Науки о Земле / Earth Science Оригинальная статья / Original Article УДК 550. 34. 01

# Определение средневзвешенной скорости сейсмической волны на участках Земли по пути ее распространения

© 2017 Тагиров Х. Ю. 1, Асланов Т. Г. 1, Магомедов Х. Д. 2

<sup>1</sup> Северо-Кавказский институт (филиал),

Всероссийский государственный университет юстиции

(Российская правовая академия Министерства юстиции Российской Федерации), Махачкала, Россия; e-mail: halipa92@yandex.ru; tabasik@gmail.com

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр

«Единая геофизическая служба Российской академии наук",

Дагестанский филиал,

Махачкала, Россия; e-mail: haskil@dbgsras.ru

**РЕЗЮМЕ. Цель.** Рассматривается возможность определения структуры Земли по сейсмограммам произошедших землетрясений. **Методы.** Используются данные по множеству произошедших землетрясений. Известно, что скорости сейсмических волн зависят от структуры участков Земли, по которым они распространяются. Ставится задача определения скоростей сейсмических волн по пути их распространения. Для этого на сейсмодатчиках производится расчет скоростей сейсмических волн в точках пересечений их путей. **Результаты.** Получена статистическая зависимость точности вычисления скоростей сейсмических волн от числа использованных пар сейсмодатчиков с гипоцентрами землетрясений. **Выводы.** Предложенный метод позволит без дополнительных материальных и временных затрат математической обработкой данных прошедших землетрясений определить структуру Земли. Кроме того, наличие изменений скоростей сейсмических волн на путях их распространения позволит более точно найти координаты гипоцентров последующих землетрясений.

**Ключевые слова:** землетрясение, сейсмодатчик, ошибка, скорость, сейсмическая волна, структура Земли.

Формат цитирования: Тагиров Х. Ю., Асланов Т. Г., Магомедов Х. Д. Определение средневзвешенной скорости сейсмической волны на участках Земли по пути ее распространения // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2017. Т. 11. № 3. С. 108-114.

## The Determination of Weighted Average Speed of a Seismic Wave in the Path of its Spread

© 2017 Khalipa Yu. Tagirov 1, Tagirbek G. Aslanov 1, Khaskil D. Magomedov 2

<sup>1</sup> North-Caucasian Institute (branch),

All-Russian State University of Justice

(Russian Law Academy of the Ministry of Justice of the Russian Federation), Makhachkala, Russia; e-mail: halipa92@yandex.ru, tabasik@gmail.com

<sup>2</sup> Federal Research Center

"Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences",

The Dagestan branch,

Makhachkala, Russia; e-mail: haskil@dbgsras.ru

ABSTRACT. Aim. The possibility of determining the structure of the Earth by occurred earthquakes seismograms is considered. Methods. Data on the set of occurred earthquakes are used. It is known that the

velocities of seismic waves depend on the structure of the Earth they spread over. For this purpose, the seismic sensors are used in calculation of seismic wave velocities in the points of intersection of their ways. **Results.** The authors have obtained a statistical dependence of the accuracy of calculation of seismic wave velocities from the number of used seismic sensors with earthquake's hypocenters. **Conclusions.** The proposed method will allow without additional material and time costs to determine the structure of the Earth by mathematical processing of the occurred earthquakes data. In addition, the presence of changes in the velocities of seismic waves along the paths of their propagation will allow to determine the coordinates of the hypocenters of subsequent earthquakes more accurately.

Keywords: earthquake, seismic sensor, error, speed, seismic wave, structure of the Earth.

**For citation:** Tagirov Kh. Yu., Aslanov T. G., Magomedov Kh. D. The Determination of Weighted Average Speed of a Seismic Wave in the Path of its Spread. Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences. 2017. Vol. 11. No. 3. Pp. 108-114. (In Russian).

#### Ввеление

В настоящее время Всероссийским научно-исследовательским институтом по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям (ВНИИ ГОЧС) МЧС России разработана программа, позволяющая по магнитуде землетрясения, глубине его очага, плотности населения в районе землетрясения, типам застроек, времени суток и т. д. оценить людские потери, что позволяет оперативно решить вопрос о количестве привлекаемых к спасательным работам людских, материальных и технических ресурсов. Однако оценки потерь иногда не соответствуют действительности, в основном из-за неверного определения глубины очага землетрясения. Например, Иранское землетрясение 2003 года [4] (с эпицентром в районе г. Бам) Федеральным центром науки и высоких технологий ВНИИ ГОЧС МЧС России было расценено как землетрясение без потерь, хотя они были. Ошибка возникла в связи с тем, что геофизическими службами Ирана глубина очага была определена неверно (сначала считалось, что глубина равна 33,00 км, а в последующем – 15,13 км). После корректировки значения глубины очага землетрясения в исходных данных в программе расчетные потери были оценены в количестве 30000 человек. В то же время только на второй день по сообщениям официальных иранских властей потери составили около 2000 человек, на третий день говорилось о 20000 человек, и только почти через месяц, 21.01.2004, было установлено, что гражданские потери равны 35000 человек [5].

#### Постановка задачи

В настоящее время расчет координат очага землетрясения производится с использованием усредненных значений скоростей сейсмических волн [2]. Причем это значение применяется для больших участков Земли [3].

В связи с этим были разработаны методы, позволяющие вычислить средние скорости волн по отдельным направлениям [1]. В то же время по пути своего распространения волны проходят различные породы, а, как известно, скорости распространения волн в различных средах могут отличаться друг от друга. Игнорирование этого обстоятельства приводит к значительным ошибкам в определении координат очага землетрясения.

#### Методы исследования

Рисунок 1 поясняет методику определения скоростей сейсмических волн.

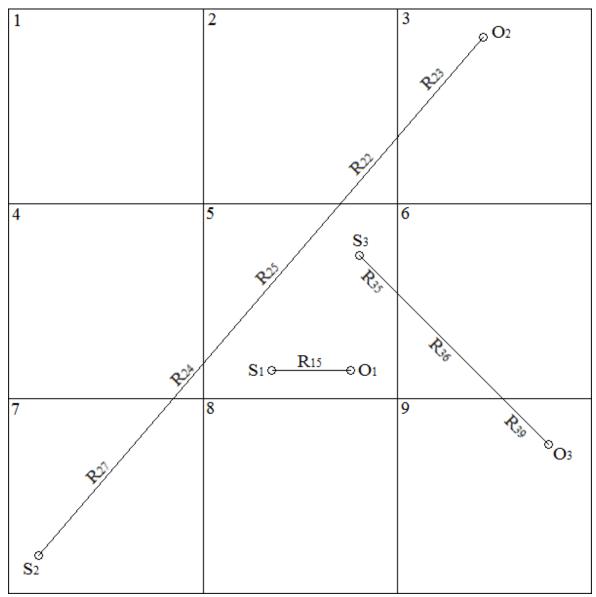


Рис. 1. Пояснение к методу определения скоростей сейсмических волн

Как видно из рисунка, поверхность Земли разбита на девять участков, для которых необходимо найти значения скоростей. На поверхности Земли расположены сейсмодатчики  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ . Гипоцентры землетрясений обозначены буквами  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ .

Изначально для оценки адекватности модели были заданы случайные значения скоростей сейсмических волн для каждого из девяти участков. При этом были введены области с более твердой структурой, а значит, с более высокими скоростями распространения волн. Ставилась задача определить значения искомых скоростей расчетным путем.

Отрезки, образующиеся при пересечении сейсмическими волнами границ заданных участков на пути распространения сейсми-

ческой волны от очага землетрясения к сейсмодатчикам, обозначены через  $R_{ij}$ , где i — номер, обозначающий один из путей распространения сейсмической волны, а j — номер участка, через который данная волна проходит.

Очевидны два факта:

- 1) чем больший путь сейсмическая волна пройдет через тот или иной участок, тем больше ее влияние на среднюю скорость сейсмической волны. Например, влияние на среднюю скорость отрезка пути  $R_{25}$  больше, чем отрезка  $R_{24}$ ;
- 2) чем больше расстояние от очага до сейсмодатчика, тем меньше точность определения скорости сейсмической волны для конкретного участка. Например, если волна, распространяющаяся по пути  $R_2$  от очага  $O_2$

до сейсмодатчика  $S_2$ , пересекла пять участков, то волна, распространяющаяся по пути  $R_1$ , — всего один участок ввиду малости участка распространения.

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

$$V_{u5} = \frac{V_1 R_{15}/R_1 + V_2 R_{25}/R_2 + V_3 R_{35}/R_3}{R_{15}/R_1 + R_{25}/R_2 + R_{35}/R_3}, \quad (1)$$

где  $V_i$  — средняя скорость сейсмической волны от сейсмодатчика  $S_i$  до очага землетрясения  $O_i$ ;  $V_{u5}$  — скорость сейсмической волны на пятом участке.

Для проверки предложенного метода был задан участок размером 300 на 300 км, разделенный на 25 подучастков размером 60 на 60 км со следующими скоростями:

$$\begin{split} V_{1,1} &= 5,3; \ V_{1,2} = 4,9; \ V_{1,3} = 4,7; \ V_{1,4} = 4,3; \\ V_{1,5} &= 4,5; \\ V_{2,1} &= 5,5; \ V_{2,2} = 6,7; \ V_{2,3} = 6,3; \ V_{2,4} = 6,1; \\ V_{2,5} &= 4,1; \\ V_{3,1} &= 5,5; \ V_{3,2} = 6,7; \ V_{3,3} = 8,0; \ V_{3,4} = 6,5; \\ V_{3,5} &= 4,9; \\ V_{4,1} &= 5,3; \ V_{4,2} = 6,7; \ V_{4,3} = 6,7; \ V_{4,4} = 6,5; \\ V_{4,5} &= 4,9; \\ V_{5,1} &= 5,3; \ V_{5,2} = 5,3; \ V_{5,3} = 5,5; \ V_{5,4} = 5,5; \\ V_{5,5} &= 5,1. \end{split}$$

Принято, что скорости, как случайные величины, имеют нормальное распределение, при этом в модель введено воздействие шума. Использование нормального распределения позволяет имитировать расположение в центре участка плотных пород, а по краям — менее плотных.

Определение расчетных скоростей по выражению (1) осуществлялось для разных точек расположений сейсмодатчиков и гипоцентров землетрясений. Изменение координат очага землетрясения и сейсмодатчиков производилось с шагом 15 км.

#### Результаты исследований

На рисунке 2 приведены относительные ошибки в определении скоростей сейсмических волн для всех 25 участков. Расчеты были сделаны для случая с двумя прямыми, представляющими собой траекторию распространения сейсмической волны от очагов землетрясения к сейсмодатчикам.

Как видно из распределения ошибок, данный метод позволяет довольно точно определять скорости сейсмических волн. Так, если взять интервал ошибок на уровне 0,7 (без учета всплеска), то ошибка в вычислении скоростей сейсмических волн составляет 2,5 %.

Для выяснения динамики изменения точности в определении скоростей сейсмических волн при большем количестве одновременно задействованных сейсмодатчиков и гипоцентров землетрясений было использовано от 2 до 6 пар сейсмодатчиков с гипоцентрами.

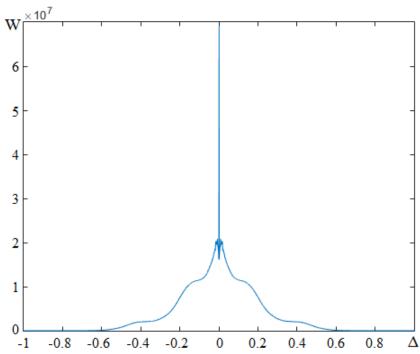
На рисунке 3 приведена кривая, аппроксимирующая динамику изменения точности в определении скоростей сейсмических волн. Точками на графике обозначены усредненные значения погрешностей в вычислении скоростей для всех участков при использовании в расчете от 2 до 6 пар сейсмодатчиков.

С помощью программного комплекса MatLab была определена наиболее подходящая для описания распределения ошибки аппроксимирующая функция, которая имеет вид:

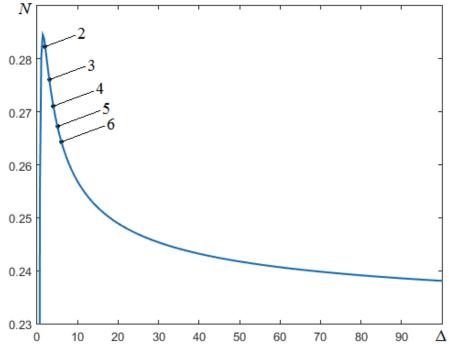
$$\Delta = \left(22.92 - \frac{3.804}{N^2} + \frac{8.85}{\sqrt{N}}\right) 10^{-2}.$$
 (2)

Для этой аппроксимирующей функции величина среднеквадратического отклонения равна 3,462e-11, а скорректированный коэффициент детерминации – 1.

Как видно из рисунка 3, наиболее оптимальным является использование не более 10 пар сейсмодатчиков, так как при этом точность определения скорости сейсмической волны меняется мало, но при этом время расчета скорости увеличивается в несколько раз.



Puc. 2. Распределение ошибок в определении скоростей сейсмических волн



Puc. 3. Распределение ошибок измерения скоростей сейсмических волн в зависимости от количества используемых пар сейсмодатчиков с гипоцентрами землетрясений

#### Заключение

Использование более 10 отрезков, в концах которых расположены сейсмодатчики и гипоцентры землетрясений, проходящих через один исследуемый участок земли, нецелесообразно, так как точность определения скорости сейсмической волны снижает-

ся, а время расчета усредненной скорости через все участки при этом занимает больше машинного времени.

К примеру, усредненная скорость для 25 участков с 6 отрезками, в концах которых расположены сейсмодатчики и гипоцентры землетрясений на каждом участке,

в различных итерациях рассчитывалась в течение 6,5 дней на ЭВМ с процессором с тактовой частотой 3,6 ГГц, с распараллеливанием расчетов на все 4 ядра процессора.

Точность расчета усредненной скорости по предложенному методу и со средним арифметическим скоростей для всех участков показывает, что приведенный метод почти в два раза точнее, чем использование среднего арифметического.

На рисунке 3 усредненные значения погрешностей в расчете скоростей для всех

участков при количестве пар сейсмодатчиков и очагов землетрясения, стремящихся к бесконечности, равны 0,23.

По результатам исследований были получены значения средневзвешенных скоростей на различных участках поверхности земли с определенной точностью. Эти данные позволяют сделать вывод о структуре изучаемых участков, так как скорости распространения сейсмических волн в различных средах являются известными.

#### Литература

- 1. 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.
- 2. 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.
- **3.** 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.
- **4.** Каррыев Б. С. Вот пришло землетрясение. Гипотезы, факты, причины и последствия. М.: SIBIS, 2009. **410** с.
- **5.** Рогожин Е. А. Землетрясение в Иране [Электронный ресурс] // География. Электронный журнал. 2004. № 5. Режим доступа: http://geo.1september.ru/article.php?ID=20040 0503 [дата обращения: 08.01.2017 г.]

#### References

- **1.** Aslanov G. K., Daniyalov M. G., Aslanov T. G., Magomedov Kh. D. On one method of determine earthquake focus with simultaneous measurements of the velocity of seismic waves. *Trudy Instituta geologii DNC RAN* [Proceedings of Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center, RAS]. 2010. No. 56. Pp. 54-59. (In Russian)
- **2.** Blyas E. A., Sereda A.-V. I. Determination of the reflection coefficients of longitudinal and transverse waves on the seismograms of longitudinal waves. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Murmansk State Technical University]. 2006. Vol. 9. No. 3. Pp. 389-402. (In Russian)
- **3.** Etirmishly G. D., Kazymova S. E., Kazymov I. E. The study of the longitudinal waves velocities change with depth from digital seismological data.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Тагиров Халипа Юсупович, начальник учебно-методического отдела, Северо-Кавказский институт (филиал), Всероссийский государственный университет юстиции (ВГУЮ), Российская правовая академия Министерства юстиции Российской Федерации (РПА Минюста РФ), Махачка-

- Sovremennye metody obrabotki i interpretacii seysmologicheskih dannyh. Materialy III Mezhdunarodnoy sejsmologicheskoy shkoly [Modern methods of processing and interpretation of seismic data. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Seismological School]. Obninsk, GS, RAS Publ., 2008. Pp. 54-57. (In Russian)
- **4.** Karryev B. S. Vot prishlo zemletryasenie. Gipotezy, fakty, prichiny i posledstviya [Earthquake comes. Hypotheses, facts, causes and consequences]. Moscow, SIBIS Publ., 2009. 410 p. (In Russian)
- **5.** Rogozhin E. A. The Earthquake in Iran [Electronic resource]. Geography. Electronic journal. 2004. No. 5. Mode of access: http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503 [accessed: 08.01.2017].

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS Affiliations

Khalipa Yu. Tagirov, the head of the Educational and Methodical Department, North-Caucasian Institute (branch), All-Russian State University of Justice (RSUJ), Russian Law Academy of the Ministry of Justice of the Russian Federation (RLA of the Ministry of Justice of the Russian Federation), Makhach-

ла, Россия; e-mail: halipa92@yandex.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, доцент, кафедра гуманитарных и социально-экономических дисциплин, заместитель директора по научной работе, Северо-Кавказский институт (филиал), ВГУЮ, РПА Минюста РФ, Махачкала, Россия; е-mail: tabasik@gmail.com

Магомедов Хаскил Джарулаевич, заместитель директора по науке, Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Дагестанский филиал, Махачкала, Россия; e-mail: haskil@dbgsras.ru

Принята в печать 22.06.2017 г.

kala, Russia; e-mail: halipa92@yandex.ru

Tagirbek G. Aslanov, Ph. D. (Technical Science), assistant professor, the chair of Humanitarian and Social-Economic Disciplines, deputy director for Science, North-Caucasian Institute (branch), RSUJ, RLA of the Ministry of Justice of the Russian Federation, Makhachkala, Russia; e-mail: tabasik@gmail.com

Haskil D. Magomedov, deputy director for Science, Federal Research Center "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences", Dagestan branch, Makhachkala, Russia; e-mail: haskil@dbgsras.ru

Received 22.06.2017.