© Л.В. Винокуров, 2007

УДК 550.834

Л.В. Винокуров

ПРОГНОЗ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ УДАРА ЦУНАМИ

Семинар № 10

Для исследования источника необходимо, прежде всего, знать его местонахождение. Определение координат источника возможно по сигналам, характеризующим его существование. Сигналы могут быть разовые, кратковременные (взрыв) и бесконечно длительные (небесные светила). В статье рассматриваются сейсмические сигналы источников близких по своей сущности – это землетрясения и подземные атомные взрывы.

Сейсмические волны P-продольные и S-поперечные, возникшие в очаге землетрясения, распространяются с разной скоростью, поэтому они регистрируются сейсмостанцией в разное время. Точное время прихода каждой волны определяется по отметкам времени, имеющимся на сейсмограмме. Скорости волн в сейсмоопасных регионах известны с высокой точностью. Используя разность скоростей Vp-продольной и Vs-поперечной, определяется расстояние d от сейсмостанции до эпицентра по формуле

$$d = TV_p \cdot V_s/(Vp-Vs), \qquad (1)$$

где T - интервал времени между вступлениями волн P и S, измеренный на сейсмограмме.

После того как для нескольких станций (не менее трех) определено расстояние до эпицентра находят местонахождение (координаты) эпицентра путем пересечения окружностей с известными радиусами.

Задача определения глубины очага землетрясения представляется гораздо сложнее и результат при этом менее точен. Однако если имеются сейсмограммы с записями землетрясения близкими и далёкими станциями, то по сходимости их данных можно оценить местоположение гипоцентра.

При определении местоположения подземных атомных взрывов использовалась аналогичная методика.

В настоящие время нами разработан и опробован новый, более точный, метод определения координат природных и техногенных источников излучения.

Основой способа является сформулированная и доказанная нами теорема о прямой, вращающейся вокруг центра равностороннего треугольника, которая читается так: Если некоторая прямая UV, первоначально совпадающая с биссектрисой АД, равностороннего треугольника ABC со стороной l, вращается против часовой стрелки в плоскости треугольника вокруг его центра O, то проекции S_1, S_2, S_3 сторон треугольника на эту прямую изменяются по законам

$$B'C' = S_2 = l \sin\varphi$$

$$A'B' = S_3 = l \sin(60^\circ - \varphi) \qquad (2)$$

$$A'C' = S_1 = l \sin(60^\circ + \varphi),$$

где φ - угол поворота (рис. 1).

Доказательство теоремы. Перемещая прямую UV параллельно самой себе сначала до точки A, а затем до точки C

находим проекции сторон треугольника ABC.

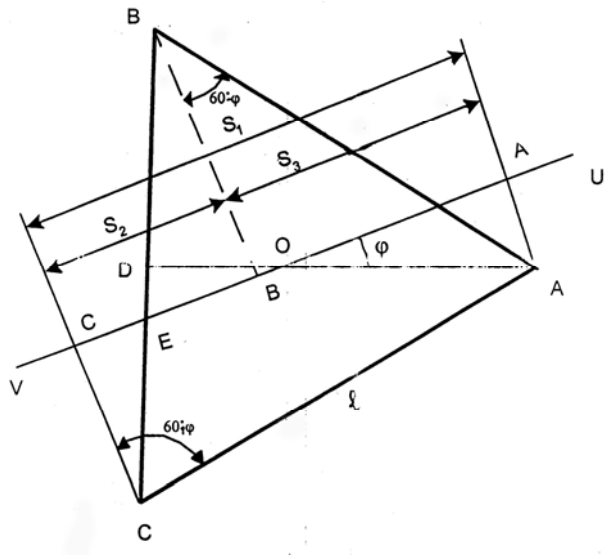

Рис. 1. Схема к определению проекций S_1, S_2, S_3 сторон треугольника ABC на прямую UV

Из этой теоремы следует, что, если проекции сторон равностороннего треугольника каким-либо образом определены, то положение прямой UV относительно заданного начала отсчета AD определяется однозначно путем использования обратных тригонометрических функций.

Для удобства использования доказанной теоремы в целях определения направления (пеленга или азимута) на источник излучения сейсмических сигналов целесообразно принять, что любое фиксированное положение вращающейся прямой UV – это пеленг на источник излучения. На практике используются не проекции (линейные размеры), а величины, пропорциональные линейным размерам временные задержки t_1, t_2 и t_3 прихода сейсмического сигнала в вершины равностороннего треугольника.

Если обозначить буквой V скорость распространения сейсмического сигнала, то в общем случае

$$t = S/V, \qquad (3)$$

где S- путь, пройденный сигналом, t- время прохождения пути.

На рис. 2 представлен чертеж, поясняющий переход от закона изменения линейных проекций сторон равностороннего треугольника на прямую, вращающуюся вокруг центра треугольника к закону изменения временных задержек в зависимости от направления прихода сейсмического сигнала к равностороннему

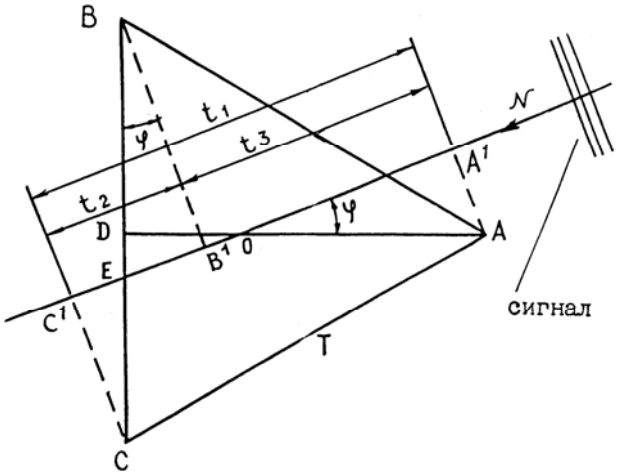

Рис. 2. Переход от проекций сторон треугольника к временным задержкам

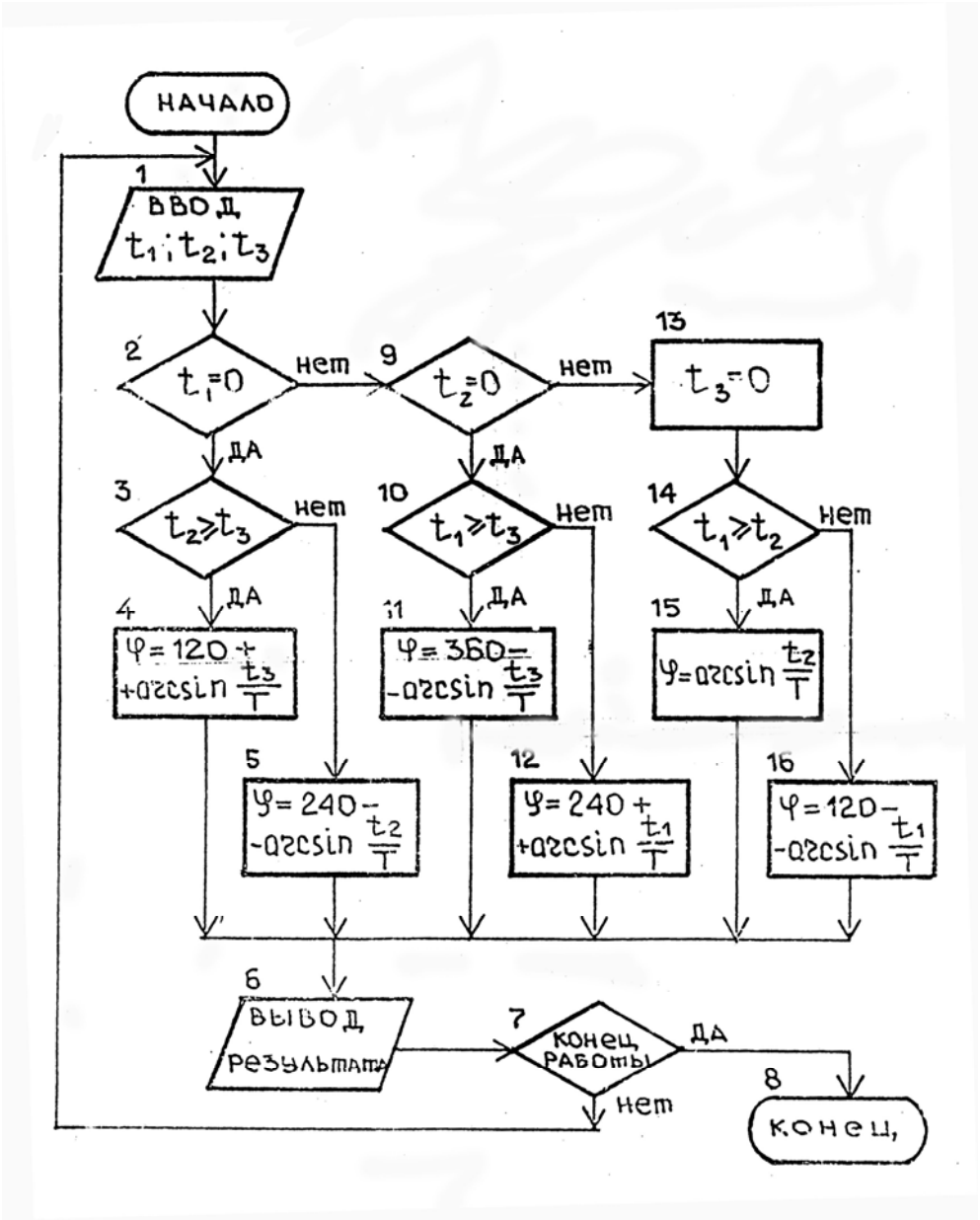

Рис. 3. Алгоритм определения пеленга на источник сейсмоакустического импульса

треугольнику ABC, в вершинах которого установлены сейсмоприемники. Здесь t_1 и t_3 – временные задержки прихода сигнала к сейсмоприемникам относительно сейсмоприемника, принимающего сигнал первым, а t_2 – временная задержка между временем прихода сигнала ко второму и дальнему сейсмоприемникам. O – центр равностороннего треугольника, φ - угол между направлением прихода сигнала и

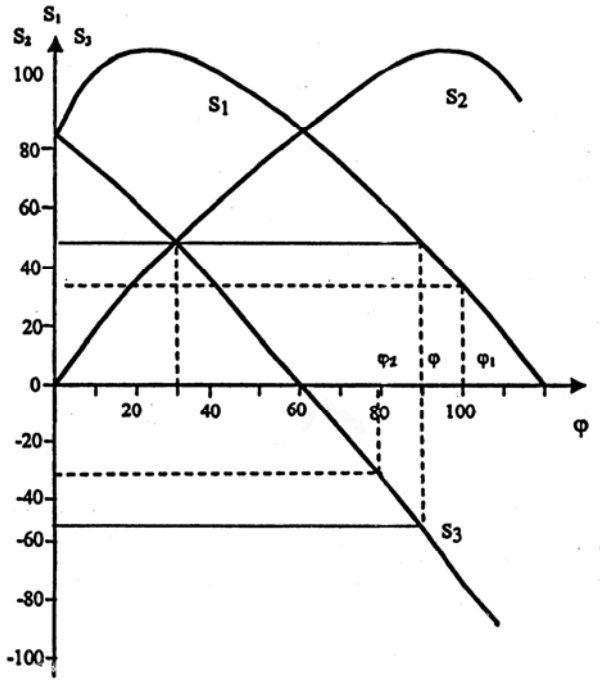

Рис. 4. Изменение проекций сторон равностороннего треугольника в зависимости от угла φ

началом отсчета, AD – биссектриса, начало отсчета против часовой стрелки.

Если учесть, что сейсмосигнал к равностороннему треугольнику может приходить в плоскости с любого направления, то по аналогии с вращающейся прямой формулы для временных задержек будут

$t_1 = l/V \sin(60^\circ + \varphi)$, $t_2 = l/V \sin\varphi$, $t_3 = l/V \sin(60^\circ - \varphi)$ (4)

Если временные задержки каким-либо методом измерены, то φ однозначно определяется по формулам

$\varphi = 60^\circ + \arcsin(t_1/T)$, $\varphi = \arcsin(t_1/T)$, $\varphi = 60^\circ - \arcsin(t_3/T)$, (5)

где $T = l/V$ – время, в течение которого сейсмический сигнал пройдет путь равный длине стороны равностороннего треугольника l.

Таким образом, промежутки времени, измеренные в двух вершинах, кроме дальней от источника, являются временными задержками, которые пропорциональны проекциям сторон треугольника на нормаль фронта сейсмической волны. По измеренным задержкам времени можно определить пеленг на источник излучения сейсмической волны. Од-нако для большей точности определения пеленга целесообразно использовать меньшую задержку, так как малые значения синусоидальной функции при незначительном изменении аргумента имеют большую скорость роста и хорошую линейность.

На основе новой теоремы и приведенных рассуждений был разработан алгоритм (рис. 3) для ЭВМ, который позволяет по единственному сейсмическому сигналу (импульсу) определить пеленг на источник этого сигнала в реальном времени.

При рассмотрении примеров определения пеленга φ на источник сейсмического импульса в полупространстве по алгоритму (рис. 3) было выявлено наличие ошибки для φ. Причем, чем больше угол места β (угол между плоскостью расположения равностороннего треугольника и прямой, проходящей через источник и центр равностороннего треугольника), тем больше абсолютная величина ошибки Δφ. Так, например, при $\beta = 20^\circ$ ошибка $\Delta\varphi = 6^\circ$. В связи с этим, был разработан метод определения пеленга φ на источник сейсмиче-

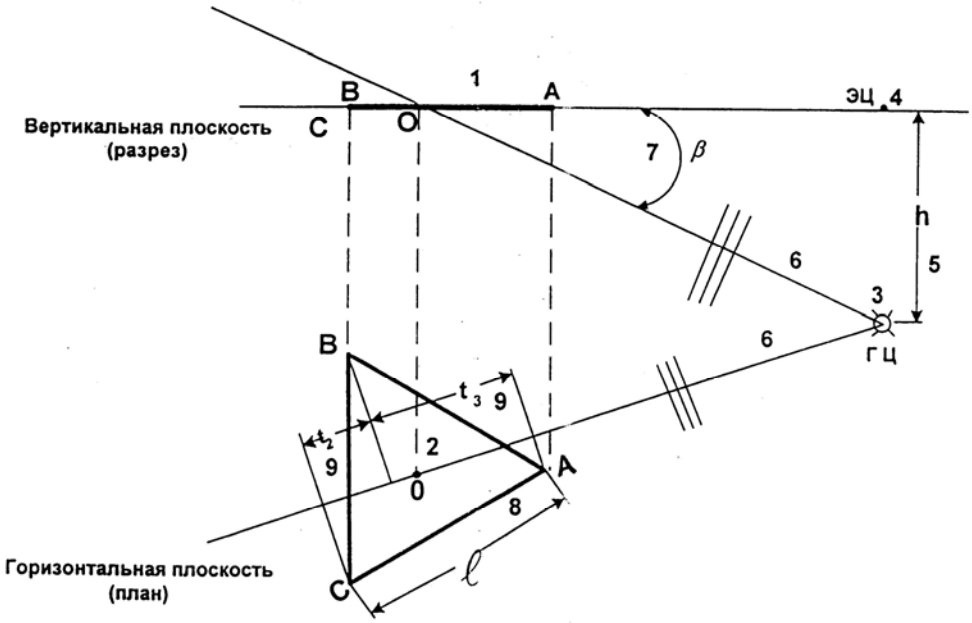

Рис. 5. Определение координат эпицентра и гипоцентра землетрясения в трехмерном пространстве

ского сигнала, устраняющий ошибку $\Delta\varphi$.

Для рассмотрения этого метода обратимся к чертежу (рис. 4), на ко-тором изображено изменение проек-ций сторон равностороннего тре-угольника в зависимости от пеленга φ. На основании этого чертежа приходим к выводу, что при изменении угла места β изменяются проекции сторон равностороннего треугольника по определенному закону. С увеличением угла места β все проекции сторон треугольника на вращающуюся прямую UV уменьшаются соответственно. Уменьшение обоих малых проекций сторон треугольника влечет за собой изменение пеленга. При этом уменьшение одной из них (S_3) влечет уменьшение пеленга (φ_2), а уменьшение второй (S_1) – к увеличению пеленга (φ_1).Установлено, что величина уменьшения пеленга φ_2, найденного по одной проекции (S_3) равна величине увеличения пеленга φ_1, найденного по другой проекции(S_1). Отсюда следует, что действительный (уточненный) пеленг на источник может быть определен по формуле

$$\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2) / 2. \qquad (6)$$

Если источник сигналов и равносторонний треугольник расположены в разных плоскостях (угол места $\beta \neq 0$), то встает новая, очень важная задача – определение направления на источник излучения (в сейсмологии –очаг землетрясения). Развивая теорию о проекциях сторон равностороннего треугольника на прямую, вращающуюся вокруг его центра, был разработан метод определения угла места β на источник сигнала. На рис. 5 представлен пояснительный чертеж определения угла места β, координат эпицентра и координат гипоцентра в трехмерном пространстве, не взирая на ориентацию треугольника отно-

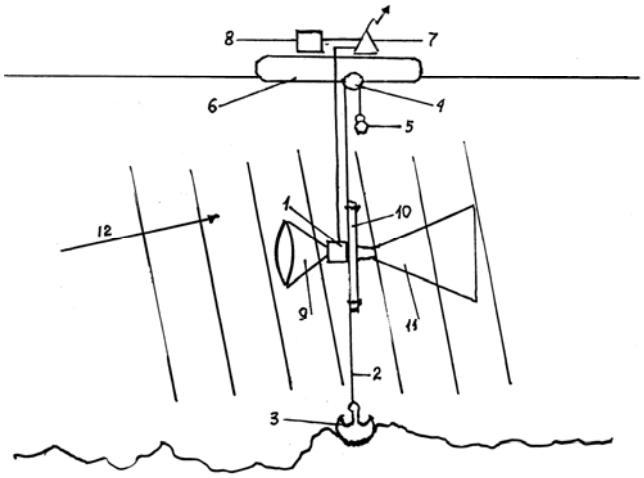

Рис. 6. Схема устройства определения волны цунами

сительно местоположения источника излучения.

Рассмотрим операции для примера по определению координат. При этом предположим, что сторона равностороннего треугольника равна 50 см, он установлен горизонтально на коренных породах земной коры. Имеется 3-хканальная система регистрации сейсмического сигнала и измерения временных задержек, подключенная к ЭВМ. Для определения координат необходимо выполнить следующие операции:

1. Определить скорость продольной волны Vp в объеме горного массива под треугольником.

2. Определить скорость поперечной волны Vs (можно из ‘соотношения Vp = 1.7Vs).

3. Измерить малую и среднюю временные задержки при регистрации сейсмосигнала от источника излучения tм и tс .

4. Определяем φ по формуле (6).

5. Определить временные задержки t´м и t´с для горизонтальной плоскости.

6. Определить угол места β гипоцентра по одной из формул

β = arc cos tм/t´м; β = arc cos tс/t´с.

7. Определить дальность до гипоцентра

dгц = Tc.Vp.Vs/(Vp - Vs).

8. Определить дальность до эпицентра

dэц = dгц cosβ

9. Определить глубину гипоцентра

z = h = dгц. sin β

Для прогноза удара цунами необходимо выполнить следующие дополнительные операции:

1. Определить максимальную амплитуду Ам в микронах для этого землетрясения, находят магнитуду Рихтера «М», при М>7 возможно цунами.2. Выполняют проверку наличия волны цунами с помощью информации от устройства определения волны цунами, размещенного в океане вблизи контакта литологических плит (вблизи разлома земной коры).

3. Принимают и анализируют информацию от устройства на наличие волны цунами, распространяющейся в объеме от поверхности до дна океана со скоростью 700-900 км/ч.

4. Учитывают давление волны.

5. Определяют высоту ударной волны цунами при выходе на берег.

6. Вычисляют время прихода цунами к береговой линии и оповещают население «Идет цунами», наступит через N минут.

Определение волны цунами выполняется с помощью разработанного устройства.

Устройство определения волны цунами представлено на рис. 6, содержит пьезоэлектрический датчик давления *1,* прикрепленный к металлической

пластине *10*, которая прикреплена к якорному канату *2* на глубине не менее 20 м, один конец каната прикреплен к якорю *3*, второй конец через блок *4* прикреплен к противовесу *5*, а блок *4* укреплен на нижней плоскости пробкового круга *6*, сверху на плоскости круга установлены радиопередатчик *7* и источник питания *8*, радиопередатчик *7* соединен с выходом пьезоэлектрического датчика давления *1*, к которому прикреплены с одной стороны усечённый конус *9*, упирающийся вершиной в точку давления для надежного возбуждения электросигнала датчиком, а с другой стороны датчик крепится к металлической пластине *10*, прикрепленной к якорному канату, к которой прикреплено вертикальное крыло *11* для поворота датчика на встречу распространяющейся волне цунами *12*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Саваренский Е.Ф.* Сейсмические волны. – М.: Недра, 1972. – 291 с.
2. *Винокуров Л.В.* Теорема о вращающейся прямой вокруг центра равностороннего треугольника и ее применение в горном деле. – М.:1988. Деп. в ЦНИЭИуголь. №4447.
3. *Патент* РФ №2284046.Способ определения места положения гипоцентра и эпицентра афтершока. Винокуров Л.В. Бюл.№26, 2006.
4. *Винокуров Л.В.* Способ определения координат подземного ядерного взрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень №6. 2006.
5. *Ракишев Б.Р., Винокуров Л.В.* Определение координат природных и техногенных источников излучения сигналов. Вестник национальной академии наук Республики Казахстан №1, 2006. ГИАБ

Коротко об авторах

Винокуров Л.В. – доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт по делам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций» (федеральный центр науки и высоких технологий).