

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Разработана программа расчетов сейсмических волновых полей в средах с произвольной геометрией границ. Промоделировано влияние рельефа на интенсивность в точках на неровной дневной поверхности.

**Ключевые слова:** моделирование сейсмических волновых процессов; метод конечных элементов, поглощающие экраны.

**Постановка задачи.** Вопрос о влиянии рельефа на параметры сейсмического волнового поля имеет давнюю историю, но, к сожалению, выяснен не до конца. Сказанное делает актуальным постановку и решение задачи о влиянии рельефа на параметры сейсмических колебаний методом конечных элементов.

**Программы для решения задачи.** Программа моделирования сейсмических волн решает уравнение распространения упругих волн методом конечных элементов. Программа была написана на языке 'python' с использованием библиотек линейной алгебры и разряженных матриц, которые в свою очередь реализованы на языках фортран и Си, обеспечивая приемлемую скорость в вычислительных приложениях.

На вход программы должен быть подан файл с информацией о триангулированной области с координатами и номерами вершин.

Параметры среды для расчетов должны быть следующие: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, шаг по времени и количество шагов по времени.

На выходе программа выдает картинки для каждого отдельно взятого дискрета времени - двумерный график амплитуды на исследуемой области, текстовые файлы со значениями амплитуды (для каждого дискрета времени) и сейсмограммы (в текстовом со значениями и графическом вариантах) в заранее выбранных точках.

**Параметры модели.** Модель для простоты обладает симметрией. Размеры изучаемой области (в соответствующем масштабе), следующие: 700 м в длину, 120 м в высоту плоской части до подъема. Общая высота возвышения от основания до вершины до 160 м, соответствующие размеры возвышения – 40 м в высоту и 140 м в ширину. Таким образом угол наклона возвышения примерно равен 30°. Триангуляция данной модели производилась в программе triangle с флагом качества – q и с максимальной площадью треугольника равной 5 м<sup>2</sup>. Примерное количество треугольников по ширине возвышения составляет порядка 40 треугольников и 20 по высоте возвышения. Всего же количество треугольников в модели достигает около 17 тыс. При таких параметрах модель для 250 временных шагов обчисляется в течение примерно 4-х часов на процессоре "Core i3-370M".

Плоская горизонтально-поляризованная волна моделируется множеством источников SH-волн, заданных у основания модели. Длина фронта падающей плоской волны 600 м – меньше горизонтальных размеров моделируемой области, с тем, чтобы по возможности уменьшить влияние боковых стенок области, длина волны  $\lambda = 20$  м. По 50 метров с обеих сторон отводится на слой с поглощением. Слой этот приклеен к боковым стенкам области моделирования и необходим для уменьшения влияния боковых стенок на волновое поле в модели. Отношение длины волны к высоте возвышения  $\lambda/h = 20/40 = 0,5$ . Такая длина волны позволяет более детально изучить эффекты, связанные с усилением амплитуды, во внутренней части возвышения, проследить ее развитие вблизи области возвышения, в какой-то мере разделить эффекты лучевого приближения и дифракционные на неровностях рельефа.

Заметим, что в работах других ученых отношение длины волны к высоте неровности рельефа было значительно большим – от 3,5 до 9, что означает сравнительную малость (по сравнению с нашим случаем) исследованных неровностей рельефа.

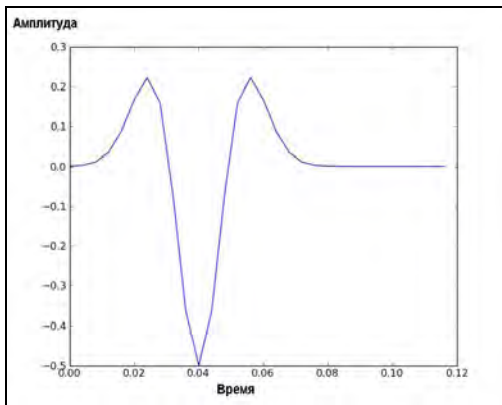
**Входной импульс.** В данной работе в качестве входного использовался аналитический импульс Риккера, форма которого представлена на рис. 1. Математически импульс описывается формулой:

$$(a^2 - 0.5) \exp(-a^2), \quad a = \pi(t - t_g)/t_p$$

$t_g$  – смещение во времени 0.040 с,  $t_p$  – период импульса 0.040 с.

Шаг дискретизации по времени 0.004 с.

**Об уменьшении влияния боковых стенок.** При построении модели было учтено поглощение на боковых стенках для значительного ослабления множественных отражений от них. Для этого к боковым областям приклеивалась область с матрицей демпфирования С, представленной в виде линейной комбинации матриц масс и жесткости  $\alpha M + \beta K$  (предполагается демпфирование по Релею), где  $\alpha$  и  $\beta$  константы, которые рассчитываются в зависимости от 2-х значений частот входного импульса по формуле  $\alpha + \beta \omega_i^2 = 2\omega_i \xi$ . Для того, чтобы не составлять отдельные уравнения для разных областей - матрица С была посчитана для всей области, однако ненулевые значения матрицы – только для области поглощения.

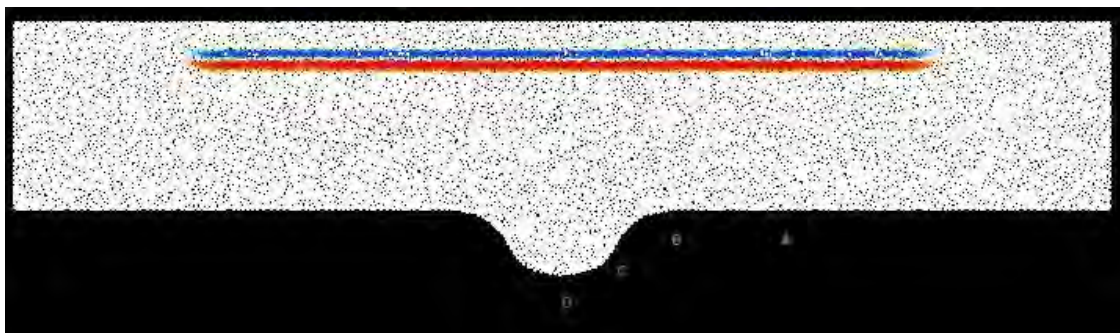


**Рис. 1.** Импульс Риккера

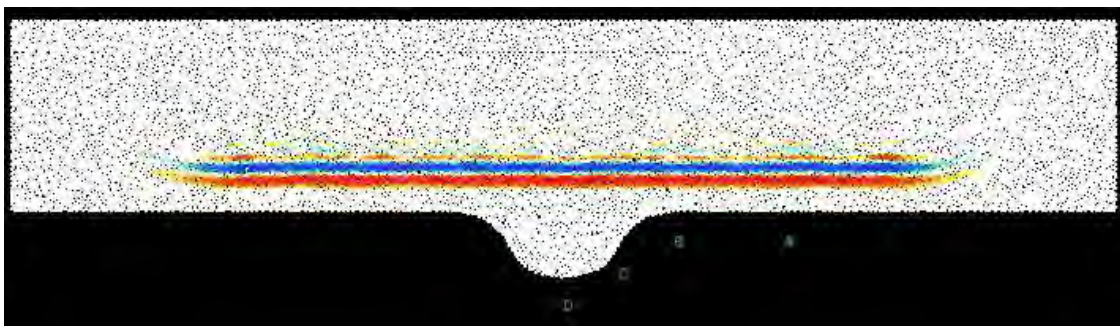
Для импульса Риккера с периодом 40 мс, частоты, соответствующие максимальной длительности и половине от нее – составляют соответственно 44 и 64 Гц. Параметр  $\xi$  – коэффициент Пуассона – для рыхлых отложений лежит в диапазоне 0.20-0.30. В данной работе этот параметр был выбран 0.30. Решая систему

уравнений для каждой частоты и  $\xi$ , найдем  $\alpha$  и  $\beta$ :  $\alpha=98.296$  и  $\beta=8.84 \cdot 10^{-4}$ .

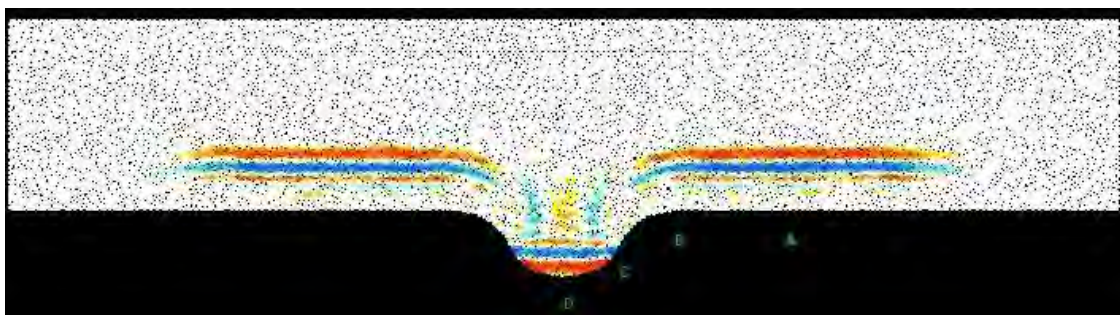
**Результаты эксперимента.** Процесс распространения упругой волны в модели представляется в виде последовательности кадров, каждый из которых показывает волновую картину со сдвигом по времени на 4,8 мсек, а по расстоянию на 1,2 м. Иллюстрацией этого являются рис. 2, 3 и 4 соответственно для моментов времени 144 мсек; 432 мсек и 648 мсек. На всех рисунках амплитуда упругой волны представлена в цветовой гамме – положительным значениям соответствует красный цвет, отрицательным – синий. В момент времени 0,48 с на сотом шагу упругая волна достигает противоположной плоской части модели, отражается от нижней поверхности модели и распространяется вверх. На неровностях рельефа возникают дифрагированные волны (отчетливо видные на рис. 4), которые складываясь с первичной волной, порождают изменение ее параметров – амплитуд, частот и фаз.



**Рис. 2.** Волновая картина при  $\tau = 144$  мсек



**Рис. 3.** Волновая картина при  $\tau = 432$  мсек



**Рис. 4.** Волновая картина при  $\tau = 648$  мсек

Уже на приведенных рисунках 2 – 4 видно, что если и имеет место изменение амплитуд на неровностях рельефа, оно сравнительно невелико. Максимальные амплитуды сейсмического импульса в точках А,В,С,Д соответственно равны  $7,7 \cdot 10^{-4}$ ;  $6,8 \cdot 10^{-4}$ ;  $6,4 \cdot 10^{-4}$ ;  $11,2 \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, амплитуда упругой волны в пределах неоднородности рельефа по отношению к соответствующей амплитуде для плоского участка поверхности составляет от 0,83 до 1,45, т.е. изменение амплитуд не превышает 1,5. В переводе в баллы, принимая соотношение  $A_1/A_2 = 2^{\Delta I}$ , получим  $\Delta I = 0,6$  балла.

Этот результат получен при отношении длины волны к вертикальным размерам неоднородности рельефа  $\lambda/h = 0,5$ . Для других соотношений длины волны и высоты неоднородности амплитудные изменения будут другими.

**Выводы.** Разработана программа расчетов сейсмических волновых полей методом конечных элементов. С использованием этой программы исследовано влияние неоднородности рельефа на амплитуду упругой волны. Для соотношения длины волны к вертикальным размерам неоднородности  $\lambda/h = 0,5$  эти изменения не превышают 1,5, или при переводе в шкалу интенсивности не более 0,6 балла.

### МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ СЕЙСМІЧНОГО МІКРОРАЙОНУВАННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

А.С. Альшин, Р.В. Малишев

Розроблено програму розрахунків сейсмічних хвильових полів у середовищах з довільною геометрією границь. Промодельовано вплив рельєфу на інтенсивність у точках на нерівностях денної поверхні.

**Ключові слова:** моделювання сейсмічних хвильових процесів; метод скінченних елементів, поглинаючі екрани.

### MODELING OF SEISMIC-TECTONIC PROBLEMS BY MEANS OF FINITE ELEMENTS

A.S. Aleshin, R.V. Malyshev

The program for calculations of seismic wave fields in media with free boundaries was developed. Was modeled an influence of a relief upon intensity in points on the uneven day surface.

**Key words:** modeling of wave seismic processes, method of finite elements, absorbing screens.