Численный алгоритм состоит в нахождении внешней нормали к каждой точке (при численном моделировании) кривой фронта и перемещении точек фронта вдоль этой нормали на расстояние  $dt \cdot \sqrt{gh}$  за один шаг по времени  $dt$ . Реализуется этот алгоритм следующим образом: в начальный момент времени  $t = 0$  задается множество точек ( $N$ ) исходного фронта, представляющего собой окружность или эллипс. Затем для нахождения нормального направления к фронту в каждой расчетной точке  $M_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) используем две соседние с ней точки  $M_{i-1}$  и  $M_{i+1}$ . В итоге положение точки  $M_i$  на очередном шаге по времени будет определяться по формулам

$$\begin{aligned}
 x^{n+1}(i) &= x^n(i) - dt \cdot \sqrt{gh(x^n(i), y^n(i))} \times \\
 &\quad \times (y^n(i+1) - y^n(i-1))/R, \\
 y^{n+1}(i) &= y^n(i) + dt \cdot \sqrt{gh(x^n(i), y^n(i))} \times \\
 &\quad \times (x^n(i+1) - x^n(i-1))/R,
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$R = \sqrt{(x^n(i+1) - x^n(i-1))^2 + (y^n(i+1) - y^n(i-1))^2}.$$

Проводя эту процедуру применительно ко всем точкам фронта, получим последовательные положения фронта волны цунами через интервалы  $dt$ . В случае, если две соседние точки фронта "разойдутся" слишком далеко, вводим между ними новую точку волнового фронта. Если, напротив, точки слишком сблизятся (три точки и более), то будем проводить "прореживание" для ускорения расчетов. Если целью расчетов является карта обратных изохрон цунами для некоторой точки на побережье, то в качестве исходного фронта волны цунами следует взять  $N$  точек, лежа-

щих на полуокружности с центром в точке  $M_0$ , расположенной на небольшой глубине вблизи интересующего нас пункта побережья. Для иллюстрации этого метода можно привести карты изохрон волн цунами от точечного (рис.6), кругового с радиусом 50 км (рис.7) и эллиптического (рис.8) источников цунами на прямоугольной акватории 519x302 км с модельным рельефом дна, где глубина линейно растёт от 0 на одной длинной границе до 8 000 м на противоположной. Во всех случаях изохроны, выведенные на графопостроитель через каждые 2 мин, рассчитывались до глубины 10 м. На реальном рельефе дна строились карты обратных изохрон (карты времен добегания) для нескольких пунктов. Можно привести пример такой карты для м.Лопатка (рис.9).

Рассмотрим теперь метод для расчета кинематики волновых фронтов, основывающийся на принципе Гюйгенса-Френеля, т.е. нахождения путем перебора наискорейшего пути движения волны от волнового фронта в какой-либо момент времени до рассматриваемой точки нашей области. Кратко опишем численный алгоритм. Пусть в некоторой области в узлах прямоугольной сетки заданы значения глубин. Вводим в этих же узлах сетки двумерный массив  $T(i, j)$   $i = 1, \dots, M$ ;  $y = 1, \dots, N$  времен добегания волны цунами. В начальный момент времени все значения  $T(i, j)$  приравняем  $-1$  и только в очаге цунами (возможно даже в одной точке) присваиваем  $T(i, j) = 0$ . На следующем шаге вычисляются значения  $T(i, j)$  во всех точках, прилегающих к очагу (т.е. к области, где  $T \neq -1$ ). Эти значения находятся путем вычисления элементарных времен пробега вдоль прямых линий, соединяющих соседние узлы. Причем считаем, что вдоль каждого прямолинейного отрезка между узлами сетки глубина изменяется линейно. Таким образом, время пробега вдоль каждого отрезка выражается с учетом формулы Лагранжа (I) как

$$\Delta T = \frac{2l}{\sqrt{gH_1} + \sqrt{gH_2}}, \quad (14)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  соответственно глубины в этих соседних узлах,  $l$  - расстояние между ними.

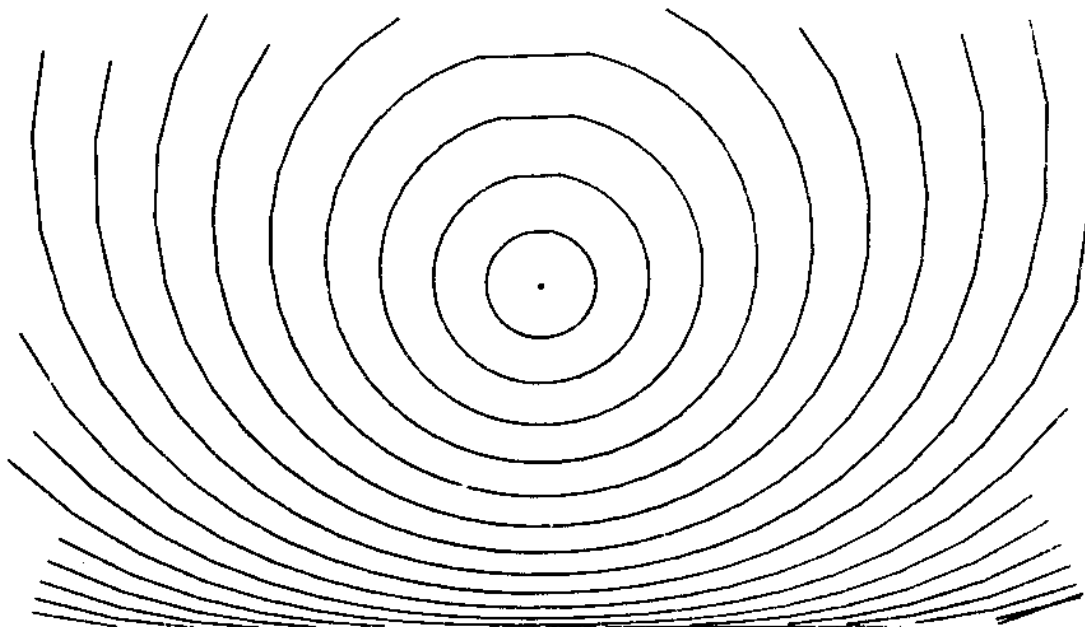


Рис. 6

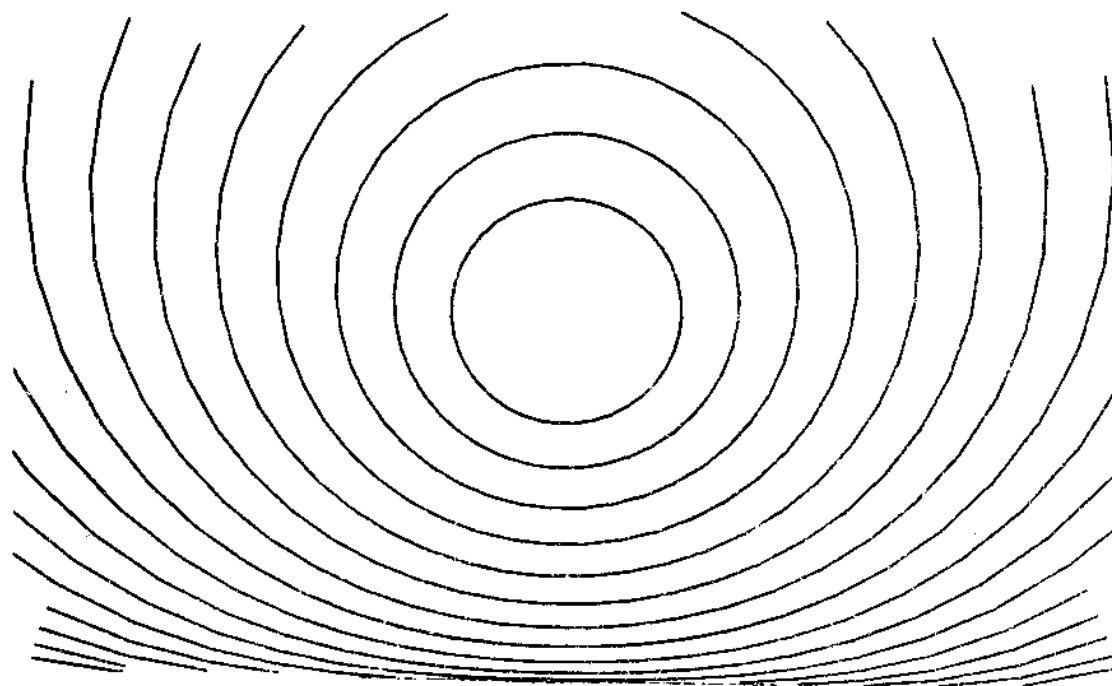


Рис. 7

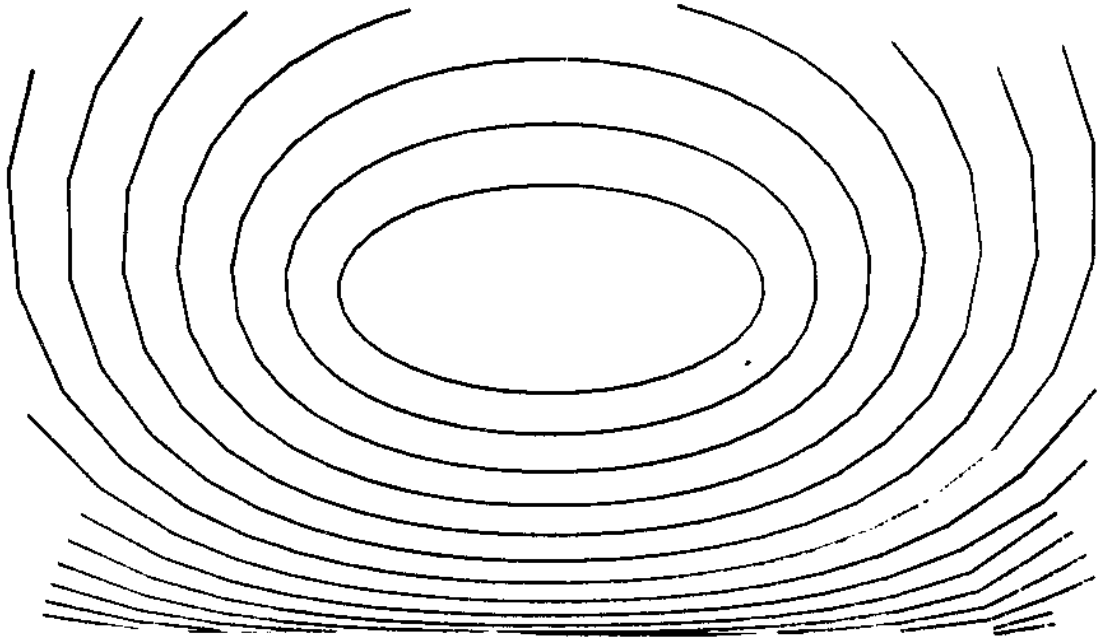


Рис. 8

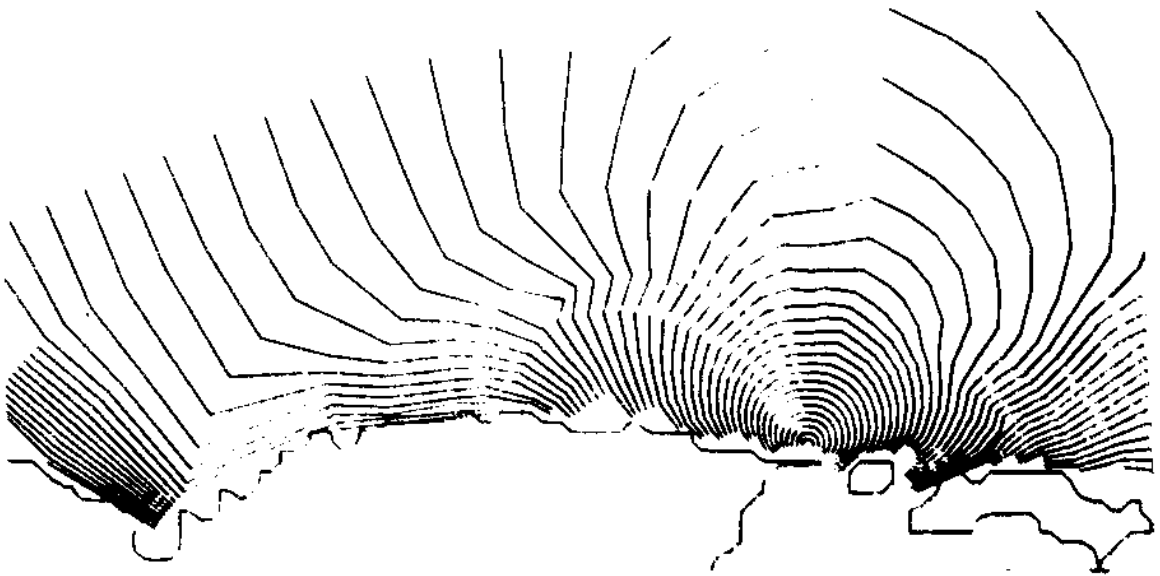


Рис. 9

На следующем шаге рассматриваем другие узлы, соседствующие с областью, куда возмущение (волна цунами) уже пришла, т.е. где  $T \neq -1$ . Причем при нахождении времени прихода волны в какую-либо точку вычисляются элементарные времена от шестнадцати ближайших узлов сетки (рис.10). В практических расчетах  $\Delta T$  вычисляются только до тех соседних узлов, где  $T \geq 0$ . Рассмотрим на рис.10 точку  $(i, j)$  и шестнадцать ее "соседей". Пусть волна уже пришла в точки с шестой по двенадцатую и пусть этим точкам соответствуют времена  $T_6, T_7, \dots, T_{12}$ . Вычислим по формуле (14) времена пробега волны  $\Delta T$  между точкой  $(i, j)$  и точками с шестой по двенадцатую. Затем сравниваем величины  $T_i + \Delta T_i$  ( $i = 6, \dots, 12$ ), где  $\Delta T_i$  - время пробега от точки с номером  $i$  до рассматриваемой точки  $(i, j)$ , и выбираем минимальное значение, которое и присваиваем элементу  $T(i, j)$  массива времен прихода. И такую процедуру проделываем с каждой точкой, в которую на данный момент волна еще не пришла. Форма исходного очага цунами задается вводом нулевых значений в матрицу времен добегания  $T(i, j)$ .

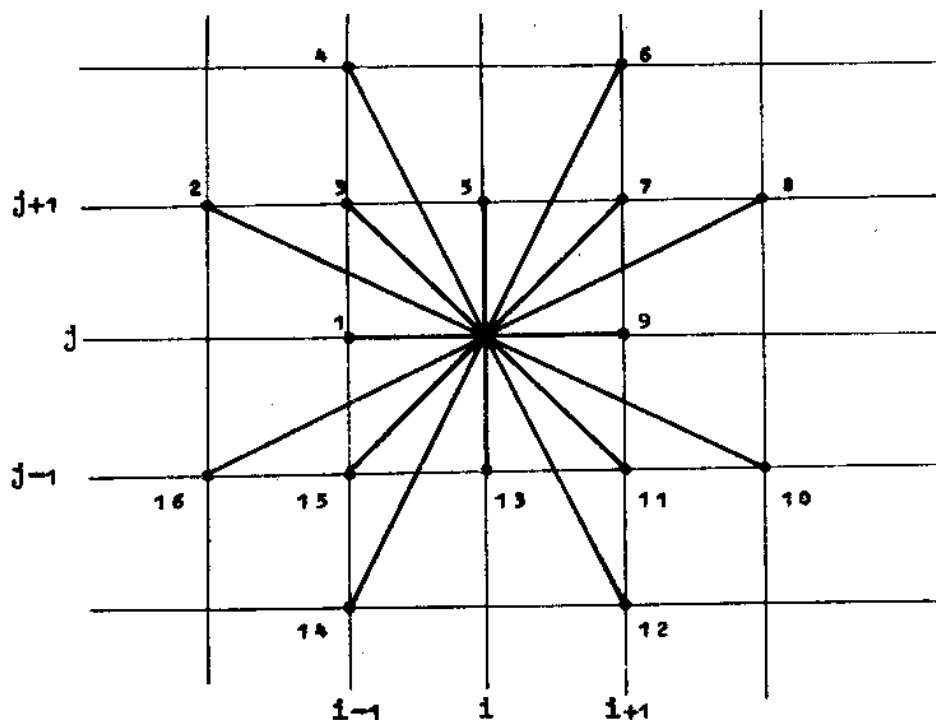


Рис.10  
81

На рис. II приведен пример расчета обратных изохрон для пос. Буревестник, выполненного описанным методом. На каждой изохроне нанесено время в минутах, необходимое волне цунами для добегания от любой точки на этой изохроне до пос. Буревестник. Такие карты можно эффективно использовать в оперативном прогнозе цунами для быстрой оценки времени прихода волны цунами в защищаемые точки на побережье. В частности, оператор центра предупреждения с цунами сразу после определения местоположения эпицентра цунамигенного землетрясения, располагая набором таких карт обратных изохрон, может в течение одной-двух минут оценить с достаточной степенью точности время прихода цунами в эти пункты.

Расчет изохрон цунами можно также вести в реальном времени, выдавая карту изохрон на экран цветного дисплея. В этом случае хорошо видна динамика изменения области, куда волна цунами уже пришла. Правда, в этом случае расчет требует нескольких минут, что может иметь большое значение в случае угрозы цунами. Методы расчета кинематики волн цунами можно непосредственно использовать при создании на Дальнем Востоке СССР Единой автоматизированной системы предупреждения о цунами (ЕАСЦ). В задачи создаваемой системы, наряду с предварительной оценкой по сейсмическим данным возможности возникновения и ожидаемой интенсивности волн цунами, входит заблаговременное обнаружение приближающейся к берегу волны цунами. С этой целью планируется создание гидрофизической подсистемы ЕАСЦ, основными элементами которой будут морские гидрофизические станции (ГФС), которые в случае угрозы цунами должны непрерывно передавать информацию о колебаниях уровня океана в точках их установки. Техническим заданием на создание ЕАСЦ предусмотрена такая сеть ГФС, чтобы она регистрировала приближающуюся к побережью волну цунами за 10 мин до ее выхода на берег (в самом неблагоприятном случае близкого расположения к берегу очага цунамигенного землетрясения).

Технические данные используемых комплексов аппаратуры позволяют установить кабельные донные ГФС на глубинах до 500 м, а буйковые ГФС - до 1 000 м, причем они могут быть удалены от пункта приема информации на расстояние до 110 км.

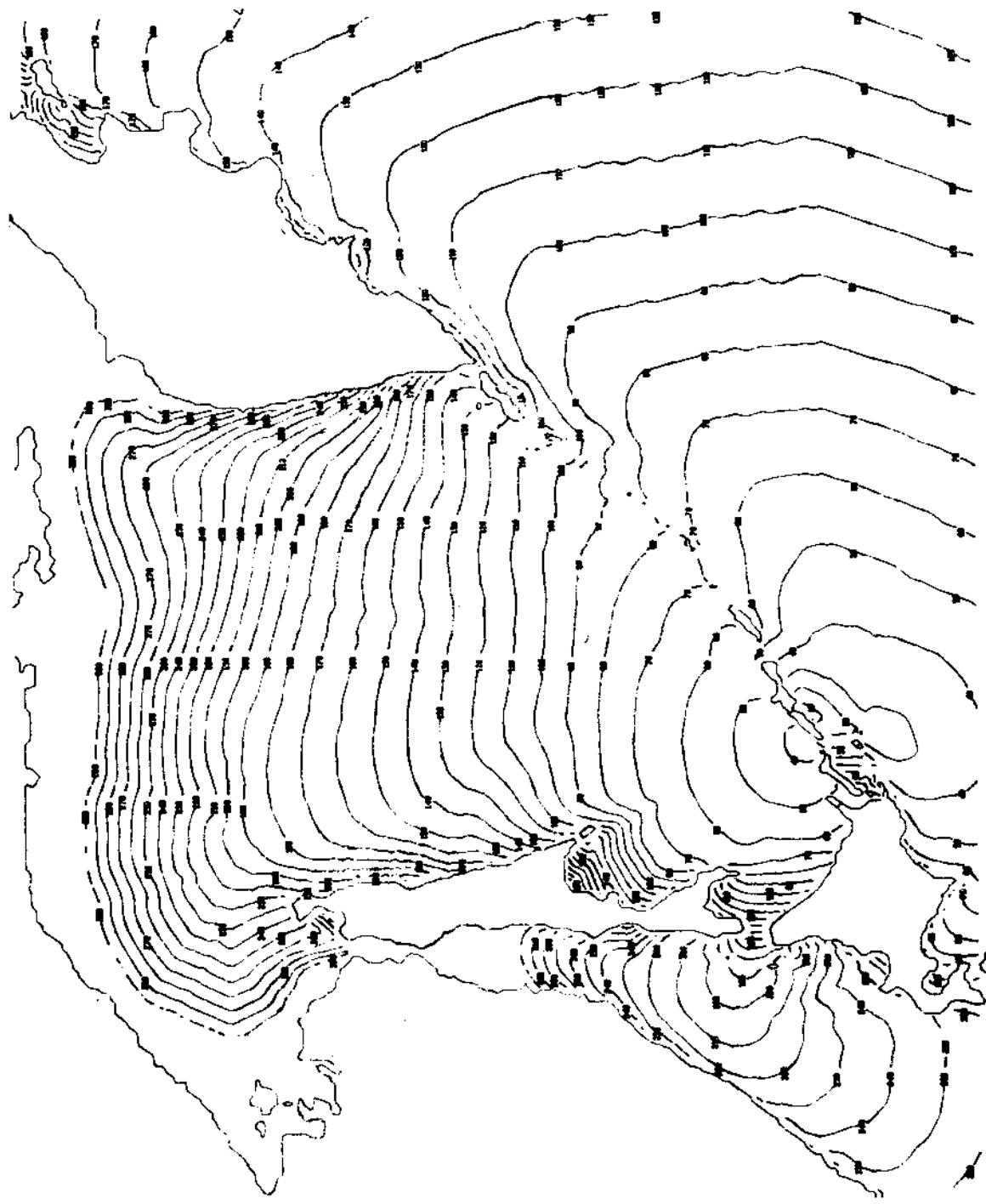


FIG. II



Здесь будет предложен алгоритм построения оптимальной сети гидрофизических станций для случая, когда эпицентры цунамигенных землетрясений располагаются на некотором расстоянии от береговой линии. Если бы ограничения снизу на это расстояние не было, тогда задача построения эффективной сети ГФС не всегда бы имела решение, так как в некоторых случаях время движения волны цунами от очага до побережья могло быть меньше десяти минут. Анализ данных о ранее имевших место в этом регионе цунамигенных землетрясениях делает возможной локализацию вероятной области расположения их эпицентров изобатой 5 000 м. Поэтому при решении задачи о создании оптимальной сети ГФС будем считать, что эпицентры располагаются дальше от берега, чем изолиния глубины 5 000 м. Следует заметить, что если очаг цунамигенного землетрясения расположен в непосредственной близости от берега (на незначительной глубине), то амплитуда волн на берегу не будет очень большой, так как в этом случае рост амплитуды за счет закона Грина

$$\eta^4 \cdot H = \text{const}$$

будет незначительным. Здесь  $\eta$  — амплитуда волны,  $H$  — глубина.

Рассмотрим сначала модельный случай, когда глубина зависит только от расстояния до прямолинейного берега, при этом сам закон изменения глубины может быть произвольным. В этом случае задача решается довольно просто. Поместим в произвольную точку  $M$  прямоугольной прибрежной области на расстоянии  $L_0$  от берега точечный источник волн цунами (исходным фронтом волны является круг небольшого радиуса  $r_0$ ). Затем с помощью численного метода расчета изохрон цунами построим изохроны через заданные промежутки времени. Рассмотрим точки пересечения  $A$  и  $B$  изобаты 1 000 м (максимальная глубина для установки ГФС) с изохроной волны цунами, соответствующей положению волнового фронта за 10 мин до выхода на побережье. Естественно, что на расстоянии  $L_0$  от берега глубина значительно превышает 1 000 м.

Если поместить в точки  $A$  и  $B$  гидрофизические станции, регистрирующие прохождение волны цунами, то они будут обеспечи-

вать десятиминутную заблаговременность регистрации приближающейся к побережью в районе этих ГФС волны цунами.

Таким образом, при рассмотренном рельефе дна для обеспечения требуемой заблаговременности вдоль всего побережья достаточно вдоль изобаты 1 000 м расположить регистрирующие станции так, чтобы расстояние между ними было равно расстоянию между точками А и В. В итоге решим исходную задачу, используя минимально возможное количество ГФС. На рис. 12 показан вышеописанный способ нахождения оптимального расстояния между ГФС при наклонном рельефе дна (за один шаг сетки  $\Delta u = 4\ 720$  м в направлении от берега глубина увеличивается на 125 м). Здесь точечный источник цунами м располагался на глубине 4 375 м на расстоянии 165 км от береговой линии. На рис. 12 с помощью графопостроителя нарисованы положения фронта волны (изохроны) через каждые две минуты. Расстояние между точками А и В измеряется непосредственно на рисунке. В результате получаем, что для эпицентров цунамигенных землетрясений, расположенных дальше 165 км от берега, оптимальным расстоянием установки гидрофизических станций будет 160 км.

Значительно усложняется алгоритм построения оптимальной сети на реальной акватории. Процесс определения мест расположения ГФС следует начинать с существующей станции или запланированной точки расположения. Проиллюстрируем процесс построения сети буйковых (для конкретности) ГФС в районе Камчатки и севера Курильских островов. Техническим заданием на создание ЕАСЦ запланировано разместить одну ГФС вблизи м. Шипунский. Поэтому до начала работы нашего алгоритма расположим вблизи м. Шипунский гидрофизическую станцию (точка  $M_1$ ) на глубине около 800 м. Будем предполагать, на основании наблюдений за реальными очагами, что эпицентры цунамигенных землетрясений могут располагаться не ближе к берегу, чем изобата 5 000 м. Найдем теперь следующую точку для расположения в ней ГФС. Сначала поместим в точку  $M_1$  точечный источник волн цунами и численным методом построим картину изохрон распространяющейся волны. В результате получим рис. 13 с изображением положений фронта волны через каждую минуту. Изохроны пересекут изобату 5 000 м в точках  $A_1, A_2, A_3, \dots$ , при этом время дви-

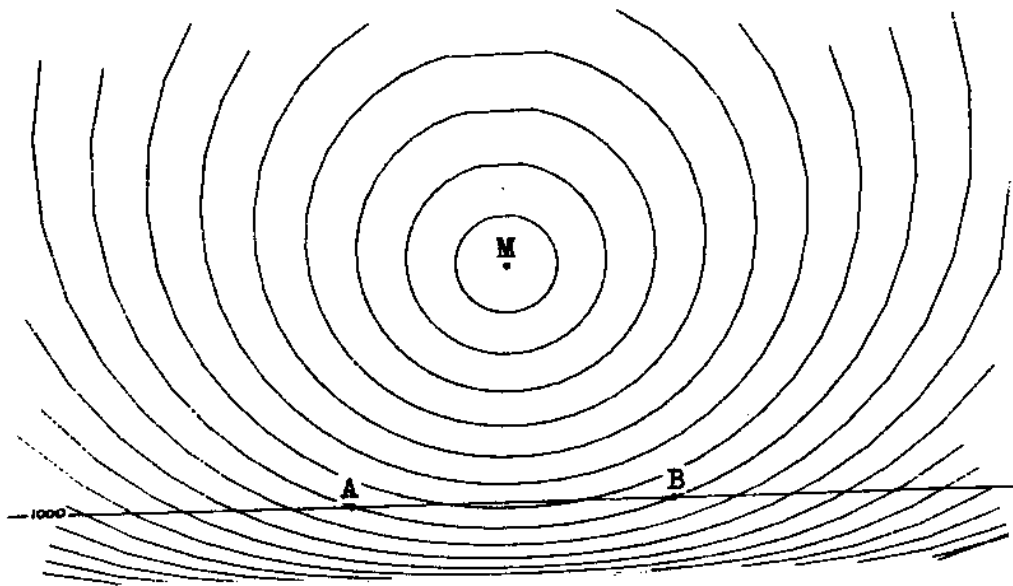


Рис. 12

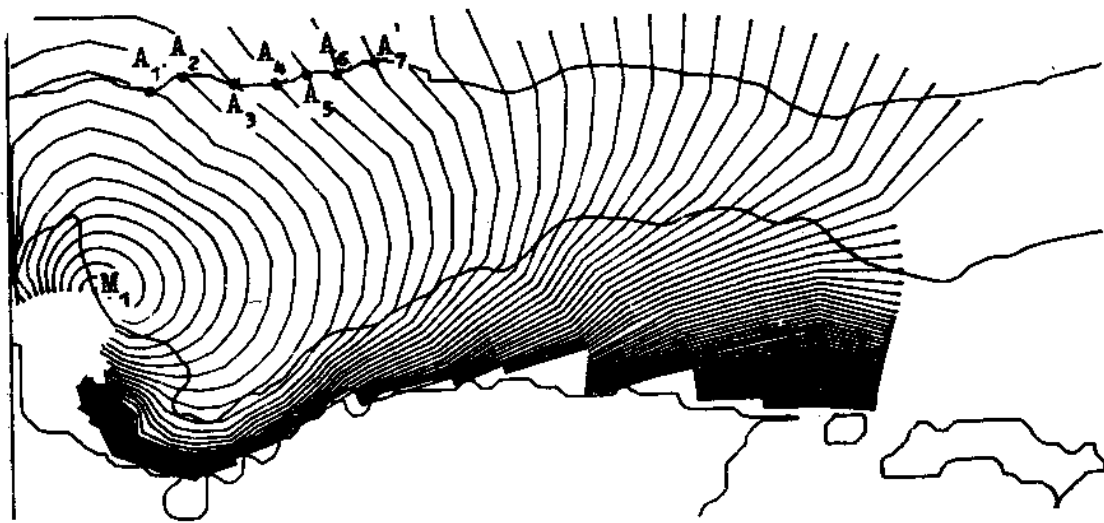


Рис. 13

движения волны от точки  $M$  в точку  $A_1$  (или обратно) равно 11 мин, а для остальных точек  $A_2, A_3, \dots$  время движения волны из точки  $M_1$  составляет соответственно 12, 13, ... мин. Далее, помещая последовательно в каждую из точек  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) точечный источник волн, численно строя изохроны, найдем такую точку  $A_k$ , время движения волны цунами из которой до выхода на берег будет на 10 мин больше, чем до точки  $M_1$ . Например, на рис. 14, 15 изображены изохроны волн цунами от точечных источников, расположенных в точках  $A_5$  и  $A_6$  соответственно. От источника  $A_5$  до побережья полуострова Камчатка волна идет около 25 мин, при этом точки  $M_1$  эта волна достигнет примерно за 15 мин. От источника  $A_6$  до Камчатки волна распространяется за 24 мин, при этом в точку  $M_1$  она приходит примерно через 16 мин. На рис. 14 рассмотрим точку  $M_2$ , которая находится на пересечении 1 000-метровой изобаты (при использовании кабельных ГФС следует рассматривать изобату 500 м) с изохроной волны, соответствующей положению ее фронта через 15 мин после выхода из точки  $A_5$ . Если в найденной таким образом точке  $M_2$  разместить гидрофизическую станцию, то система из двух ГФС ( $M_1$  и  $M_2$ ) будет обеспечивать десятиминутную заблаговременность обнаружения приближающейся к побережью волны от любых источников, расположенных вблизи данного участка побережья, но не ближе чем изобата 5 000 м. Для продолжения построения оптимальной сети ГФС в найденную точку  $M_2$  помещаем источник волн и находим очередную последовательность точек  $B_1, B_2, B_3, \dots$  (рис. 16), которые затем позволят после нескольких численных расчетов изохрон волн цунами найти очередную точку  $M_3$  для установки в ней еще одной ГФС. Однако искомое местоположение находится вне нашей расчетной области, так как время движения волны цунами из точки  $B_{12}$ , находящейся на краю расчетной области, до берега значительно превышает 29+10 мин (рис. 17). Здесь 29 мин – время движения волны из точки  $B_{12}$  в точку  $M_2$ . Интересно заметить, что в этом случае волна быстрее достигает побережья Камчатки, а только затем о. Парамушир и Шумшу, хотя последние находятся гораздо ближе к источнику  $B_{12}$ .

Итак, в работе предложен алгоритм, а также частично построена оптимальная сеть гидрофизических станций, позволяющая



FIG. 14

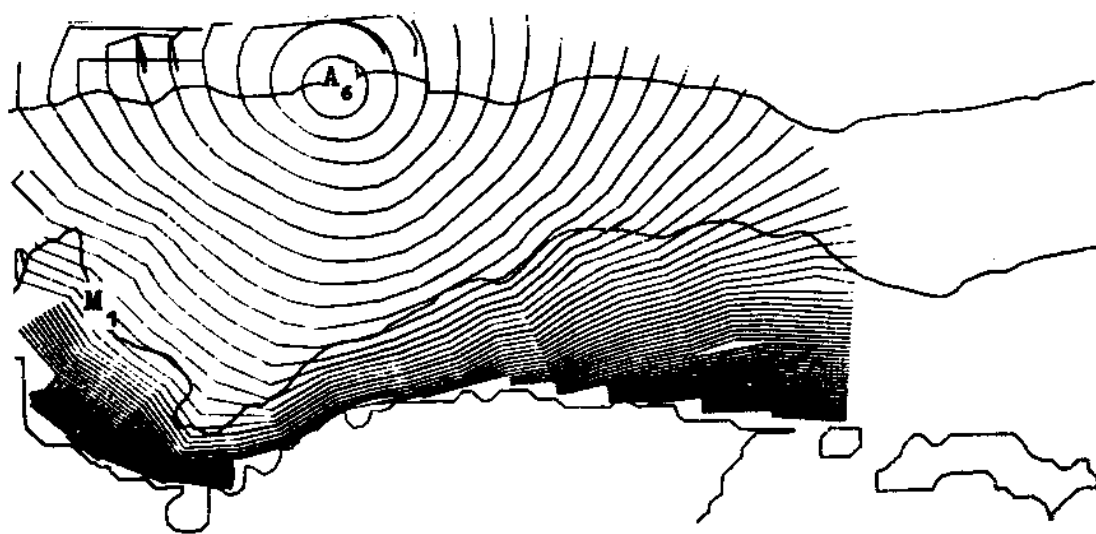


FIG. 15

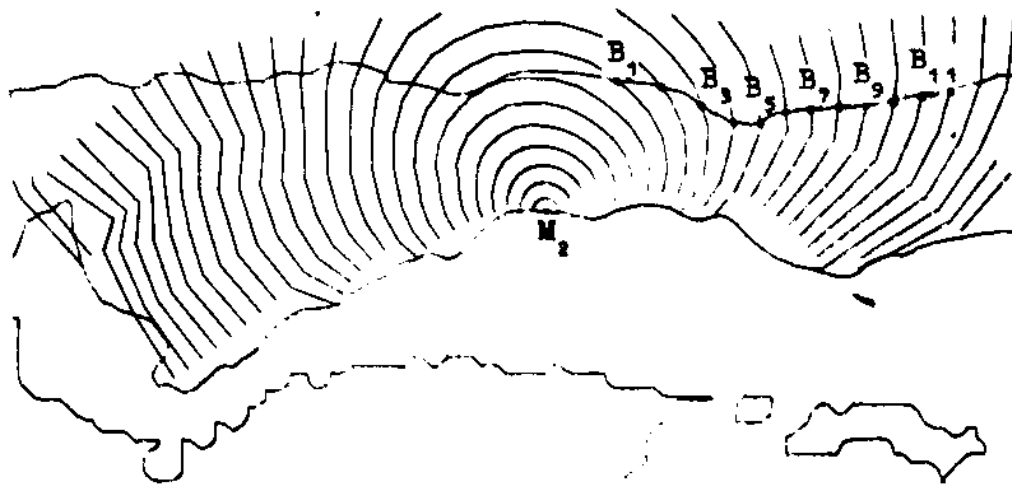


Рис. 16

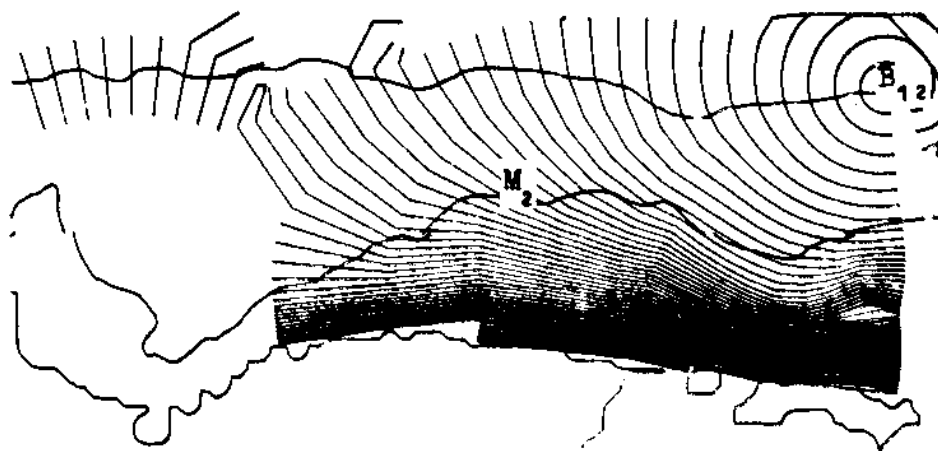


Рис. 17

при минимально возможном их количестве обеспечить требуемую заблаговременность обнаружения приближающейся к берегу волны цунами при условии, что очаги цунамигенных землетрясений располагаются не ближе в береговой линии, чем изобата 5 000 м. Следует, однако, заметить, что не на всех участках побережья возможно обеспечить даже теоретическую заблаговременность. Если изобата 1 000 м проходит слишком близко от берега на достаточно большом протяжении вдоль него, то волна цунами может достигать побережья раньше чем через 10 мин после ее обнаружения с помощью ГФС при любом их количестве и расположении (на глубинах до 1 000 м).

#### Л и т е р а т у р а

1. Марчук Ан.Г. Применение численных методов к решению одной задачи оперативного прогноза цунами// Генерация цунами и выход волн на берег. - М.: Радио и связь, 1984. - С.47-53.
2. Романов В.Г. Обратные задачи математической физики. - М.: Наука, 1984.