

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-79-86

Оригинальная статья / Original Paper

**Определение координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением
скоростей сейсмических волн**
Ю.А. Сидоркина¹, Т.Г. Асланов²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

¹ 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

² 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скорости сейсмической волны. **Метод.** Исследование основано на использовании фигур четвертого и второго порядка – овала Кассини и гиперболы, фигур второго порядка – эллипса и гиперболы и комбинированных методов, которые позволяют при заданных скоростях сейсмических волн по данным трех сейсмических датчиков, определить координаты гипоцентра землетрясения. При этом скорости считаются априорно известными. По показаниям четвертого сейсмического датчика, и для заданных скоростей сейсмических волн определяется расстояние от четвертого сейсмического датчика до гипоцентра. Повторно, по координатам четвертого сейсмического датчика и координатам гипоцентра, вычисленным по трем сейсмическим датчикам, рассчитывается расстояние между ними. В случае несоответствия скоростей сейсмических волн истинным между двумя расчетными значениями расстояний от гипоцентра до четвертого сейсмического датчика появится невязка. Варьируя скорости сейсмических волн при расчете координат гипоцентра, добиваемся минимума невязки. **Результат.** Решена задача определения координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн. Получены плотности распределения ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения и скоростей сейсмических волн. **Вывод.** Предложенный метод позволяет увеличить точность определения координат очага землетрясения, а также уточнять значения скоростей сейсмических волн.

Ключевые слова: сейсморазведка, сейсмология, сейсмический датчик, сейсмическая волна, скорость, распределение ошибок

Для цитирования: Ю.А. Сидоркина, Т.Г. Асланов. Определение координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (1): 79-86. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-79-86

**Determining the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous
determination of seismic wave velocities**

Yu.A. Sidorkina¹, T.G. Aslanov²

¹N.E. Bauman Moscow State Technical University (National research University),

¹ 5/1 Second Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russia,

²Daghestan State Technical University,

² 70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to determine the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous determination of the seismic wave velocity. **Method.** The study is based on the use of figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola, figures of the second order - ellipse and hyperbola and combined methods that allow, at given seismic

wave velocities, according to three seismic sensors, to determine the coordinates of the earthquake hypocenter. In this case, the velocities are assumed to be known a priori. According to the readings of the fourth seismic sensor, and for given seismic wave velocities, the distance from the fourth seismic sensor to the hypocenter is determined. Again, according to the coordinates of the fourth seismic sensor and the hypocenter coordinates calculated from the three seismic sensors, the distance between them is calculated. If the seismic wave velocities do not correspond to the true ones, a discrepancy will appear between the two calculated values of the distances from the hypocenter to the fourth seismic sensor. By varying the velocities of seismic waves when calculating the coordinates of the hypocenter, we achieve a minimum discrepancy. **Result.** The problem of determining the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous determination of seismic wave velocities is solved. The error distribution densities in determining the coordinates of the earthquake hypocenter and seismic wave velocities are obtained. **Conclusion.** The proposed method makes it possible to increase the accuracy of determining the coordinates of the earthquake source, as well as to refine the values of seismic wave velocities.

For citation: Yu.A. Sidorkina, T.G. Aslanov. Determining the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous determination of seismic wave velocities. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 79-86. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-79-86

Введение. В настоящее время разработаны программы, позволяющие 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 и эпицентра землетрясения [1, 4].

Геофизическими службами при расчете координат очага землетрясения скорости сейсмических для больших участков земли считаются одинаковыми и заранее известными, что приводит к значительным ошибкам. В рамках работы были разработаны математические модели и алгоритмы для определения координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических [1-3].

Постановка задачи. Для нахождения координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн от очага землетрясения до сейсмических датчиков был использован метод сфер [5], а в качестве исходных данных рассматривались разности времен пробега поперечной и продольной сейсмических волн от гипоцентра землетрясения до сейсмических датчиков.

Первоначально, для заданных минимально допустимых скоростей сейсмических волн, по данным трех сейсмических датчиков, определяются координаты гипоцентра землетрясения. По показаниям четвертого сейсмического датчика, и для минимальных скоростей сейсмических волн определяется расстояние от четвертого сейсмического датчика до гипоцентра. Повторно, по координатам четвертого сейсмического датчика и координатам гипоцентра, вычисленным по трем сейсмическим датчикам, рассчитывается расстояние между ними. В случае несоответствия скоростей сейсмических волн истинным между двумя расчетными значениями расстояний от гипоцентра до четвертого сейсмического датчика появится невязка. Изменяя скорости сейсмических волн от заданных минимальных до максимальных значений, можно определить скорости сейсмических волны, при которых невязка является минимальной.

Методы исследования. Для моделирования процесса определения координат гипоцентра землетрясения была задана область с размерами 160x160x160 километров, которая была разбита на 15625 равных участка. Считается, что скорости распространения сейсмических волн в каждом из этих участков отличается. Были заданы координаты четырех сейсмических датчиков:

$$X_1 = 30; \quad X_2 = 120; \quad X_3 = 120; \quad X_4 = 30;$$

$$Y_1 = 30; Y_2 = 30; Y_3 = 120; Y_4 = 120,$$

и гипоцентра землетрясения: $X = 70; Y = 70; Z = 20$.

Зная координаты гипоцентра землетрясения и сейсмических датчиков, найдем пересечение сейсмической волны с границами участков с одинаковой скоростью. При помощи найденных точек пересечения определяем расстояние, которое сейсмическая волна проходит через участок с постоянной скоростью и время, прохождения сейсмической волны через нее.

Сумма всех расчетных интервалов времени и расстояние, которое от очага землетрясения до сейсмического датчика позволяют определить средние скорости пробега сейсмической волн от гипоцентра до сейсмического датчика.

Примем, что отношение скоростей поперечной и продольной сейсмических волн равно 1,7. Тогда разность времен пробега поперечной и продольной сейсмических волн от гипоцентра землетрясения к сейсмическим датчикам может быть вычислена по выражению [6-8]:

$$\Delta t_i = R_i / (2.4 V_{si})$$

где Δt_i – разность времен прихода продольной и поперечной сейсмической волны к i -ому сейсмическому датчику;

R_i – расстояние от очага землетрясения до i -ого сейсмического датчика;

V_{si} – средняя скорость распространения поперечной сейсмической волны от очага землетрясения к i -ому сейсмическому датчику.

Для трех сейсмических датчиков в соответствии с пространственной теоремой Пифагора можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} X^2 + Y^2 + Z^2 = R_1^2 \\ (X - X_{2*})^2 + (Y - Y_{2*})^2 + Z^2 = R_2^2 \\ (X - X_{3*})^2 + (Y - Y_{3*})^2 + Z^2 = R_3^2 \end{cases}$$

где $X_{2*} = X_2 - X_1$, $Y_{2*} = Y_2 - Y_1$, $X_{3*} = X_3 - X_1$, $Y_{3*} = Y_3 - Y_1$ – соответственно, координаты второго и третьего сейсмических датчиков на плоскости с первым сейсмическим датчиком в начале координат.

После некоторых преобразований систему уравнений можно записать в виде:

$$\begin{cases} X = \frac{Y_{3*}(R_2^2 - X_{2*}^2 - Y_{2*}^2) - Y_{2*}(R_3^2 - X_{3*}^2 - Y_{3*}^2) + R_1^2(Y_{2*} - Y_{3*})}{2(Y_{2*}X_{3*} - Y_{3*}X_{2*})} \\ Y = \frac{X_{3*}(R_2^2 - Y_{2*}^2 - X_{2*}^2) - X_{2*}(R_3^2 - Y_{3*}^2 - X_{3*}^2) + R_1^2(X_{2*} - X_{3*})}{2(X_{2*}Y_{3*} - X_{3*}Y_{2*})} \\ Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2} \end{cases} \quad (1)$$

где R_i могут быть вычислены по формуле:

$$R_i = \frac{\Delta t_i V_p V_s}{V_p - V_s}$$

где V_p и V_s – средние скорости продольной и поперечной сейсмических волн соответственно для всего сейсмоактивного региона.

С учетом принятого отношения продольной и поперечной сейсмических волн, получим:

$$R_i = 2.4 \Delta t_i V_s \quad (2)$$

При известных значениях скоростей продольных и поперечных сейсмических волн координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по выражениям (1) и (2). Однако, как отмечалось выше, для разных регионов, и даже в пределах региона по разным участкам и направлениям скорости волн отличаются друг от друга.

Поэтому, определение координат очага землетрясения нужно производить с одновременным определением скоростей сейсмических волн. При этом на скорости сейсмических волн накладываются ограничения. Для этого, сначала по выражениям (1) и (2), меняя скорость продольных волн от 2.3 до 4.4 км/с с шагом 0.01 определяем координаты очага землетрясения [9-14].

Следует отметить, что можно варьировать и отношение скоростей V_p/V_s . Однако в этом нет необходимости, так как это отношение даже между разными слоями земной коры меняется в пределах $\pm 3,7\%$ [15, 16]. При этом, для каждого значения поперечной скорости, для трех разностей времен прихода сейсмических волн мы будем иметь в пространстве единственную точку, которая с изменением скорости будет перемещаться в пространстве.

Для определения действительных значений скоростей сейсмических волн и глубины возьмем четвертый сейсмический датчик. Если рассчитанные по выражениям (1) и (2) скорости сейсмических волн и глубина не соответствуют истине, то расстояние от четвертого сейсмического датчика до очага землетрясения, найденная по формуле

$$R_4 = \sqrt{(X - X_{4*})^2 + (Y - Y_{4*})^2 + (Z - Z_4)^2} \quad (3)$$

не будет соответствовать расстоянию, вычисленному по формуле

$$R_4 = \frac{\Delta t_4 V_{p4} V_{s4}}{V_{p4} - V_{s4}} \quad (4)$$

При этом появится невязка, равная Δ_4 . И только при условии, когда скорости сейсмических волн будут соответствовать действительным, Δ_4 будет близко к нулю.

На рис. 1 приведены геометрические соотношения, поясняющие принцип нахождения невязки.

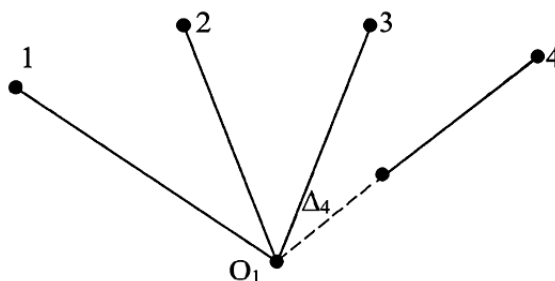


Рис. 1. Определение координат очага землетрясения (геометрические соотношения)

Fig. 1. Determining the coordinates of the earthquake source (geometric relations)

Для исследования адекватности работы предложенной модели были рассмотрены три случая:

- скорости сейсмических волн распределены случайным образом в интервале от 2.3 до 4.4 км/с для каждого участка земной коры (рис.2а);
- скорости сейсмических волн возрастают с увеличением глубины очага землетрясения от 2.55 до 4.15 км/с, и при этом были введены случайные изменения скоростей от -0.25 км/с до 0.25 км/с (рис. 2б);
- скорости сейсмических волн, по осям X и Y , изменяются по косинусоидальному закону таким образом, что максимум косинусоиды находится в центре исследуемого участка. При этом скорости сейсмических волн от центра краям участка меняются на 10 %. Как и в предыдущем случае, скорости сейсмических волн возрастают с увеличением глубины от 2.55 до 4.15 км/с и к ним добавляются случайные изменения в пределах от -0.25 км/с до 0.25 км/с (рис. 2в).
- по осям X и Y скорости сейсмических волн изменяются по синусоидальному закону с совершением полного периода колебания, за время пробега сейсмических волн от одного края

участка до другого. При этом скорость поперечной волны меняется в пределах $\pm 10\%$. Как и в предыдущих случаях, считается, что скорости сейсмических волн возрастают с увеличением глубины от 2.55 до 4.15 км/с и к ним добавляются случайные изменения в пределах от -0.25 км/с до 0.25 км/с (рис. 2г).

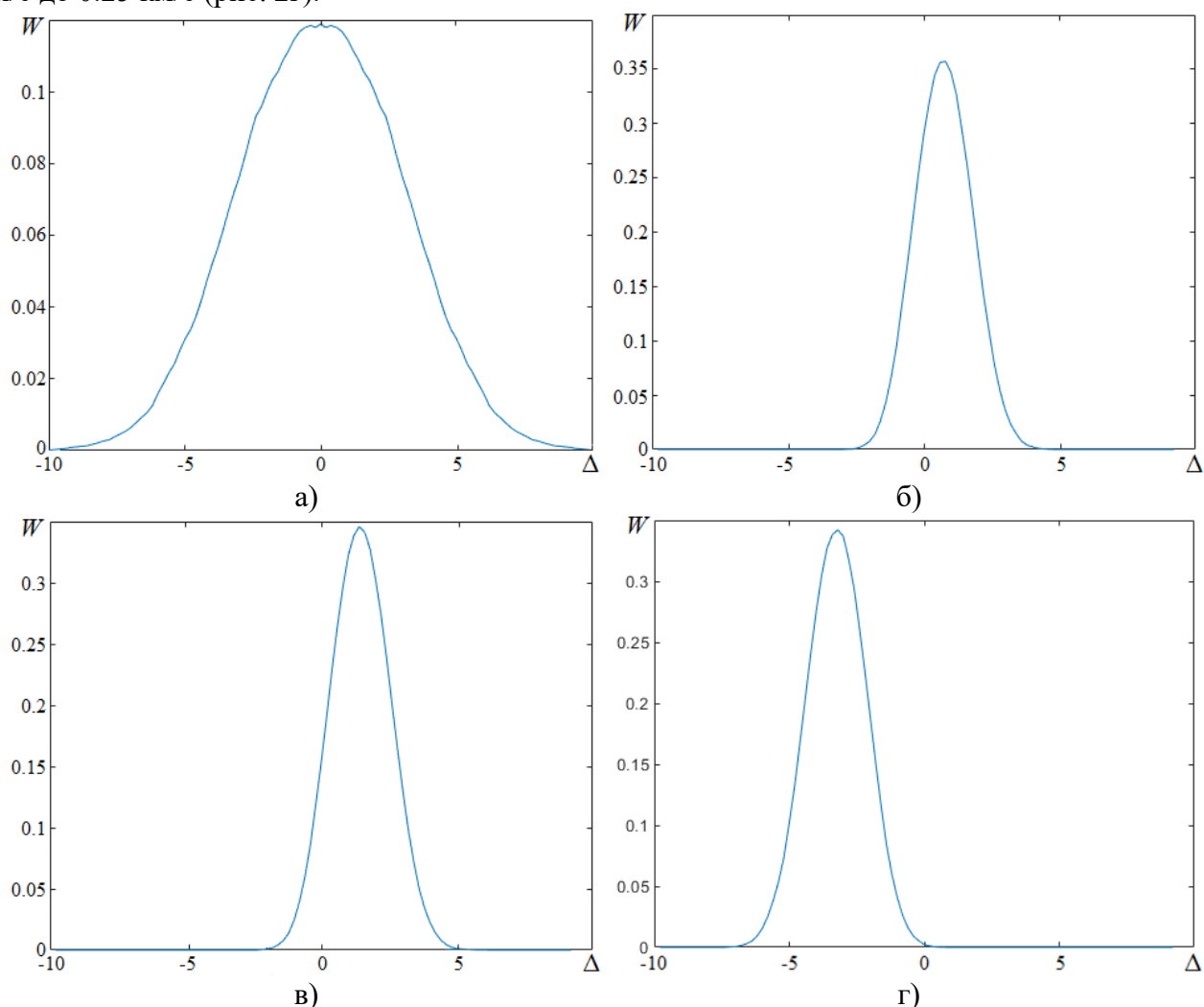


Рис. 2. Распределение ошибок при различных параметрах среды
Fig. 2. Distribution of errors for various environmental parameters

Обсуждение результатов.

1. Расположение плотной породы между сейсмическими датчиками (рис. 2в) приводит к появлению смещения расчетных координат (математического ожидания по оси ошибок) вправо от истинных, и наоборот.

2. Расположение менее плотной породы возле четвертого сейсмического датчика (рис. 2г) приводит к появлению смещения расчетных координат (математического ожидания по оси ошибок) влево от истинных, и наоборот.

3. На величину ошибки в определении координат эпицентра землетрясения значительное влияние оказывает горизонтальное изменение скоростей сейсмических волн на земной коре (сравнение рис. 2б с рис. 2в и 2г).

4. Большое удаление сейсмических датчиков от эпицентра землетрясения может привести к значительным ошибкам из-за большего разброса скоростей сейсмических волн (к большей дисперсии) на участках их распространения, что подтверждается сравнительным анализом рис. 2а по сравнению с остальными рисунками.

Вывод. Предложенный метод целесообразно применять в случаях, когда не определены экспериментально скорости распространения сейсмических волн на участках их распространения. Для увеличения точности определения координаты очага землетрясения, по предложенному методу, необходимо осуществить несколько итераций по выбору сейсмических датчиков на местности [17-23].

По координатам гипоцентра землетрясения, рассчитанным по показаниям четырех сейсмических датчиков, могут быть определены средние значения скоростей сейсмических волн для трасс распространения до сейсмических датчиков, показания которых не использовались при расчете, так как это могло бы дать худшие результаты.

При наличии двух комбинаций по четыре сейсмических датчика возможно определение скоростей сейсмических волн по каждой из комбинаций и их сверка.

При наличии значительных расхождений между результатами расчетов, по двум комбинациям сейсмических датчиков, это расхождение может быть использовано для оптимизации определения координат гипоцентра землетрясения. При учете параметров среды и размещения сейсмических датчиков в пространстве может быть дана математическая оценка смещения координат гипоцентра землетрясения.

Использование предложенной методики при расчетах позволит уменьшить ошибки в определении координат гипоцентра землетрясения

Библиографический список:

1. 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>
2. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>
3. 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
4. Шахриманьян М.Л., 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.
5. Асланов Т.Г., Сеферов А.К., Садыки М.Р. Ошибки в определении координат очага землетрясения при использовании метода сфер / Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017617047 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017611223; заявл. 13.02.17; опубл. 21.06.17.
6. Асланов Т.Г. Тагиров Х.Ю. Определение координат очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн / Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2015» / Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2015. — 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-04946-1
7. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Кудяев Д.А. Определение скоростей сейсмических волн по произошедшему землетрясению / XXXVI итоговая научно-техническая конференция ДГТУ: тезисы докладов. Махачкала, РИО ДГТУ, 2005. – С. 72-73
8. Даниялов М.Г., Магомедов Х.Д., Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Об одном методе определения очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн / Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН, Материалы. Издательство ДНЦ РАН. Махачкала 2010. – С. 54-59.
9. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning In Tech. Janeza Trdine, 2012. 460 p.
10. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3.
11. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. – 154 p.
12. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. –272 p.
13. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. — 298 p.
14. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии: учебное пособие. – Санкт-Петербург, 2008. - 222 с
15. Архангельский В.Т., Веденская И.А., Гайский В.Н. Руководство по производству и обработке. Издание Академии наук СССР. Москва, 1954г.
16. Быстрицкая Ю.В. Соотношение и сопоставление макросейсмических и инструментальных данных (дагестанские землетрясения). В сборнике «Сейсмичность и гидрогеогазохимия территории Дагестана. Вып. 2 (17).- Махачкала 1978.
17. 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. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70>
18. 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>
19. Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А., Тагиров Х.Ю. Влияние пространственного расположения сейсмодатчи-

- ков на точность определения гипоцентра землетрясения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №4 (43), 2016 – Махачкала: ДГТУ, 2016. – С. 73-84
20. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения с использованием различных (комбинированных) методов / Материалы Международного молодежного научного форума "ЛОМОНОСОВ-2017" / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2017 — 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-05504-2
 21. Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Тагиров Х.Ю. Исследование зависимости расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения от различных методов расчета координат / Неделя науки – 2017: материалы XXXVIII итоговой научно-технической конференции ДГТУ, 17-22 апреля 2017 г., Махачкала / Под ред. д.т.н., проф. Т.А. Исмаилова. – Махачкала, ДГТУ, 2017. – С.45-47.
 22. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю. О некоторых вопросах выбора сейсмодатчиков с целью уменьшения ошибок при определении гипоцентра землетрясения с использованием различных методов / Материалы научно-практической конференции. ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова». 2017. С. 256-259.
 23. 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. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70>

References:

1. Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Determining the coordinates of the earthquake source using figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2019;46(4):134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142> (In Russ)
2. Aslanov T.G. Determining the coordinates of the earthquake source using the combined method. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2017;44(2):118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125> (In Russ)
3. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Determining the coordinates of the earthquake source using figures of the second order - an ellipse and a hyperbola. *Automation. Modern technologies*. 2018; 11(72): 503-509 (In Russ)
4. Shakhriyaman M.L., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a way to support decision-making in case of emergencies. *Catalog "Fire Safety"* 2003; 240-241. (In Russ)
5. Aslanov T.G., Seferov A.K., Sadyki M.R. Errors in determining the coordinates of the earthquake source when using the method of spheres / Svid. about Mrs. reg. prog. Computer No. 2017617047 Ros. Federation / applicant and copyright holder VGUYu (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017611223; dec. 02/13/17; publ. 06/21/17. (In Russ)
6. Aslanov T.G. Tagirov Kh.Yu. Determining the coordinates of the earthquake focus with the simultaneous determination of seismic wave velocities / Proceedings of the International Youth Scientific Forum "LOMONOSOV-2015" / Ed. ed. A.I. Andreev, A.V. Andriyanov, E.A. Antipov. [Electronic resource] - M.: MAKS Press, 2015. - 1 electron. opt. disc (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-04946-1 (In Russ)
7. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kudaev D.A. Determination of seismic wave velocities by the occurred earthquake / XXXVI final scientific and technical conference of DSTU: abstracts. Makhachkala, RIO DSTU, 2005; 72-73 (In Russ)
8. Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K., Aslanov T.G. On one method for determining the source of an earthquake with the simultaneous determination of seismic wave velocities / Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Materials. Publishing house DSC RAS. Makhachkala 2010; 54-59. (In Russ)
9. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning In Tech. Janeza Trdine, 2012; 460.
10. Robert Garotta. Transverse waves: from registration to interpretation. A short course of lectures for higher educational institutions, 2000; 3.
11. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory. University of Utah, 2007; 154.
12. Kasahara K. Earthquake mechanics. *Cambridge University Press*. 1981; 272.
13. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media. *Australian National University Press*, 2009; 298p.
14. Yanovskaya T.B. Fundamentals of seismology: textbook. - St. Petersburg, 2008; 222. (In Russ)
15. Arkhangelsky V.T., Vedenskaya I.A., Gaisky V.N. Manufacturing and Processing Guide. Publication of the Academy of Sciences of the USSR. Moscow, 1954 (In Russ)
16. Bystritskaya Yu.V. Correlation and comparison of macroseismic and instrumental data (Dagestan earthquakes). In the collection "Seismicity and hydrogeogas chemistry of the territory of Daghestan. Issue. 2 (17) Makhachkala 1978. (In Russ)
17. Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analysis of the error distribution density in determining the coordinates of the earthquake source using the methods of spheres and ellipsoids. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *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)
18. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Investigation of the dependence of errors in determining the coordinates of the earthquake focus on calculation methods (spheres and hyperboloids). [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *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)
19. T. G. Aslanov, Kh. D. Magomedov, U. A. Musaeva, and Kh. Yu. Influence of the spatial arrangement of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. No. 4 (43), 2016 - Makhachkala: DSTU, 2016; 73-84 (In Russ)
20. Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu. Influence of the spatial arrangement of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter using various (combined) methods / Materials of the International Youth Scientific Forum "LOMONOSOV-2015" / Ed. ed. A.I. Andreev, A.V. Andriyanov, E.A. Antipov. [Electronic resource] - M.: MAKS Press, 2015. - 1 electron. opt. disc (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-04946-1 (In Russ)

- OSOV-2017" / Ed. ed. I.A. Aleshkovsky, A.V. Andriya-nov, E.A. Antipov. [Electronic resource] M.: MAKS Press, 2017 - 1 electron. opt. disc (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-05504-2 (In Russ)
21. Aslanov G.K., Aslanov T.G. Tagirov Kh.Yu. Study of the dependence of the location of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter on various methods for calculating coordinates / Week of Science - 2017: materials of the XXXVIII final scientific and technical conference of the DSTU, April 17-22, 2017, Makhachkala / Ed. d.t.s., prof. T.A. Ismailov. - Makhachkala, DSTU, 2017; 45-47. (In Russ)
 22. Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu. On some issues of choosing seismic sensors in order to reduce errors in determining the hypocenter of an earthquake using various methods. Proceedings of the scientific-practical conference. Center for Seismic Data Analysis of Moscow State University named after M.V. Lomonosov". 2017; 256-259. (In Russ)
 23. Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analysis of the error distribution density in determining the coordinates of the earthquake source using the methods of spheres and ellipsoids. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *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)

Сведения об авторах:

Сидоркина Юлия Анатольевна, доктор технических наук, доцент, кафедра автономных информационных и управляющих систем; sidyulia5969@yandex.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, докторант, доцент, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; tabasik@gmail.com; orcid: 0000-0002-5594-3554

Information about the authors:

Yulia A. Sidorkina, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department Autonomous Information and Control Systems; sidyulia5969@yandex.ru

Tagirbek G. Aslanov, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Cand., Assoc. Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; tabasik@gmail.com; orcid: 0000-0002-5594-3554

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 15.02.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 10.03.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 10.03.2022.