Для цитирования: *Б.И. Шахтарин, Т.Г. Асланов, Х.Д. Магомедов, Х.Ю.Тагиров. Определение структуры земной коры по изменению скоростей сейсмических волн по данным произошедших землетрясений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(4): 101-111. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-101-111*

For citation: *B.I. Shakhtarin, T.G. Aslanov, H.D. Magomedov, H.Yu. Tagirov. Determination of the structure of the earth's crust by changing the velocity of seismic waves from the earthquake data.Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (4): 101-111. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-101-111*

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 550.34.01
DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-101-111

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПО ДАННЫМ ПРОИЗОШЕДШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

[1]Б.И. Шахтарин, [2]Т.Г. Асланов, [3]Х.Д. Магомедов, [4]Х.Ю.Тагиров
[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
[1] 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, Россия,
[2]Дагестанский государственный технический университет,
[2]367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,
[3] Дагестанский филиал геофизической службы РАН,
[3] 367008, г. Махачкала, ул. Белинского,16, Россия,
[4]ООО «Дагсейсмо»,
[4] 367030, г. Махачкала, ул. Ирчи-Казака, 11 а, Россия.

Резюме. Цель. *Исследование структуры земной коры через определение скоростей сейсмических волн по предварительно разбитым участкам земной коры.* ***Метод.*** *Для определения скоростей сейсмических волн предлагается два математических метода. В основе первого лежит метод средневзвешенного, а второго - решение систем линейных алгебраических уравнений матричным методом. В качестве исходных параметров при расчетах используются данные произошедших землетрясений - координаты гипоцентров землетрясений и сейсмодатчиков, а также времена пробега сейсмических волн от гипоцентра землетрясения до сейсмодатчиков.* ***Результат.*** *Решена задача определения скоростей распространения сейсмических волн на различных участках земной коры двумя различными методами. Получены плотности распределения ошибок в определении скоростей сейсмических волн для метода средневзвешенного, в шести различных ситуациях распределения скоростей сейсмических волн на местности, и для матричного метода, в случае распределения скоростей сейсмических волн на местности в шахматном порядке.* ***Вывод.*** *Предложенные методы позволят уточнять координаты очагов произошедших землетрясений; использование метода итераций позволяет значительно улучшить точности определения координат гипоцентра землетрясения и скоростей сейсмических волн на различных участках. Наличие, при расчетах, значений скоростей сейсмических волн на различных участках земной коры позволяет определять координаты очага землетрясения по новым методам, основанным на использовании фигуры второго порядка – гиперболоида, которые ранее сейсмологами не применялись.*

Ключевые слова: *сейсморазведка, сейсмология, сейсмодатчик, сейсмическая волна, скорости сейсмических волн, распределение, структура*

DETERMINATION OF THE STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST BY CHANGING THE VELOCITY OF SEISMIC WAVES FROM THE EARTHQUAKE DATA

[1]B.I. Shakhtarin, [2]T.G. Aslanov, [3]H.D. Magomedov, [4]H.Yu. Tagirov
[1]Bauman Moscow State Technical University,
[1] 5, 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Russia,
[2]Daghestan State Technical University,
[2]70 Imam Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

[3] Dagestan branch of the Geophysical Service of the Russian Federation Academy of Sciences,
[3] 16 Belinsky St., Makhachkala 367008, Russia,
[4]LLC «Dagseismo»,
[4] 11 a Irchi-Kazaka St., Makhachkala 367030, Russia

Abstract. Objective. *A study of the structure of the earth's crust by determining the velocities of seismic waves from previously broken sections of the earth's crust.* ***Methods****. Two mathematical methods are proposed for determining the seismic wave velocities. The first is based on the weighted average method, and the second is based on the matrix method for solving systems of linear algebraic equations. The initial parameters used in the calculations are data from earthquakes that occurred – the coordinates of earthquake centers of origin and seismic sensors, as well as the travel times of seismic waves from the earthquake center of origin to the seismic sensors.* ***Results.*** *The problem of determining the propagation velocity of seismic waves in different parts of the earth's crust is solved by two different methods. The distribution densities of errors in determining the seismic wave velocities are obtained for the weighted average method, in six different situations, for the distribution of seismic wave velocities on the ground, and the matrix method, in the case of distribution of seismic wave velocities on the ground in staggered order.* ***Conclusion****. The proposed methods allow refining the coordinates of the centers of the occurred earthquakes while using the iteration method can significantly improve the accuracy of determining the coordinates of the earthquake center of origin and the speeds of seismic waves in various areas. The presence of seismic wave velocities in various parts of the earth's crust during calculations allows determining the coordinates of the earthquake source using new methods based on the use of second-order hyperboloid figures, which were not previously used by seismologists.*

Keywords*: seismic survey, seismology, seismic sensor, seismic wave, seismic wave velocities, distribution, structure*

Введение. В настоящее время расчет координат очага землетрясения производится с использованием усредненных значений скоростей сейсмических волн [1]. Причем, эти значения считаются постоянными для больших участков земной коры [2].

В связи с этим, были разработаны методы, позволяющие вычислять средние скорости волн по отдельным направлениям земной коры [3]. В тоже время, по пути своего распространения сейсмические волны проходят через различные породы, при этом скорости и направления распространения волн в различных средах могут различаться друг от друга. Игнорирование этих обстоятельств приводит к значительным ошибкам в определении координат очага землетрясения.

Известны множество методов, которые позволяют определить координаты гипоцентров землетрясения. Одним из наиболее точных является метод сфер, который позволяет одновременно с определением координат гипоцентра также определять и скорости сейсмических волн по направлению от гипоцентра землетрясения до сейсмодатчиков [3]. Применение иных методов ограничено тем, что для их использования необходима информация о структуре земной коры, к таким методам можно отнести все методы, использующие в своей основе фигуру второго порядка – гиперболоид [4-8].

В работе [9] предложен метод по определению структуры земли, однако по ней в расчетах использовалась информация о координатах эпицентра, а не гипоцентра землетрясения, а в работе [10] была предложена общая концепция матричного метода.

В рамках настоящей работы разработаны математических методы для определения структуры земной коры по изменению скоростей сейсмических волн по произошедшим землетрясениям.

Постановка задачи. Для нахождения скоростей сейсмических волн на различных участках земной коры используются данные произошедших землетрясений. В качестве таких данных рассматриваются: координаты гипоцентров землетрясений [11-18], сейсмодатчиков и

времена пробега сейсмических волн от очагов землетрясений до сейсмодатчиков. По найденным скоростям, по методикам сейсморазведки может быть определена структура исследуемого участка земли

Методы исследования. Для исследования структуры земли была задана область с размерами 160 на 160 квадратных километров (160x160 км^2) (рис.1), которая разбита на девять равных участков. Считается, что скорости распространения сейсмических волн в каждом из этих участков не одинаковые.

На рис. 1, точками S_1, S_2, S_3, обозначены сейсмодатчики, точками O_1, O_2, O_3 – гипоцентры землетрясений, точками T_{56} и T_{69} – пересечение трассы, по которым распространяется сейсмическая волна от очага землетрясения O_3 к сейсмодатчикуS_3 с границами участков соответственно V_5-V_6 и V_6-V_9.

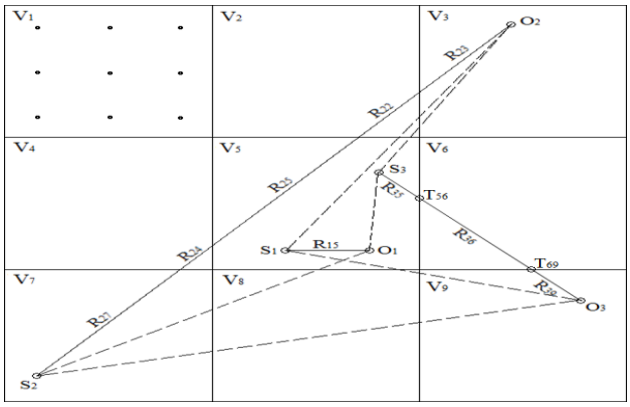

Рис.1. Пояснение к методу определения скоростей сейсмических волн
Fig.1. Explanation of the method for determining the velocities of seismic waves

При этом предполагается, что очаги землетрясения и сейсмодатчики могут располагаться в девяти позициях на каждом из участков определяемые формулами (участок V_1 на рис.1):

$$X_o = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}; X_s = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS};$$
$$Y_o = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}; Y_s = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}, \quad (1),$$

где: X_o, Y_o, X_s, Y_s – координаты по оси абсцисс и ординат очага землетрясения и сейсмодатчиков соответственно;

R – длина ребра исследуемой области;

M – число участков (квадратов) на которую разбита исследуемая область;

S – число точек внутри участка с одинаковой скоростью в которых могут располагаться сейсмодатчики или гипоцентры землетрясений;

n – переменная изменяющаяся в интервале от 0 до 9.

На рис.1, в верхнем левом квадрате, графически показаны возможные точки расположения очагов землетрясений или сейсмодатчиков.

Найдем координаты точек пересечения трасс, по которым распространяется сейсмическая волна с границами каждого из 9 участков определяемые фориулами:

– по оси абсцисс:

$$Y_i = \left(\frac{Rk}{M} - X_1\right)\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} + Y_1; \quad X_i = \frac{Rk}{M}, \quad (2),$$

– по оси ординат:

$$Y_i = \frac{Rk}{M}; \quad X_i = \left(\frac{Rk}{M} - Y_1\right)\frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} + X_1, \quad (3),$$

где: $X_1 = X_o$, $Y_1 = Y_o$, $X_N = X_s$, $Y_N = X_s$;

k –номер границы пересечений;

i – переменная изменяющаяся в интервале от 2 до N-1.

Время распространения сейсмической волны на каждом из участков может быть найдено по выражению:

$$t_j = \frac{\sqrt{(X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2}}{V_j} + \sqrt{\frac{(Z_o - Z_s)^2((X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2)}{((X_o - X_s)^2 + (Y_o - Y_s)^2)V_j^2}} \quad (4),$$

где: i – переменная, изменяющаяся в интервале от 1 до N-1;

j – переменная, изменяющаяся в интервале от 1 до 9 обозначающая номер участка;

V_j – скорость сейсмической волны в соответствующей ячейке.

Суммарное время прохождения сейсмической волны от очага землетрясения до сейсмодатчика может быть определено как сумма времен пробега сейсмической волны через участки, на которые разбита исследуемая область.

Определение структуры земной поверхности методом средневзвешенного

На рис.1 отрезки, образующиеся пересечением заданных участков на пути распространения сейсмической волны от очага землетрясения к сейсмодатчику, обозначены через R_{ij}, где i – номер, обозначающий один из путей распространения сейсмической волны, а j – номер участка, через который данная волна проходит.

Условно, все трассы распространения сейсмических волн, кроме одного от гипоцентра землетрясения до сейсмического датчика, показаны пунктирными и в расчетах не участвуют. Это вызвано тем, что для каждого конкретного землетрясения вычисляется усредненная скорость сейсмических волн от очага землетрясения до сейсмодатчиков, а использование данных по остальным трассам приведет к увеличению расхода машинного времени.

Необходимо отметить, что:

– чем больше длина пути, по которому сейсмическая волна проходит через тот или иной участок земной коры, тем большее влияние она оказывает на среднюю скорость сейсмической волны. Например, влияние на среднюю скорость отрезка пути R_{27} больше, чем отрезка R_{22};

– чем дальше располагается сейсмический датчик от гипоцентра землетрясения, тем меньше точность вычисления скорости сейсмической волны для конкретного участка.

На основании изложенного можно составить уравнение средней взвешенной скорости для определения скоростей сейсмической волны, к примеру, для пятого участка:

$$V_{u5} = \frac{V_1\sqrt{R_{15} + Z_{15}}/R_1 + V_2\sqrt{R_{25} + Z_{25}}/R_2 + V_3\sqrt{R_{35} + Z_{35}}/R_3}{\sqrt{R_{15} + Z_{15}}/R_1 + \sqrt{R_{25} + Z_{25}}/R_2 + \sqrt{R_{35} + Z_{35}}/R_3} \quad (5),$$

где V_i – средняя скорость сейсмической волны от сейсмодатчика S_i до гипоцентра землетрясения O_i;

V_{u5} – скорость сейсмической волны на пятом участке;

Z_{i5}– изменение глубины трассы распространения сейсмической волны от i-ого сейсмодатчика до i-ого очага землетрясения на пятом участке;

R_i–расстояние от i-ого сейсмодатчика до i-ого очага землетрясения.

Для расчета средневзвешенной скорости были рассмотрены 6 различных случаев распределения скоростей сейсмических волн на местности:

– изменение скоростей сейсмических волн происходит дискретно в шахматном порядке (2.4 и 4.4 км/с). При этом были внесены случайные изменения скорости для каждой ячейки в пределах от -1 до 1 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2а.

– скорости сейсмических волн убывают от центра к краям дискретно со скоростями 4.4, 3.4 и 2.4 км/с.Для каждой ячейки вводятся случайные изменения скоростей в пределах от -0.5 до 0.5 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2б.

– скорости сейсмических волн возрастают слева направо с дискретно 2.4, 2.9, 3.4, 3.9 и 4.4 км/с. В каждой ячейке к скоростям добавляются случайные изменения в пределах от -0.25 до 0.25 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2в.

– скорости сейсмических волн чередуются по горизонтали дискретно 2.4 и 4.4 км/с, к которым в каждой ячейке добавляются случайные изменения в пределах от -1 до 1 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис.2г.

– скорости сейсмических волн распределены по диагонали с возрастанием с дискретным изменением скоростей 2.4, 2.65, 2.9, 3.15, 3.4, 3.65, 3.9, 4.15 и 4.4 км/с. к которым в каждой ячейке, добавляются случайные изменения в пределах -0.125 до 0.125 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2д.

– скорости сейсмических волн распределены случайным образом для всех участков земной коры. При этом скорости для каждой ячейки изменялись в пределах от 2.4 до 4.4 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2е.

Для построения графиков было проведено 500 машинных экспериментов.

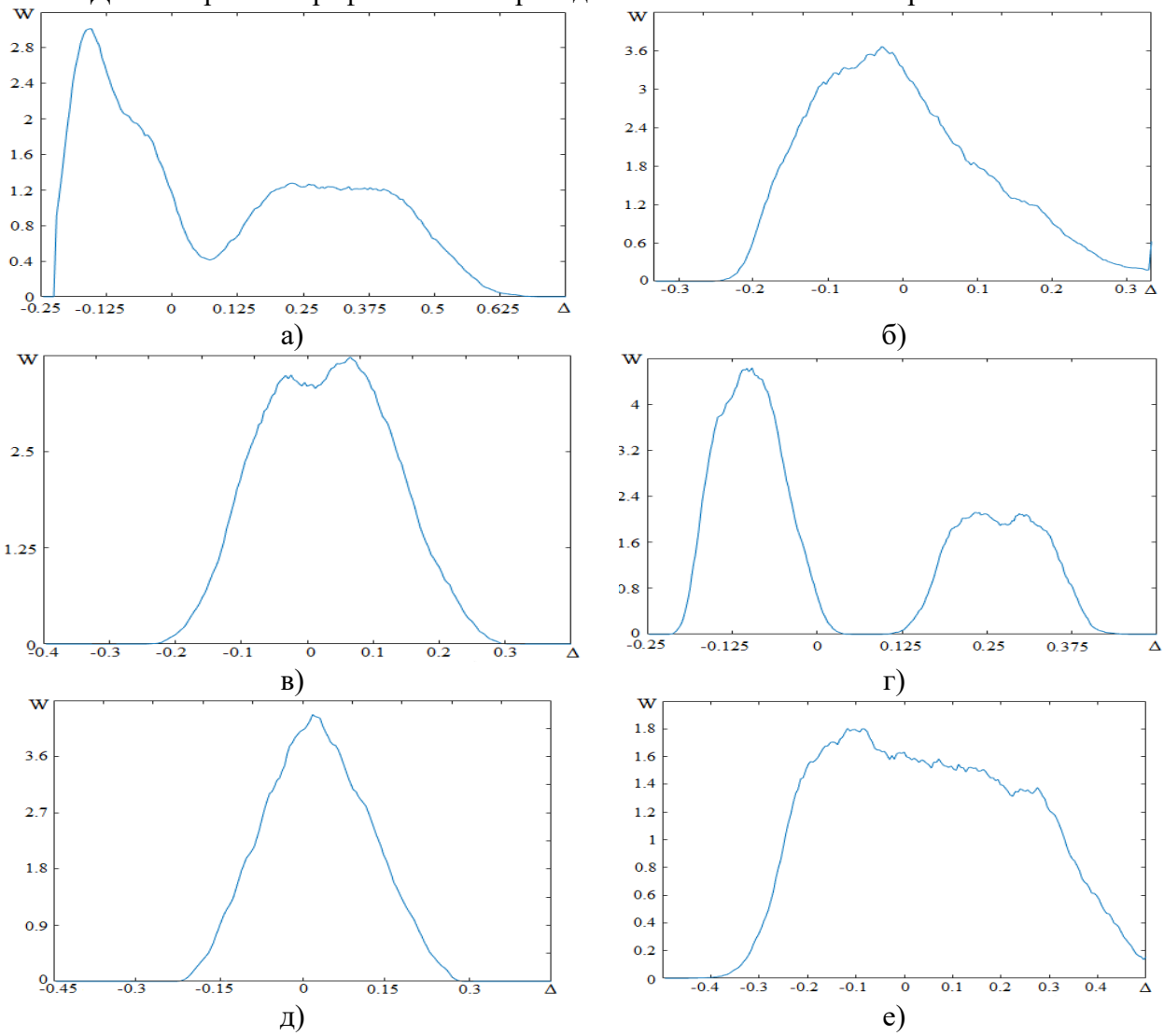

Рис. 2. Плотность распределения ошибок при различных способах изменения скоростей сейсмических волн

Fig.2. Density of distribution of errors for different ways of changing the velocities of seismic waves

На рис.2, по оси абсцисс приведены проценты в форме десятичных дробей.

Определение структуры земли матричным методом

Для решения задачи матричным методом необходимо вуравнении (1) во все комбинации размещения сейсмодатчиков и очагов землетрясений ввести случайные изменения их координат. Это вызвано необходимсть избежать вырождение матрицы при ее решении. После внесения изменений уравнения (1) примут вид:

$$X_o = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS} + Xr_n; X_s = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS} + Xr_n;$$
$$Y_o = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS} + Yr_n; Y_s = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS} + Yr_n, \quad (6),$$

где Xr_n и Yr_n – случайные смещения по оси абсцисс и ординат от заданного положения.

Определим отрезки и время пробега сейсмической волны от сейсмодатчика до очага землетрясения для каждого участка земной коры.

Структуру земной коры по [10] предлагалось определить следующим образом (рис.3).

Здесь S_1 и S_2 – сейсмодатчики, O_1 и O_2 – очаги двух произошедших землетрясений, пунктирной линией представлено разделение среды на 4 части для которых и будут определены скорости сейсмических волн.

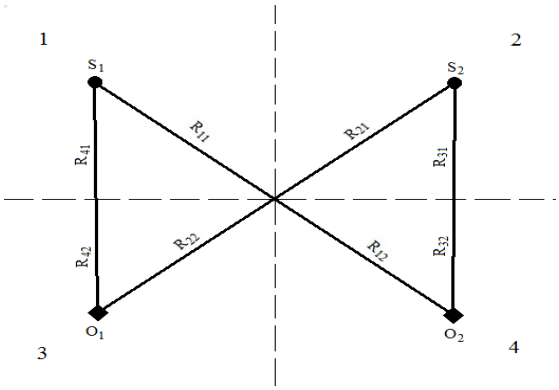

Рис.3. Схематичное представление распространение волн в среде
Fig. 3. Schematic representation of wave propagation in a medium

Пунктирные линии делят каждое направление пробега сейсмической волны на две части. В соответствии с известными расстояниями пробега сейсмических волн, составим систему уравнений:

$$\begin{cases} t_1 = t_{11} + t_{12} \\ t_2 = t_{21} + t_{22} \\ t_3 = t_{31} + t_{32} \\ t_4 = t_{41} + t_{42} \end{cases} \quad (7),$$

где $t_{ij} = R_{ij}/V_k$, t_i – время пробега сейсмической волны по i-му направлению, V_k – скорость сейсмической волны для данного участка.

Заменим в системе уравнений (7) t_{ij} на R_{ij}/V_k

$$\begin{cases} t_1 = R_{11}/V_1 + R_{12}/V_4 \\ t_2 = R_{21}/V_2 + R_{22}/V_3 \\ t_3 = R_{31}/V_2 + R_{32}/V_4 \\ t_4 = R_{41}/V_1 + R_{42}/V_3 \end{cases} \quad (8),$$

В результате получим систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными, решив которую, можно определить скорости сейсмических волн для четырех сред.

$$\begin{cases} V_1 = R_{11}/(t_1 - R_{12}/V_4) \\ V_2 = R_{21}/(t_2 - R_{22}/V_3) \\ V_4 = \dfrac{R_{21}R_{32}}{R_{21}t_3 - R_{31}t_2 - R_{22}R_{31}/V_3} \\ V_3 = \dfrac{R_{12}R_{41}R_{22}R_{31} + R_{42}R_{21}R_{32}R_{11}}{t_4R_{21}R_{32}R_{11} - t_1R_{21}R_{32}R_{11} + t_3R_{41}R_{12}R_{21} - t_2R_{31}R_{41}R_{12}} \end{cases} \quad (9),$$

Этим же способом можно решить задачу и для большего числа произошедших землетрясений, и сейсмодатчиков. Но определение структуры земли по двум сейсмодатчикам и двум очагам землетрясений достаточно простая задача. Если число сейсмодатчиков и/или гипоцентров землетрясений увеличить, то не понятно каким образом нужно делить земную кору на участки с одинаковой структурой. Решение такой задачи возможно методом проб и ошибок, что, на практике, не приемлемо для ее решения в автоматическом режиме.

На рис. 4 приведено схематичное представление распространение сейсмических волн для трех сейсмодатчиков и трех гипоцентров землетрясений.

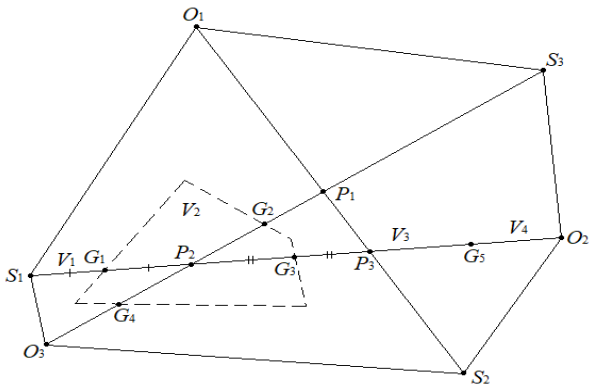

Рис.4. Схематичное представление распространение волн в среде с тремя сейсмодатчиками и тремя гипоцентрами землетрясений

Fig.4. Schematic representation of wave propagation in a medium with three seismic sensors and three earthquake hypocenters

Здесь требуется иной подход к определению структуры земной коры, основанный на том, что в точках (узлах) пересечения различных трасспробегов сейсмических волн к сейсмодатчикам (точки S_1, S_2, S_3, O_1, O_2, O_3, P_1, P_2, P_3) скорости одинаковые.

При этом, область с одинаковой скоростью, например, для точки P_2 можно получить, разделив на две равные части отрезки S_1P_2, O_3P_2, P_2P_1 и P_2P_3.

С учетом сказанного можно составить систему уравнений по аналогии с системой уравнений (8). Так для отрезка S_1O_2 уравнение будет иметь вид:

$$t_1 = \frac{S_1G_1}{V_1} + \frac{G_1G_3}{V_2} + \frac{G_3G_5}{V_3} + \frac{G_5O_2}{V_4} \quad (10),$$

В приведенном примере в системе 9 уравнений, и 9 неизвестных переменных, но если добавить хотя бы еще один сейсмодатчик, либо очаг землетрясения, то получим 12 уравнений для 15 неизвестных.

На рис. 5 приведено схематичное представление распространение волн в среде с тремя сейсмодатчиками и тремя гипоцентрами землетрясений. Для сокращения числа неизвестных упростим систему уравнений исходя из допущения, что при малых расстояниях между узлами скорости на этих узлах одинаковы. Так для приведенного примера узлами с одинаковыми скоростями будут точки P_7 и P_8, P_2 и P_7, P_4 и P_6, P_8 и P_3.

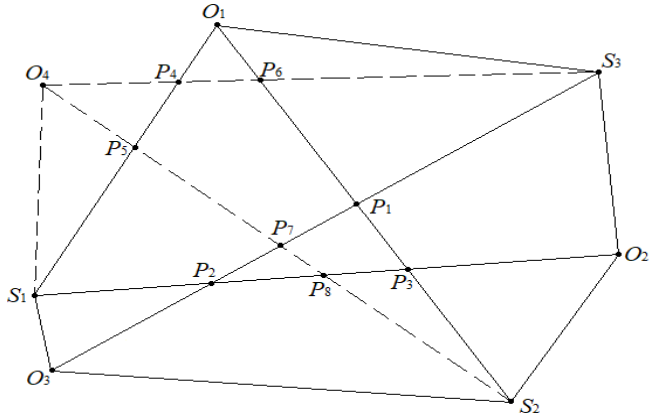

Рис. 5. Схематичное представление распространение волн в среде с тремя сейсмодатчиками и четырьмя гипоцентрами землетрясений
Fig.5. Schematic representation of wave propagation in a medium with three seismic sensors and four earthquake hypocenters

По полученной системе уравнений матричным методом была рассчитана плотность распределения ошибок при изменении скоростей сейсмических волн в шахматном порядке (рис. 6). Выбор такого порядка изменения скоростей при расчете обусловлен тем, что по методу средневзвешенного для такого чередования скоростей получаются наихудшие результаты.

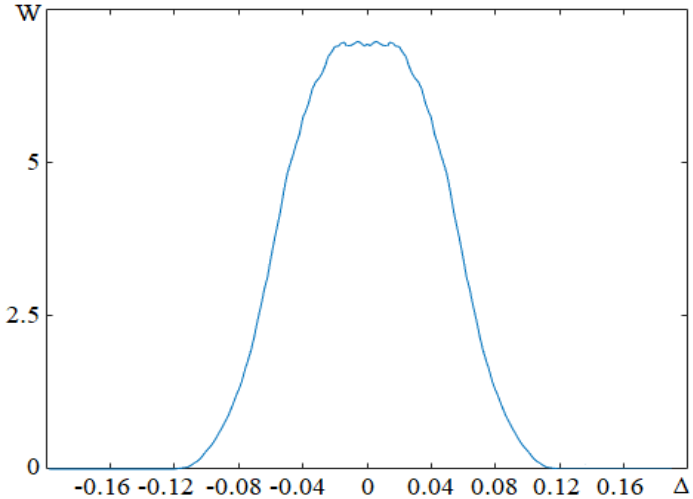

Рис.6. Плотность распределения ошибок при использовании матричного метода
Fig.6. Density of distribution of errors when using the matrix method

Можно заметить, что точность определения скоростей сейсмических волн по матричному методу даже при шахматном распределении скоростей дает лучшие результаты, чем метод средневзвешенного**.**

Так как в реальных условиях координаты гипоцентра землетрясения и скорости сейсмических волн вычисляются с погрешностями, то решать данную систему уравнений необходимо в следующей последовательности:

1. Путем упрощения сократить число неизвестных, с тем, чтобы их число было меньше числа уравнений в системе.

2. Путем исключения неизвестных подстановки одного уравнения в другое, сократить число неизвестных до 3;

3. Найти наименьшее расхождение по равенствам в уравнениях методом перебора трех значений неизвестных.

Обсуждение результатов. По произведенным расчетам структуры земной коры, для случая, когда скорости сейсмических волн чередовались в шахматном порядке (наихудший вариант для выполнения расчетов), максимальная ошибка измерения скоростей сейсмических волн по всем участкам составила 0,45 км/с.

При этом отклонения скоростей сейсмических волн для каждого участка по сравнению с другими отличались до второго знака после запятой.

Ошибка в 0,45 км/с обусловлена тем, что при расчете число неизвестных в системе линейных алгебраических уравнений было больше, чем самих уравнений. Для их уменьшения ближайшие точки пересечения трасс сейсмических волн по скоростям приравнивались друг другу. Это приводило к тому, что одна точка пересечения трасс могла находиться на одном участке, а другая точка на другом участке, что в конечном участке и привело как к ошибке вычислений, так и их симметричности.

Применение метода итераций для определения координат гипоцентра землетрясения и скоростей сейсмических волн, позволит значительно улучшить точность определения обоих показателей. Наличие расчетных скоростей сейсмических волн для различных участков земной коры позволяют использовать для определения координат очага землетрясения фигуру второго порядка – гиперболоид.

Вывод. Метод средневзвешенного следует применять, когда на местности скорости сейсмических волн распределены с убыванием от центра по краям (к примеру, одинокая гора), либо имеется равномерное увеличение плотности пород и т.д. (рис. 2б, 2в, 2д).

Использование матричного метода ограничено тем, что определитель матрицы в некоторых случаях может быть равным нулю, в таких случаях задачу нужно решать численными методами.

Среднее время решения задачи методом средневзвешенного, когда исследуемая область разбита на 25 участков и в каждом из участков гипоцентр землетрясения и сейсмодатчика могут находиться в одной из 9 позиций, составляет около 10 секунд, а для матричного метода около 19 часов.

Библиографический список:

1. Бляс Э. А., Середа А.-В. И. Определение коэффициентов отражения продольных и поперечных волн по сейсмограммам продольных волн // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9. № 3. С. 389-402.
2. Етирмишли Г. Д., Казымова С. Э., Казымов И. Э. Изучение изменения скоростей продольных волн с глубиной по цифровым сейсмологическим данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы III Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 54-57.
3. Асланов Г. К., Даниялов М. Г., Асланов Т. Г., Магомедов Х. Д. Об одном методе определения очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Труды Института геологии ДНЦ РАН. 2010. № 56. С. 54-59.
4. Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г., Тетакаев У.Р. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур четвертого и второго порядка – овала Кассини и гиперболы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4):134-142. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142
5. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):118-125. doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125
6. Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Анализ плотности распределения ошибок в определении координат очага землетрясения по методам сфер и эллипсоидов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(2):61-70. //doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70
7. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Исследование зависимости ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперболоидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):87-98. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98
8. Асланов Т.Г., Шахтарин Б.И., Асланов Г.К. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка - эллипса и гиперболы // Автоматизация. Современные технологии. 2018; №11 (72) – С. 503-509
9. Тагиров Х. Ю., Асланов Т. Г., Магомедов Х. Д. Определение средневзвешенной скорости сейсмической волны на участках Земли по пути ее распространения // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. 2017. Т. 11. № 3. С. 108-114.
10. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Тагиров Х. Ю. Определение структурыземли по сейсмограммам произошедших землетрясений // Информационные технологии в экономике и управлении: материалы Всероссийской научно-практической конференции, 19-20 ноября 2014 г. Махачкала: ДГТУ, 2014. С. 242-246
11. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning/ S. D'Amico – InTech. JanezaTrdine, 2012. 460 p.
12. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3
13. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. 154 p.
14. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. 272 p.

15. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. 298 p.
16. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии: учебное пособие / Т.Б. Яновская. Санкт-Петербург, 2008. 222 с
17. Шахриманьян М.А., Нигметов Г.М., Сосунов И.В. Математическое моделирование как способ поддержки принятия решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций // Каталог «Пожарная безопасность» 2003. С. 240-241.
18. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.
19. Конев В.В. Линейная алгебра. Учебное пособие. Томск. Изд. ТПУ. 2008. 65 стр.
20. Аналитическая геометрия и линейная алгебра: учеб.пособие / А. Е. Умнов. 3-е изд., испр. и доп. М. : МФТИ, 2011. 544 с. ISBN 978-5-7417-0378

References:

1. Blyas E. A., Sereda A.-V. I. Opredeleniye koeffitsiyentov otrazheniya prodol'nykh i poperechnykh voln po seysmogrammam prodol'nykh voln // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. T. 9. № 3. C. 389-402. [Blias E. A., Sereda A. V. I. Determination of P-and S-wave reflection coefficients from P-wave seismograms // Bulletin of the Murmansk State Technical University. 2006. T. 9.No. 3. pp. 389-402. (In Russ)]
2. Yetirmishli G. D., Kazymova S. E., Kazymov I. E. Izucheniye izmeneniya skorostey prodol'nykh voln s glubinoy po tsifrovym seysmologicheskim dannym // Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy III Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly. Obninsk: GS RAN, 2008. C. 54-57. [Yetirmishli GD, Kazymova SE, Kazymov IE Study of changes in the velocities of longitudinal waves with depth from digital seismological data // Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the III International Seismological School. Obninsk: GS RAN, 2008. pp. 54-57. (In Russ)]
3. Aslanov G. K., Daniyalov M. G., Aslanov T. G., Magomedov KH. D. Ob odnom metode opredeleniya ochaga zemletryaseniya s odnovremennym opredeleniyem skorostey seysmicheskikh voln // Trudy Instituta geologii DNTS RAN. 2010. № 56. C. 54-59. [Aslanov GK, Daniyalov MG, Aslanov TG, Magomedov Kh.D. On one method for determining the source of an earthquake with simultaneous determination of the velocities of seismic waves // Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010. No. 56. pp. 54-59. (In Russ)]
4. Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakayev U.R. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur chetvertogo i vtorogo poryadka – ovala Kassini i giperboly. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2019;46(4):134-142. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142 [Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2019; 46 (4): 134-142. doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142(In Russ)]
5. Aslanov T.G. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem kombinirovannogo metoda. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2017;44(2):118-125. doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125 [Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source using the combined method. Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (2): 118-125. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125(In Russ)]
6. Aslanov T.G., Musayeva U.A. Analiz plotnosti raspredeleniya oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya po metodam sfer i ellipsoidov. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2019;46(2):61-70. //doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70 [Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analysis of the distribution density of errors in determining the coordinates of the earthquake source by the methods of spheres and ellipsoids. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2019; 46 (2): 61-70. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70(In Russ)]
7. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Issledovaniye zavisimosti oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya ot metodov rascheta (sfer i giperboloidov). Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2017;44(4):87-98. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98 [Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Study of the dependence of errors in determining the coordinates of an earthquake source on calculation methods (spheres and hyperboloids). Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (4): 87-98. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98(In Russ)]
8. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur vtorogo poryadka - ellipsa i giperboly // Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii. 2018; №11 (72) – S. 503-509 [Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the second order - ellipse and hyperbola // Automation. Modern technologies. 2018; No. 11 (72) - P. 503-509(In Russ)]
9. Tagirov KH. YU., Aslanov T. G., Magomedov KH. D. Opredeleniye srednevzveshennoy skorosti seysmicheskoy volny na uchastkakh Zemli po puti yeye rasprostraneniya // Izvestiya DGPU. Yestestvennyye i tochnyye nauki. 2017. T. 11. № 3. S. 108-114. [Tagirov Kh. Yu., Aslanov TG, Magomedov Kh. D. Determination of the weighted average velocity of a seismic wave in the areas of the Earth along the path of its propagation. Izvestiya DGPU. Natural and exact sciences. 2017.Vol. 11.No. 3.P. 108-114. (In Russ)]
10. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Tagirov KH. YU. Opredeleniye strukturyzemli po seysmogrammam proizoshedshikh zemletryaseniy // Informatsionnyye tekhnologii v ekonomike i upravlenii: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 19 20 noyabrya 2014 g. Makhachkala: DGTU, 2014. S. 242-246 [Aslanov G.K., Aslanov T.G., Tagirov Kh. Yu. Determination of the structure of the earth from seismograms of the occurred earthquakes // Information technologies in economics and management: materials of the All-Russian scientific-practical conference, 19-20 November 2014 Makhachkala: DSTU, 2014. pp. 242-246 (In Russ)]
11. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning / S. D'Amico - InTech. JanezaTrdine, 2012 . 460 p.
12. Robert Garotta. Shear waves: from registration to interpretation. Short course of lectures for higher educational institutions, 2000 Series No. 3
13. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster - University of Utah, 2007 . 154 p.

14. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara - Cambridge University Press, 1981. 272 p.
15. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett - Australian National University Press, 2009 . 298 p.
16. Yanovskaya T.B. Osnovy seysmologii: uchebnoye posobiye / T.B. Yanovskaya. Sankt-Peterburg, 2008. 222 s [Yanovskaya T.B. Fundamentals of seismology: textbook / T.B. Yanovskaya. St. Petersburg, 2008 . 222 p.
17. Shakhriman'yan M.A., Nigmetov G.M., Sosunov I.V. Matematicheskoye modelirovaniye kak sposob podderzhki prinyatiya resheniy v sluchaye vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy // Katalog «Pozharnaya bezopasnost'» 2003. S. 240-241. [Shakhrimanyan M.A., Nigmetov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a way to support decision-making in the event of emergencies // Catalog "Fire safety" 2003. pp. 240-241. (In Russ)]
18. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013.300 p.
19. Konev V.V. Lineynaya algebra. Uchebnoye posobiye. Tomsk. Izd. TPU. 2008. 65 str. [Konev V.V. Linear algebra. Tutorial. Tomsk. Ed. TPU. 2008. 65 p. (In Russ)]
20. Analiticheskaya geometriya i lineynaya algebra: ucheb.posobiye / A. E. Umnov. 3-ye izd., ispr. i dop. M. : MFTI, 2011. – 544 s. ISBN 978-5-7417-0378 [Analytical geometry and linear algebra: textbook / A. E. Umnov. 3rd ed., Rev. and add. M.: MFTI, 2011. 544 p. ISBN 978-5-7417-0378(In Russ)]

Сведения об авторах:

Шахтарин Борис Ильич, доктор технических наук, профессор, кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» e-mail: shakhtarin@mail.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах и вычислительной техники, e-mail: Tabasik@gmail.com

Магомедов Хаскил Джарулаевич, директор, e-mail: info@dbgsras.ru

Тагиров Халипа Юсупович, генеральный директор, e-mail: halipa92@yandex.ru

Information about authors:

Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci., (Technical), Prof., Department of "Autonomous Information and Control Systems" e-mail: shakhtarin@mail.ru

Tagirbek G. Aslanov, Cand. Sci., (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering, e-mail: Tabasik@gmail.com

Khaskil D. Magomedov, Director, e-mail: info@dbgsras.ru

Halipa Yu. Tagirov, General Director, e-mail: halipa92@yandex.ru

Конфликт интересов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Поступила в редакцию 05.11.2020.
Принята в печать 28.11.2020.

Conflict of interest.
The authors declare no conflict of interest.
Received 05.11.2020.
Accepted for publication 28.11.2020.