

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ МЕТОДАМИ ВОЛНОВОЙ СЕЙСМИКИ

*Сергей Александрович Ефимов*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (913)906-59-29, e-mail: sergesaesa@yandex.ru

В статье представлен количественный анализ очага и эпицентра сейсмического события методами волновой сейсмики. Анализ проведен на основе реальной сейсмической записи, сформированной на базе сигналов от одного трехкомпонентного сейсмометра. Эффективность проведенного анализа показана на примере обработки экспериментальной сейсмической записи.

**Ключевые слова:** сейсмическая запись, сейсмическое событие, местоположение землетрясения, эпицентр, очаг землетрясения.

## QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE LOCATION OF THE EARTHQUAKE WAVE SEISMIC METHODS

*Sergey A. Efimov*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (913)906-59-29, e-mail: sergesaesa@yandex.ru

The article presents a quantitative analysis of the focus and epicenter of the seismic event by wave seismic methods. The analysis is carried out on the basis of real seismic record formed on the basis of signals from one three-component seismometer. The effectiveness of the analysis is shown on the example of experimental seismic record processing.

**Key words:** seismic record, seismic event, earthquake location, epicenter, earthquake focus.

### *Введение*

Задача визуализации сейсмических волновых полей является одной из актуальных задач геофизики [1]. Объективная визуализация сейсмических волновых полей позволяет исследовать геодинамические процессы недр планеты. Исследователи, объединенные одной целью: как заглянуть в глубь Земли, - используют теоретические и экспериментальные инструменты для достижения поставленной цели [2]. Однако решение этой задачи чаще всего основано на временном годографе, который формируется на данных о времени пробега сейсмических волн. Таким образом, основная часть современных подходов формирования изображения недр земли, относится к косвенным методам измерений, которые получают изображение на основе данных о времени пробега волн и скорости волн.

## Методы и материалы

В рамках общей проблемы визуализации сейсмических волновых полей существует задача идентификации сейсмических событий, в частности землетрясений. В статье [3] представлен качественный анализ способа волновой сейсмологии, показывающий возможность определения местоположения сейсмического события. В данном способе физическая модель формирования волнового поля представляет собой трехкомпонентный сейсмодатчик, сигналы которого через сейсмическую линзу формируют изображение, соответствующее структуре недр. Сейсмической линзе соответствует определенная программа обработки сейсмической записи.

В данной статье представлен количественный анализ способа волновой сейсмологии, показывающий возможность определения эпицентра и глубины сейсмического события методами волновой сейсмологии.

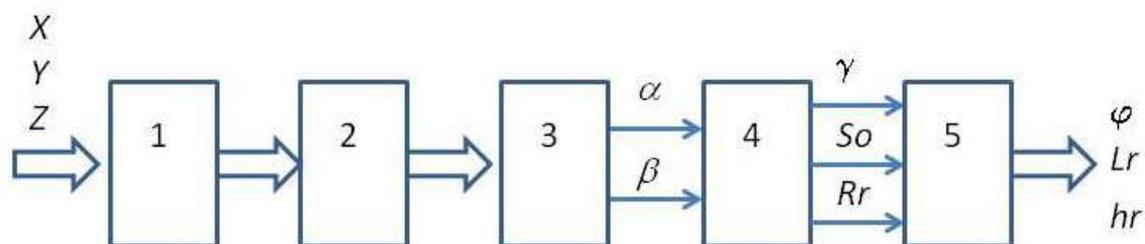


Рис. 1. Блок-схема формирования координат землетрясения

Блок-схема поясняет процедуру количественного анализа и содержит блоки, выполняющие следующие функции:

$X, Y, Z$  – сейсмические сигналы, формируемые на выходе трехкомпонентного сейсмоприемника;

блок 1 – регистрация сейсмических сигналов;

блок 2 – формирование изображения волнового поля;

блок 3 – интерпретация изображения волнового поля (выделение параметров сейсмического события: угол  $\alpha$  и  $\beta$ );

блок 4 – вычисление параметров сейсмического события:  $\gamma, S_0, Rr$ ;

блок 5 – вычисление параметров сейсмического события:  $\varphi, Lr, hr$ .

Далее использованы следующие обозначения:

$\varphi$  – угол между азимутом  $X$ -компоненты сейсмодатчика и направлением сейсмодатчик – эпицентр;

$\gamma$  – угол между линиями: сейсмодатчик – центр Земли; сейсмодатчик – очаг;

$\delta$  – угол между линиями: сейсмодатчик – центр Земли; очаг – центр Земли;

$R$  – расстояние от точки регистрации до эпицентра (без учета кривизны поверхности земли);

$Rr$  – расстояние от точки регистрации до эпицентра;

$L_r$  - расстояние от точки регистрации до эпицентра (с учетом кривизны поверхности земли: длина дуги от точки регистрации до эпицентра);

$S_0$  - расстояние от точки регистрации до очага;

$r$  - радиус Земли;

$h$  - глубина сейсмического события без учета кривизны поверхности;

$hr$  - глубина сейсмического события с учетом кривизны поверхности.

Для количественного анализа координат землетрясения использованы экспериментальные данные, полученные в период 15-19 сентября 2000 года сотрудниками ИВМиМГ СО РАН при проведении сейсмических экспериментов в районе п.Курья Алтайского края. План проведения эксперимента и результаты регистрации сейсмических сигналов представлены в информационно-вычислительной системе «Вибросейсмическое Просвечивание Земли» - сайт <http://org.sssc.ru/db>. Условное название данного эксперимента в базе данных – «002 Курья». Местоположение (координаты) точки регистрации: широта (град) 51,6522; долгота (град) 82,3338.

Фрагмент сейсмической записи, полученной в рамках данного эксперимента 17 сентября 2000 года (начало записи регистратора 06:00 часов по местному времени), представлен на рис. 2.

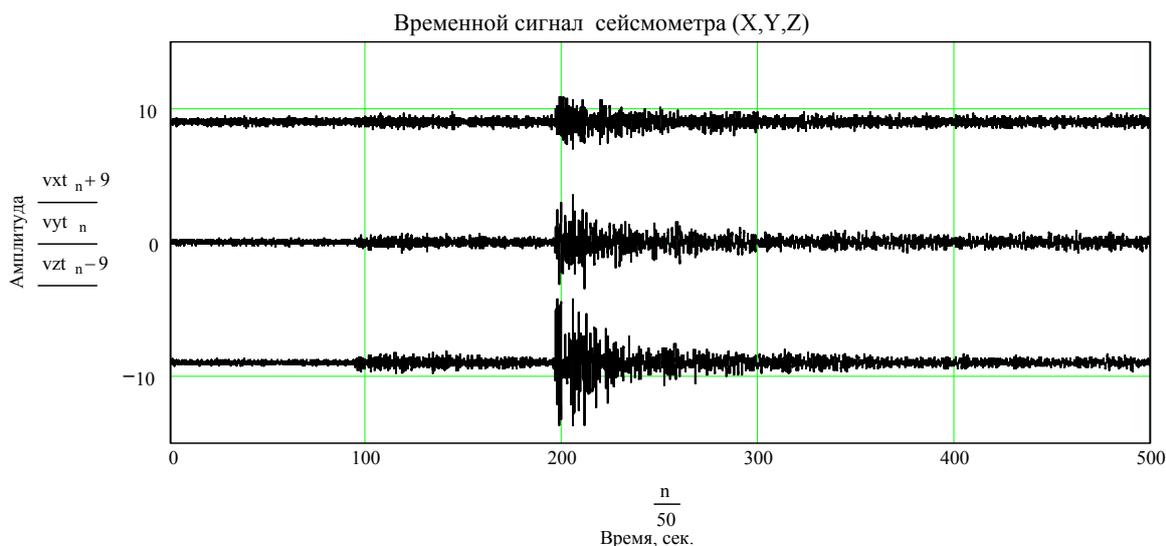


Рис. 2. Фрагмент сейсмической записи эксперимента «002 Курья»; регистратор ВИРС-М, сейсмометр СК1-П, X,Y,Z – компонента

Блок 2 осуществляет формирование изображения волнового поля (программа «Nelumbo»). В данной программе волновое сейсмическое поле – амплитуда и фаза - представлено в виде совокупности векторов (лучей) в пространстве телесного угла с размерностью  $\pi$ , что соответствует полусфере с центром в точке регистрации. Процесс сканирования сейсмического луча в сферическом полупространстве поясняет рис. 3.

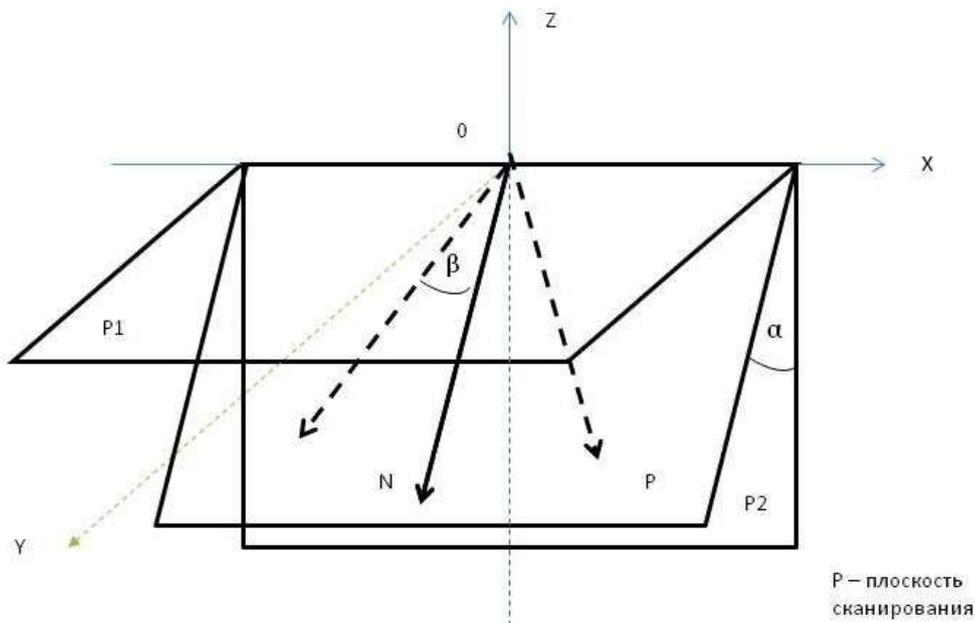


Рис. 3. Процесс сканирования сейсмического луча в сферическом полупространстве

Сейсмический датчик имеет три компоненты:  $X, Y, Z$ . Проекции колебаний точки поверхности Земли в декартовом пространстве будут соответствовать сигналам компонент сейсмического датчика  $X(t), Y(t), Z(t)$ . Это позволяет с помощью трехкомпонентного сейсмодатчика получить полную информацию о траектории смещения точки поверхности Земли в трехмерном пространстве. Сейсмический датчик имеет координаты  $(0,0,0)$ . Сканирование сейсмического луча в сферическом полупространстве проводится в плоскости  $P$ . Исходные данные сканирования сейсмического луча в сферическом полупространстве – это два угла  $\alpha$  и  $\beta$ . Диапазон изменения значений углов  $\alpha$  и  $\beta$ : от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ .

На выходе блока 2 формируется изображение волнового поля. Изображение на рис. 4 сформировано на основе сейсмических волн с частотным диапазоном  $0,5 - 25,0$  Гц. Результаты использования программы «Nelumbo» представлены на рис. 4.

В блоке 3 осуществляется интерпретация изображения волнового поля (выделение параметров сейсмического события: угол  $\alpha$  и  $\beta$ ). Изображение волнового поля на рис. 4 содержит признак сейсмического события (землетрясение) – черное пятно с координатами  $(-15; 20)$ . Координаты сейсмометра на изображении рис. 4  $(0;0)$ . Местоположение сейсмического события однозначно определяют два пространственных угла поворота вертикального вектора (по отношению к поверхности земли) в точке регистрации. В соответствии с рис. 4 угол  $\alpha = (-0,5890 \text{ рад})$ , а угол  $\beta = 0,7854 \text{ рад}$ .

В блоке 4 осуществляется вычисление параметров сейсмического события:  $\gamma, S_0, Rr$ . В блоке 5 осуществляется вычисление параметров сейсмического события:  $\varphi, Lr, hr$ .

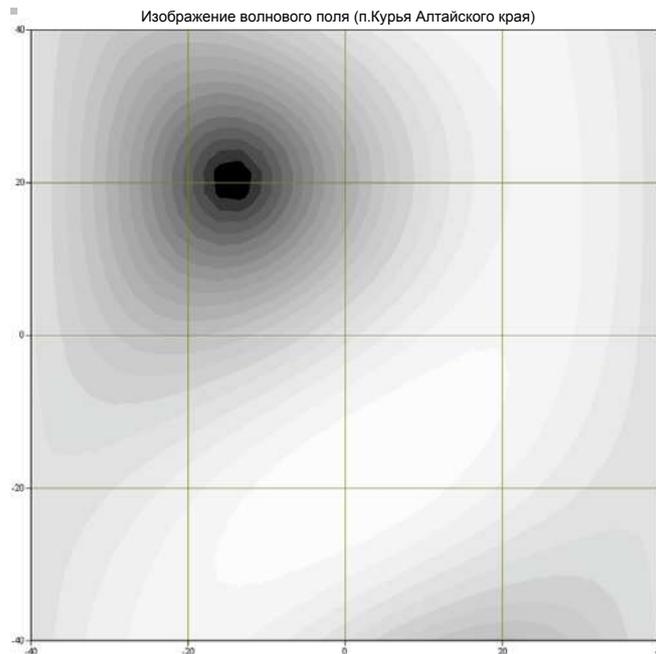


Рис. 4. Изображение волнового поля

На основе местоположения сейсмического события на изображении рис. 4 определяется направление: очаг сейсмического события - точка регистрации.

Формулы для вычисления параметров сейсмического события основаны на следующих геометрических моделях, представленных на рис. 5 и 6.

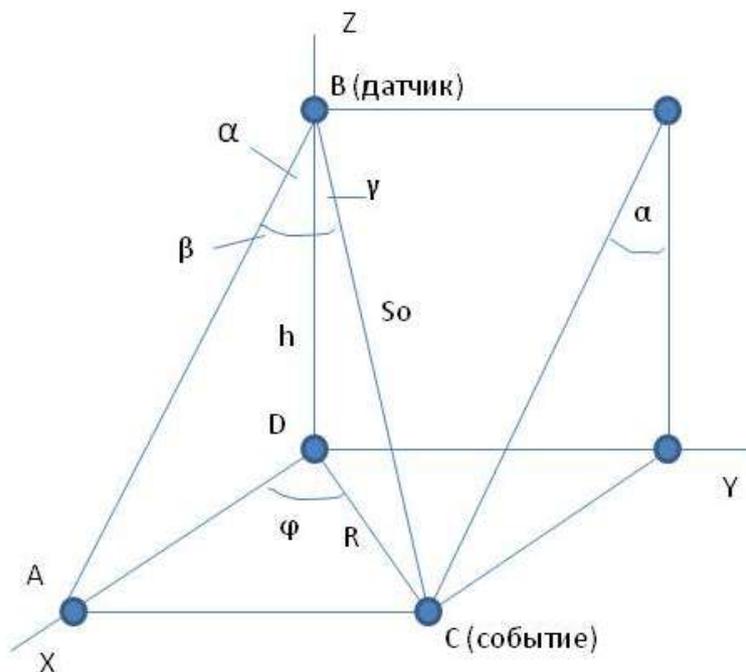


Рис. 5. Геометрическая модель без учета кривизны поверхности Земли

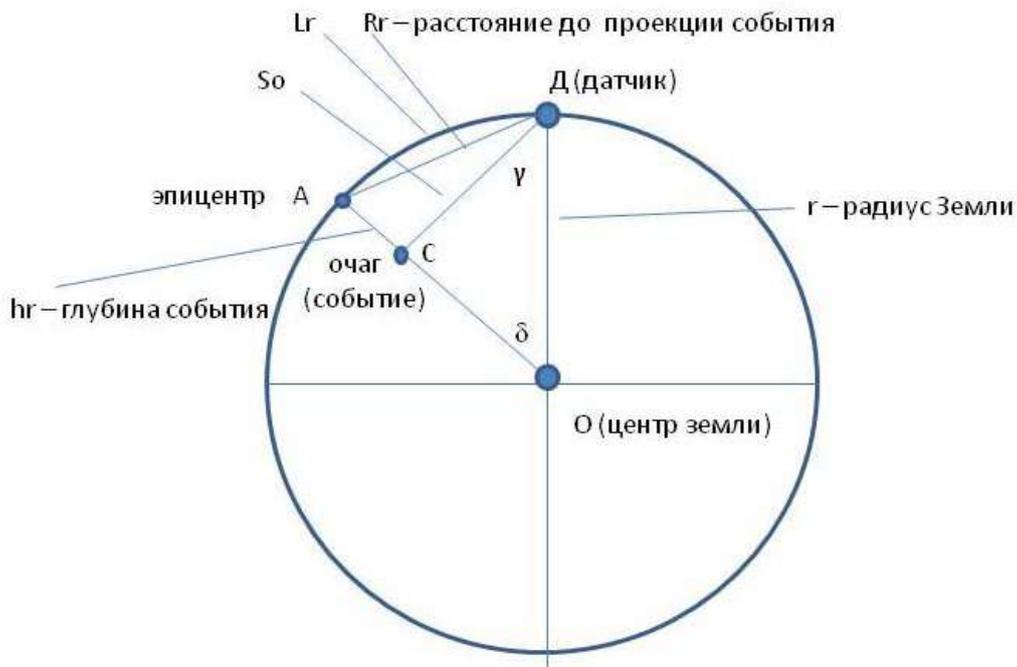


Рис. 6. Геометрическая модель с учетом кривизны поверхности Земли

В блоке 5 и блоке 6 рис.1 для вычисления параметров сейсмического события в соответствии с геометрическими моделями на рис.5 и рис.6 использованы следующие формулы:

$$\varphi = \arccos \left\{ \frac{\sin \beta}{(1 - \cos^2 \beta \times \cos^2 \alpha)^{0.5}} \right\} \quad (1)$$

$$\gamma = \arccos(\cos \beta \times \cos \alpha) \quad (2)$$

$$R = S_0 (1 - \cos^2 \beta \times \cos^2 \alpha)^{0.5} \quad (3)$$

$$h = S_0 (\cos \beta \times \cos \alpha) = S_0 (\cos \gamma) \quad (4)$$

$$hr = r \times \left\{ 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{S_0}{r}\right)^2 - 2 \frac{S_0}{r} \cos \gamma} \right\} \quad (5)$$

$$Rr = r \times \left\{ 2 \times \left( 1 - \cos \left[ \arcsin \left( \frac{R}{C} \right) \right] \right) \right\}^{0.5}; \quad C = (r^2 + S_0^2 - 2 \times r \times S_0 \times \cos \gamma)^{0.5} \quad (6)$$

$$Lr = \frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \delta; \quad \delta = \arccos \left( \frac{C^2 + r^2 - S_0^2}{2 \cdot C \cdot r} \right) \quad (7)$$

Идентификация символов формул приведена в начале статьи.

Для определения расстояния  $S_0$  до сейсмического события в рамках данного способа использована формула:

$$S_0 = \frac{V_p \times V_s}{V_p - V_s} \times (T_2 - T_1) = \frac{V_p}{\frac{V_p}{V_s} - 1} \times (T_2 - T_1), \quad (8)$$

где  $V_p$  – скорость сейсмических р-волн;  $V_s$  - скорость сейсмических s-волн;  $T_1$  - время прихода р-волн;  $T_2$  - время прихода s-волн.

Величина  $T_2 - T_1$  определяется по рис.2 и составляет 100с. Скорости сейсмических волн определены по источнику [4].

В таблице представлен итоговый расчет местоположения сейсмического события.

#### Расчет местоположения сейсмического события

Наименование	Значение
Исходные экспериментальные данные (изображение волнового поля)	
$\alpha$ , рад	-0,5890
$\beta$ , рад	0,7854
$T_2$ - время прихода сейсмических р – волн, с	100
$T_1$ - время прихода сейсмических s – волн, с	200
Исходные публичные данные	
$r$ - радиус Земли, км	6378
$V_p$ - скорость сейсмических р – волн, км/с	8,2
$V_s$ - скорость сейсмических s – волн, км/с	4,1
Расчетные данные	
$S_0$ - расстояние от точки регистрации до очага, км	820,00
$\varphi$ - угол между азимутом Х-компоненты сейсмодатчика и направлением сейсмодатчик - эпицентр, рад	0,51
$\gamma$ - угол между направлениями: сейсмодатчик – центр Земли; сейсмодатчик - очаг, рад	0,94
$R$ - расстояние от точки регистрации до эпицентра (без учета кривизны поверхности земли), км	663,30
$\varphi$ , град	29,07
$\gamma$ , град	54,02
$h$ - глубина сейсмического события (расстояние от очага до эпицентра без учета кривизны поверхности земли), км	482,11
$hr$ - глубина сейсмического события (расстояние от очага до эпицентра с учетом кривизны поверхности земли), км	444,91
$C$ , км	5 933,085
$Rr$ -расстояние от точки регистрации до эпицентра (с учетом кривизны поверхности земли), км	714,163

Результаты расчетов таблицы показывают, что эпицентр землетрясения расположен на расстоянии 714 км от точки регистрации. Глубина очага – 444 км. Угол между направлениями: точка регистрации – эпицентр; азимут Х-компоненты сейсмометра, - равен 29 градусов. Эти параметры землетрясения определяют местоположение эпицентра: Казахстан, район озера Балхаш. На рис. 7 представлен фрагмент карты с положением точки регистрации и эпицентра землетрясения по данным расчета в таблице.



Рис. 7. Фрагмент карты с положением точки регистрации и эпицентра землетрясения:

А – точка регистрации; В – эпицентр землетрясения

### ***Результаты***

В ходе исследования экспериментальной сейсмической записи землетрясения, полученной в районе п.Курья Алтайского края, установлено местоположение сейсмического очага и эпицентра: эпицентр – район озера Балхаш, Казахстан; глубина очага – 444 км.

### ***Обсуждение***

Задача определения местоположения сейсмического события решалась нетрадиционным подходом: вектор направления от регистратора до очага определен методами волновой сейсмологии. Расстояние до очага определено традиционным методом, который основан на различии скоростей сейсмических Р и S волн. При наличии двух точек регистрации записи сейсмического события метод волновой оптики позволяет определить и расстояние до очага, и расстояние до эпицентра.

### *Заключение*

Представленный подход количественного анализа местоположения очага сейсмического события, основанный на методах волновой сейсмологии, является эффективным инструментом мониторинга геодинамических процессов в недрах земли.

### *Благодарности*

Автор выражает благодарность сотрудникам ИВМиМГ СО РАН, замечания и критика которых на семинарах и в личных беседах формировали постановку задачи, решаемой в данной работе.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли / отв. ред. Б.Г. Михайленко, М.И. Эпов; Рос. Акад. Наук, Сиб отделение, Ин-т вычислительной математики и математической геофизики [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.-310 с. – (Интеграционные проекты СО РАН; вып.27).
2. Алексеев А.С., Ряшенцев Н.П., Чичинин И.С. Как заглянуть в глубь планеты // Наука в СССР. 1982. №3. С.31-37.
3. С.А. Ефимов. Способ визуализации сейсмических волновых полей для локализации сейсмических событий // Международный научно-исследовательский журнал, ISSN 2303-9868 PRINT, ISSN 2227-6017 ONLINE, №11, 2016, часть 5, Екатеринбург, с.73-76.
4. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет.-М.; Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1978.-192 с.

© С. А. Ефимов, 2018