

## **СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ**

*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 рассмотрен способ формирования изображения сейсмических волновых полей для определения структуры Земли и местоположения сейсмических событий, в том числе землетрясений. Данный способ позволяет получить изображение недр земли как результат прямого метода измерений комплексной амплитуды сейсмических волновых полей. Результативность способа показана на примере обработки экспериментальных сейсмических записей.

**Ключевые слова:** сейсмическая запись, изображение волнового поля, сейсмическое событие, структура Земли.

## **THE IMAGE GENERATION METHOD OF SEISMIC WAVE FIELD AS A METHOD OF RESEARCH STRUCTURE OF THE EARTH**

*Sergey A. Efimov*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630000, Russia, Novosibirsk, 6 Akademik Lavrentiev Prospect, research, tel. (913)906-59-29, e-mail: sergesaesa@yandex.ru

In the article the method of imaging of seismic wave fields to define the structure of the Earth and location of seismic events, including earthquakes. This method allows to obtain an image of the earth as the result of a direct measurement method of complex amplitudes of seismic wave fields. The performance of the method is demonstrated on the example of processing of experimental seismic records.

**Key words:** information recording, the wave-field image, seismic event, the structure of the Earth.

**Введение.** Задача визуализации сейсмических волновых полей является одной из актуальных задач геофизики [1]. Объективная визуализация сейсмических волновых полей позволяет получить пространственное изображение недр планеты. Эта задача является нетривиальной и решается различными подходами. Исследователи, объединенные одной целью: как заглянуть в глубь Земли, – используют теоретические и экспериментальные инструменты для достижения поставленной цели [2]. Решение данной задачи усложняет неоднородность структуры Земли, что побудило геофизиков при анализе структуры недр планеты использовать термин «неоднородность и мутность сред» [3]. Определенные достижения в решении данной задачи получены в рамках сейсмической томографии [4]. Однако при решении данной задачи преобладающим подходом является способ, основанный на временном годографе, который формируется

на экспериментальных либо теоретических данных о времени пробега сейсмических волн. Чтобы получить пространственное изображение недр планеты на основе временного годографа необходимо знать скорость сейсмических волн в районе исследования. Поскольку земная среда неоднородна, то значение скорости волн изменчиво. В этих обстоятельствах исследователи используют усредненное значение скорости волн при формировании пространственного изображения, что неизбежно приводит к понижению контрастности («мутности») полученного изображения. 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.

**Постановка задачи.** Другим подходом формирования изображения недр земли является прямой метод измерений, который широко используется в волновой оптике. Физическая модель формирования изображения недр земли представляет собой следующую картину. Поверхность земли является экраном для сейсмических волн. Если в этом экране существует отверстие, то сейсмические волны через это отверстие создадут определенное волновое поле за экраном. Если «рассматривать» это поле через сейсмическую линзу на определенном расстоянии от отверстия, то в районе фокальной плоскости сейсмической линзы будет формироваться изображение, соответствующее изображению недр земли до отверстия в экране (до поверхности земли). В этой модели отверстием в экране соответствует сейсмический датчик (сейсмометр). А сейсмической линзе соответствует определенная программа обработки сейсмической записи. Программа обработки сейсмической записи формирует изображение недр земли как совокупность точек, характеристики которых соответствует комплексным амплитудам волнового поля, которые в свою очередь зависят от интенсивности сейсмических лучей.

В соответствии с этой моделью автором данной работы разработана программа «Nelumbo», которая на основе экспериментальных сейсмических записей позволяет формировать изображение недр земли в пространстве полусферы, центр которой соответствует положению сейсмометра (точка регистрации). Алгоритм программы «Nelumbo» основан на принципе Гюйгенса – Френеля и теореме Кирхгофа (G. R. Kirchhoff) [5]. Г. Р. Кирхгоф придал принципу Гюйгенса – Френеля строгий математический вид, показав, что его можно считать приближенной формой теоремы, называемой интегральной теоремой Кирхгофа. Строгое математическое выражение для поля было первоначально получено Г. Гельмгольцем и обобщено Кирхгофом в 1883.

**Экспериментальные данные.** В период 15–19 сентября 2000 года сотрудниками ИВМиМГ СО РАН (г. Новосибирск) проведены вибросейсмические эксперименты 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.sccc.ru/db>. Условное название данного эксперимента в базе данных – «002 Курья». Местоположение (координаты) точки регистра-



ции: широта (град) 51,6522; долгота (град) 82,3338; азимут X – компоненты сейсмометра 95 град.

Фрагмент сейсмической записи, полученной в рамках данного эксперимента 15 сентября 2000 года, представлен на рис. 1.

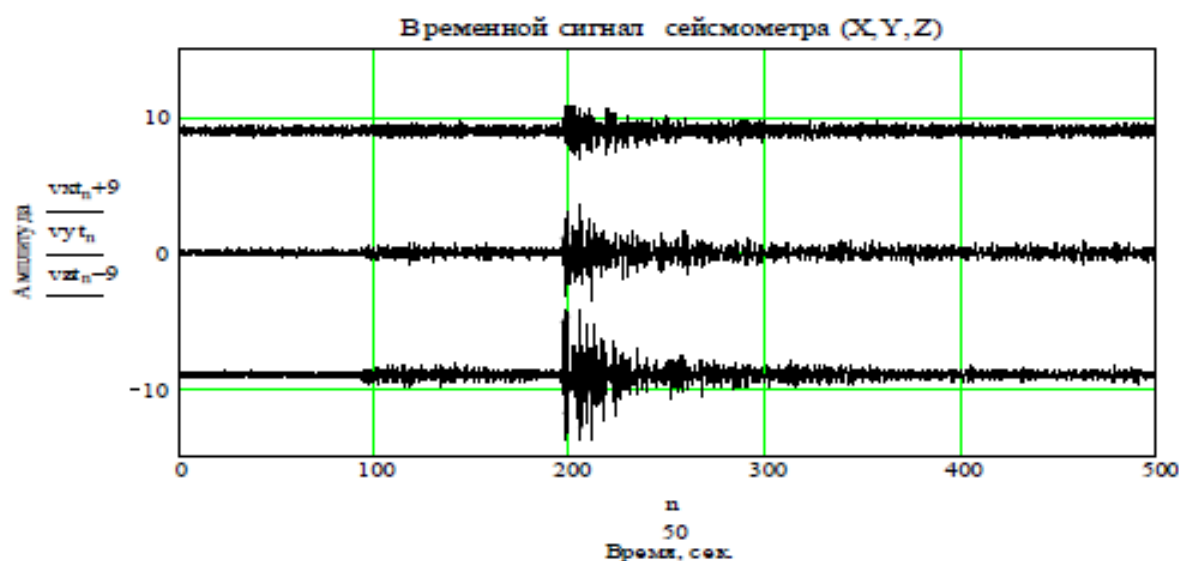


Рис. 1. Фрагмент сейсмической записи эксперимента «002 Курья»; регистратор ВИРС-М, сейсмометр СК1-П, X, Y, Z – компонента

Фрагмент сейсмической записи эксперимента «002 Курья» использован для визуализации сейсмического поля при помощи программы «Nelumbo».

Результаты использования программы «Nelumbo». На рис. 2 представлено изображение недр земли, полученное по экспериментальным данным рис. 1.

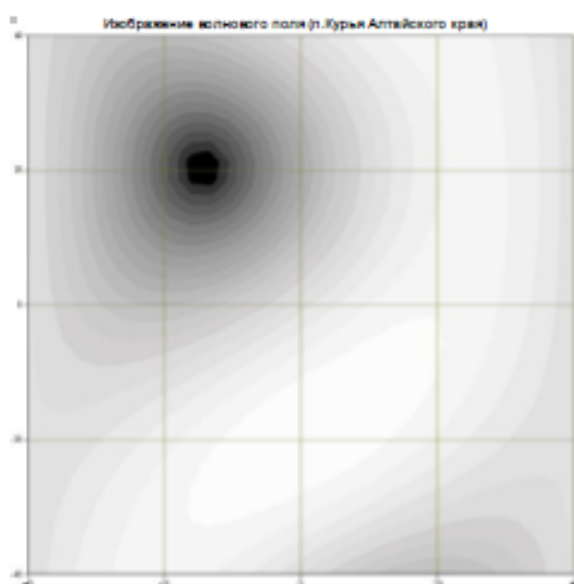


Рис. 2. Изображение недр земли, п. Курья Алтайского края, дата – 15.09.2000

Изображение недр земли на рис. 2 содержит признак сейсмического события – черное пятно с координатами  $(-15; 20)$ . Координаты сейсмометра на изображении рис. 2  $(0; 0)$ . Местоположение сейсмического события однозначно определяют два пространственных угла поворота вертикального вектора (по отношению к поверхности земли) в точке регистрации. Следовательно, на основе местоположения сейсмического события на изображении рис. 2 определяется направление: сейсмическое событие – точка регистрации. Для определения расстояния до сейсмического события в рамках данного способа достаточно иметь две точки регистрации. При двух точках регистрации на основании координат сейсмического события на двух изображениях недр земли и расстояния между точками регистрации определяется расстояние до сейсмического события. Изображение недр земли на рис. 2 сформировано на основе сейсмических волн с частотным диапазоном  $0,5-25,0$  Гц. Этот диапазон определяется возможностями сейсмометра и регистрирующей аппаратуры. Программа «Nelumbo» позволяет выделять определенный интервал или определенную частоту сейсмических волн, которая будет «освещать» исследуемую область недр земли. Очевидно, что для глубинного исследования недр земли (мантии и ядра) необходим низкочастотный диапазон сейсмических волн, а, следовательно, и низкочастотные сейсмометры и регистрирующая аппаратура. Частотный спектр сейсмической записи на рис. 1 содержит низкочастотные компоненты. Это обстоятельство дает предпосылку на возможность получения внутренней структуры Земли, «освещенной» сейсмическим событием на рис. 1. Чтобы получить изображение ядра и мантии земли необходимо выбрать тот диапазон частот сейсмического события, который проникает сквозь кору земли без дифракции волн. Для этого необходимо, чтобы длина сейсмической волны превосходила толщину коры земли. Толщина коры земли изменяется от 30 до 80 км. На этой глубине скорость сейсмических волн равна примерно 5 км./сек. Длина волны определяется как отношение скорости волны к частоте этой волны. Для частоты сейсмических волн  $f = 0,147$  Гц длина волны будет равна 34,96 км. Дальнейшие результаты формирования изображения недр земли показывают отсутствие влияния дифракции сейсмических волн в области коры Земли на частоте 0,147 Гц. На рис. 3 представлено изображение недр земли, полученное по экспериментальным данным рис. 1. при частоте сейсмических волн 0,147 Гц.

Качественный анализ изображения недр земли, полученного при помощи программы «Nelumbo» с использованием частоты сканирования сейсмических 0,147 Гц, показывает сферическую структурность этого изображения. При этом расстояние от центра земли – координаты  $(0, 0)$  на рис. 3 – до желтой границы по своим размерам совпадает с полученными ранее сейсмологами размерами внешней оболочки ядра. В соответствии с геометрической моделью Земли (рис. 3 справа) размер ядра Земли составляет 3540 км. Эта величина определена в соответствии с геометрической моделью Земли на рис. 3 как произведение среднего радиуса Земли на синус угла  $\beta$ . Угол  $\beta$  определяется по координатам желтой границы изображения недр земли на рис. 3 и в данном случае составля-



ет  $\beta = 33,75^\circ$ . Средний радиус Земли равен 6371 км. Тогда произведение радиуса Земли на синус  $\beta = 33,75^\circ$  будет равно 3540 км. Таким образом, известные в научных кругах геофизиков оценки размера внешнего ядра Земли, совпадают с полученными расчетами.

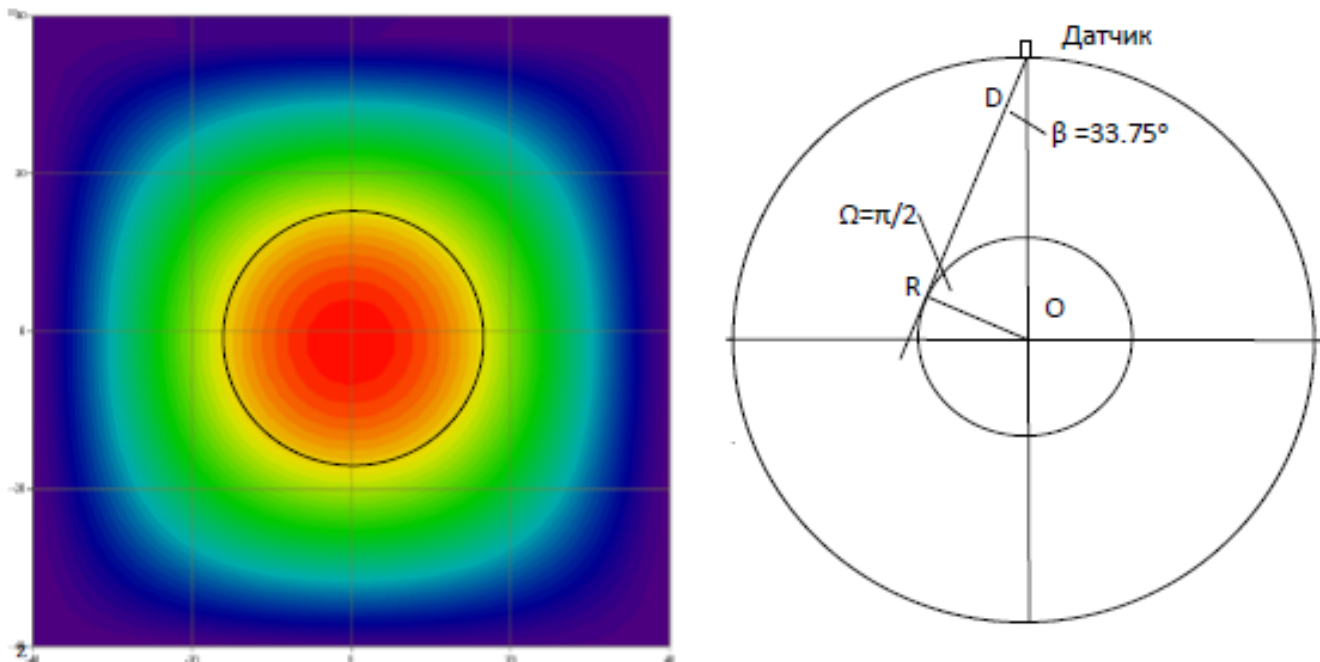


Рис. 3. Слева – изображение недр земли, п. Курья Алтайского края, дата – 15.09.2000; частота освещения недр земли сейсмическими волнами – 0,143 Гц; справа – геометрическая модель земли

Продолжая качественную интерпретацию полученного при помощи программы «Nelumbo» изображения недр земли на рис. 3 можно с определенной уверенностью соотнести зеленую область изображения с мантией Земли, а сплошной красный диск – с твердым ядром Земли. Размеры твердого ядра Земли, полученные аналогично с расчетами внешней оболочки ядра, также совпадают с уже известными оценками сейсмологов.

**Выводы.** Представленный способ визуализации сейсмического волнового поля основан на прямом методе измерений. Комплексная амплитуда каждого пространственного вектора в полусфере с центром в точке регистрации непосредственно соответствует точке изображения недр земли. Данный способ является технологическим инструментом, который на основе записи информации в точке регистрации позволяет формировать изображение недр земли, определять местоположение сейсмических событий и выявлять особенности структуры земной поверхности.

**Заключение.** 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. Николаев А. В. Сейсмика неоднородных и мутных сред. – М. : Наука, 1972. – 324 с.
4. Дзевонский А., Андерсон Д. Сейсмическая томография // В мире науки. – 1984. – № 12. – С. 16–25.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1970. – 856 с.

© С. А. Ефимов, 2017