

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

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-64-71

Оригинальная статья / Original Paper

Определение координат гипоцентра землетрясения
при известной структуре земной коры

Т.Г. Асланов¹, Ю.А. Сидоркина²

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет),

²105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методов определения координат гипоцентра землетрясения при известной структуре земной коры. **Метод.** Для решения задачи применяется метод грубой силы (brute force), доверительный интервал, сравнительный метод и перебор возможных вариантов по сетке. **Результат.** Разработан метод определения координат очага землетрясения при известной структуре земной коры с использованием при расчетах в качестве геометрических мест точек различных фигур n -ого порядка. **Вывод.** Предложенный метод, при известной структуре земной коры, дает возможность использовать все известные методы, требующие для расчетов координат гипоцентра землетрясения, информацию о разностях времен пробега сейсмических волн на разнесенные в пространстве сейсмодатчики и разность времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн к сейсмодатчику. Точность определения координат гипоцентра землетрясения зависит от качества определения структуры земной коры, на которой наблюдалось сейсмическое событие.

Ключевые слова: сейсмология, сейсмодатчик, сейсмическая волна, скорость, окружность, сфера, гиперболоид, эллипсоид, овал Кассини, структура земли

Для цитирования: Т.Г. Асланов, Ю.А. Сидоркина. Определение координат гипоцентра землетрясения при известной структуре земной коры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(4): 64-71. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-64-71

Determination of coordinates of the earthquake hypocenter with a known structure
of the earth's crust

T.G. Aslanov¹, Yu.A. Sidorkina²,

¹Daghestan State Technical University,

¹367026, Makhachkala, I. Shamil Ave., 70, Russia,

² N.E. Bauman Moscow State Technical University (National research University),

²5/1 Second Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop methods for determining the coordinates of the hypocenter of an earthquake with a known structure of the earth's crust. **Method.** To solve the problem, the brute force method, the confidence interval, the comparative method and the enumeration of possible options on the grid are used. **Result.** A method has been developed for determining the coordinates of an earthquake source with a known structure of the earth's crust using points of various figures of the n -th order as geometric locations in calculations. **Conclusion.** The proposed method, with the known structure of the earth's crust, makes it possible to use all known methods that require information on the travel time differences of seismic waves to spaced seismic sensors and the

difference in travel times of longitudinal and transverse seismic waves to the seismic sensor for calculating the coordinates of the earthquake hypocenter. The accuracy of determining the coordinates of the earthquake hypocenter depends on the quality of determining the structure of the earth's crust on which the seismic event was observed.

Keywords: seismology, seismic sensor, seismic wave, velocity, circle, sphere, hyperboloid, ellipsoid, Cassini oval, earth structure

For citation: T.G. Aslanov, Yu.A. Sidorkina. Determination of coordinates of the earthquake hypocenter with a known structure of the earth's crust. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (4): 64-71. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-64-71

Введение. В настоящее время разработаны программы [1], 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.

Геофизическими службами расчет координат очага землетрясения производится с использованием усредненных значений скоростей сейсмических волн [2-8]. Причем, эти значения применяются для больших участков земли, что и приводит к значительным ошибкам.

Постановка задачи. В работе предложен метод определения координат гипоцентра землетрясения при известной структуре земной коры с использованием для определения координат гипоцентра землетрясения, для пары сейсмодатчиков, различные комбинации фигур второго и четвертого порядка: метода сфер, методов сферы и гиперboloида, гиперboloида и эллипсоида, а также гиперboloида и овала Кассини.

В качестве исходных данных используются заданные координаты сейсмодатчиков и гипоцентра землетрясения, а также случайные распределения скоростей сейсмических волн на местности.

По известным значениям разности времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн на сейсмодатчики, а также разности времен прихода продольной сейсмической волны на разнесенные в пространстве сейсмодатчики и по известной структуре земной коры определяется форма фигуры n -ого порядка, используемой для определения координат гипоцентра землетрясения. Точка пересечения нескольких расчетных фигур является очагом землетрясения.

Методы исследования. Для определения координат гипоцентра землетрясения могут быть использованы четыре известных метода локализации сейсмических событий [9-17]. При этом во всех методах делается допущение, что скорости сейсмических волн для больших территорий являются постоянными и неизменными, что приводит к ошибкам. В качестве примера, на рис. 1 приведено использование метода сфер для определения координат гипоцентра землетрясения при допущении, что скорости сейсмических волн являются постоянными.

На рис. 2 показана фигура, получаемая при учете изменения скоростей сейсмических волн на трассе распространения. Фигура, приведенная на рис. 2 далеко не похожа на сферу. Как видно из рис. 2, сильное влияние на определяемые расстояния от сейсмодатчика до возможной точки расположения гипоцентра землетрясения оказывает изменение скорости сейсмической волны по пути ее распространения. На рис. 2а приведен пример, когда поверхность земли разбита на 5 участков с различной скоростью распространения сейсмических волн.

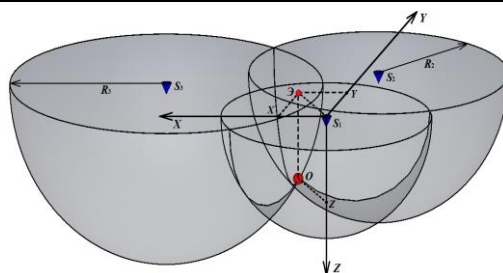


Рис. 1. Метод сфер при допущении, что скорости сейсмических волн неизменны на всей территории

Fig. 1. Spheres method under the assumption that seismic wave velocities are constant throughout the territory

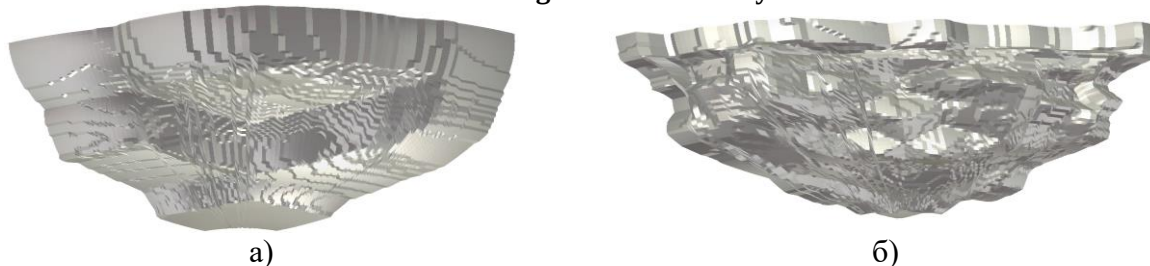


Рис. 2. Часть искаженной сферы, полученной при известных значениях скоростей сейсмических волн по путям ее распространения

Fig. 2. Part of a distorted sphere obtained at known values of seismic wave velocities along the paths of its propagation

Этот случай соответствует расположению сейсмодатчика вблизи с изменяющимися условиями распространения сейсмических волн, таких как переход горной местности на равнинную. На рис. 2б произведено разбиение земли на $8 \times 8 \times 8$ участков с одинаковой скоростью, соответствующей случаю, когда расстояние между сейсмодатчиком и очагом землетрясения большое.

Для определения координат гипоцентра землетрясения при известной структуре земли необходимо воспользоваться следующим алгоритмом действий. Используя метод сфер, определяем координаты гипоцентра землетрясения, и доверительные интервалы для сферической системы координат по углу места, азимуту и расстояниям от сейсмодатчика до предполагаемого места реального расположения гипоцентра землетрясения. Определяем расстояние, при котором разность времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн, вычисленная при заданных угле места и азимуту, равна разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн от гипоцентра землетрясения до сейсмодатчика.

Определив, таким образом, для всего диапазона углов расстояния от сейсмодатчика до предполагаемого расположения гипоцентра землетрясения [18-19] получаем поверхность, аналогичную рис. 2. Определяем координаты для каждого полученного расстояния, используя пространственную теорему Пифагора [20]. Аналогичные действия производим для оставшихся 4 сейсмодатчиков. Сравнивая полученные координаты, находим одинаковые, которые и являются координатами очага землетрясения. Так как фигуры имеют сложную форму, то возможно несколько точек пересечения (пример, рис. 3), для чего в определение координат гипоцентра землетрясения включается четвертый сейсмодатчик.

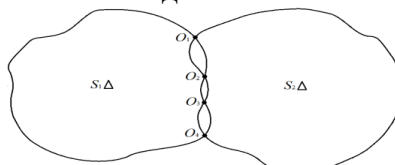


Рис. 3. Пример множественных пересечений по методу сфер
Fig. 3. An example of multiple intersections using the sphere method

Для определения координат гипоцентра землетрясения с использованием фигуры второго порядка гиперboloид – для каждого угла места и азимута в сферической системе координат с центром в первом сейсмодатчике, задается отрезок R_1 , от конца которого строится отрезок до второго сейсмодатчика R_2 (рис. 4).

По разности отрезков R_1 и R_2 определяется разность расстояний ΔR . Если знак разности положительный, то отстраивается разность расстояний ΔR от первого сейсмодатчика вдоль отрезка R_1 , если отрицательный, то от второго сейсмодатчика. В зависимости от пройденных участков земной коры определяются время прохождения отрезка ΔR .

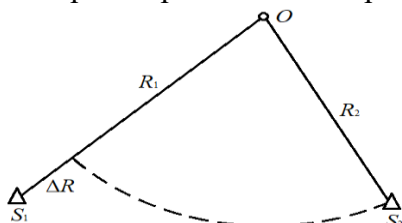


Рис. 4. Пояснение определения координат гипоцентра землетрясения с использованием метода гипербола

Fig. 4. Explanation of the definition of the coordinates of the hypocenter earthquakes using the hyperbole method

В случае равенства разности времен пробега сейсмической волны к двум разнесенным в пространстве сейсмодатчикам с временем прохождения отрезка ΔR , соответствующее координаты точек пересечения R_1 и R_2 записываются для каждого угла сферической системы координат. Полученное множество точек в пространстве определяет фигуру гиперboloида, полученную при прохождении через неоднородную среду.

Аналогично методу сфер, в методе, использующем гиперboloид, производится сравнение координат всех полученных точек фигур (сфер и гиперboloида), для нахождения близких по значениям. Для методов, с использованием эллипсоида или овала Кассини сначала, относительно первого сейсмодатчика, по методу сфер, определяются их искаженные формы.

Далее, от каждой точки полученной поверхности отстраивается отрезок до второго сейсмодатчика. В случае если полученная длина отрезка, с допустимой погрешностью, соответствует уравнению радиуса сферы [16-17], то полученные координаты отрезков сохраняем.

$$R_2 = t_2 / 2.4V_s \quad (1)$$

где t_2 – разность времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн ко второму сейсмодатчику;

V_s – скорость поперечной волны.

Для каждой точки полученной фигуры, строим либо эллипс, либо овал Кассини на плоскости S_1, S_2 и находим точки пересечения фигур.

При этом, должно соблюдаться условие для эллипса $R_1 + R_2 = \text{const}$, а для овала Кассини $R_1 * R_2 = \text{const}$.

Для проверки адекватности предлагаемой модели была задана область размерами 160x160 км, которая состояла из 125 участков со случайно распределенными скоростями, были заданы координаты сейсмодатчиков: $X_1 = 10$ км; $Y_1 = 10$ км; $X_2 = 135$ км; $Y_2 = 20$ км; $X_3 = 140$ км; $Y_3 = 150$ км; $X_4 = 20$ км; $Y_4 = 140$ км и гипоцентра землетрясения $X = 80$ км; $Y = 80$ км; $Z = 30$ км.

Для первых двух сейсмодатчиков, для определения координат гипоцентра землетрясения использовались фигуры второго порядка эллипсоид и гиперboloид, для третьего и четвертого сейсмодатчика сферы. По результатам вычислений ошибка составила 120 метров.

Также было проведено моделирование с определением скоростей сейсмических волн для каждого участка при помощи матричного метода [21-23]. По значениям вычисленных скоростей были определены координаты гипоцентров землетрясения, при этом позиции всех сейсмодатчиков менялись.

В каждом участке таких позиций могло быть четыре. Всего было проведено 500 вычислений с заданием различных вариаций скоростей для всех участков.

Распределение ошибок вычисления координат гипоцентра землетрясения при известной структуре земной коры приведено на рис. 5.

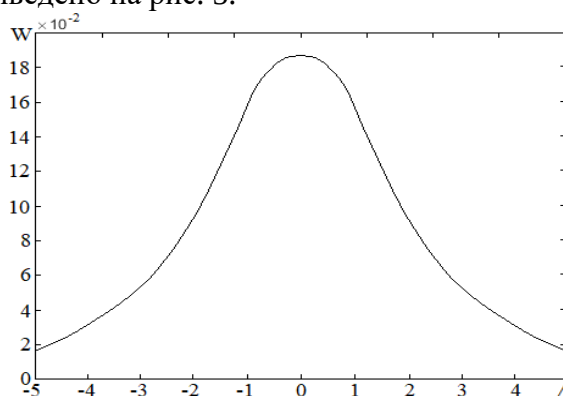


Рис. 5. Распределение ошибок при определении координат гипоцентра землетрясения при известной структуре земной коры

Fig. 5. Distribution of errors in determining the coordinates of the hypocenter of an earthquake with a known structure of the earth's crust

Обсуждение результатов. Ошибки в измерении координат гипоцентра землетрясения при известных значениях скоростей сейсмических волн возникают за счет шага изменения угла места, азимута и расстояния. Ошибку можно уменьшить за счет уменьшения шага перебора по сетке вблизи найденных координат гипоцентра землетрясения с большим шагом.

Ошибки в определении координат гипоцентра землетрясения с использованием матричного метода для нахождения скоростей в каждом участке создают ошибки за счет точности самого матричного метода, и соответствуют результатам ранних исследований [11-13, 25-29]. Следует отметить, что при оптимальном выборе сейсмодатчиков на местности ошибки в определении координат гипоцентра землетрясения могут быть значительно уменьшены.

Вывод. Определение с высокой точностью координат гипоцентра землетрясения при неточной информации о структуре земной коры с использованием метода сфер из-за не оптимального размещения сейсмодатчиков невозможно, в связи с чем, возникает необходимость использования других фигур.

При использовании метода сфер вычисление расстояний от второго, третьего и четвертого сейсмодатчиков до геометрической поверхности возможных мест расположения гипоцентра землетрясения (искаженной сферы), полученной по данным от первого сейсмодатчика недопустимо. Это связано с тем, что в случае наличия ошибки измерений от первого сейсмодатчика, при определении остальных расстояний, ошибка вычислений от первого сейсмодатчика будет складываться с ошибками вычислений расстояний от остальных сейсмодатчиков.

В методах, использующих для определения координат гипоцентра землетрясения такие фигуры как гиперболоид, эллипс или овал Кассини, использование данных первого сейсмодатчика для определения расстояний до второго сейсмодатчика обусловлена тем, что для формирования этих фигур необходима одновременная обработка данных с двух сейсмодатчиков. При этом использование первого сейсмодатчика для нахождения расстояния до второго позволяет значительно сократить машинное время.

Библиографический список:

1. 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
2. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning/ S. D'Amico – InTech. Janeza Trdine, 2012. 460 p.
3. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3.
4. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. 154 p.
5. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. 272 p.
6. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. 298 p.
7. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии: учебное пособие /Т.Б. Яновская – Санкт-Петербург, 2008. 222 с
8. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.

9. Асланов Т.Г., Давудова Д.Д., Мирзаханова Л.С. Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сфер и гиперболоида // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017616673 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017611151; заявл. 13.02.17; опубл. 09.06.17.
10. Асланов Т.Г., Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сфер, гиперболоида и эллипсоида // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017660545 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017615709; заявл. 13.06.17; опубл. 22.09.17.
11. 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>
12. 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>
13. 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
14. Асланов Т.Г. Разработка алгоритма определения координат очага землетрясения, с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Научные труды молодых исследователей программы «Шаг в будущее». Том 8. «Профессионал». Москва. 2005. С. 32-34
15. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., 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
16. 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.
17. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю., Магомедов Г.Б. Определение координат очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн с использованием данных четырех и более сейсмодатчиков // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2016662097 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). - № 2016619293; заявл. 02.09.16; опубл. 31.10.16.
18. Айвазян С.А. Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика. 1983.
19. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. М.: ИЛ, 1960.
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
21. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., Тагиров Х.Ю. Определение структуры земли 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
22. 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
23. Асланов Т.Г., Алимерденов В.Ш. Определение структуры земли по статистическим данным времен прихода сейсмических волн произошедших землетрясений // Старт в будущее – 2013. Труды III научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Санкт-Петербург
24. 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.
25. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Зависимость ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гипербооидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №4 (44), 2017. Махачкала: ДГТУ, 2017. С. 87-98
26. 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>
27. Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А., Тагиров Х.Ю. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №4 (43), 2016. Махачкала: ДГТУ, 2016. С. 73-84
28. 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
29. 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.35-39.

References:

1. Shakhrimanyan M.L., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a way to support decision-making in case of emergencies. [Katalog «Pozharnaya bezopasnost»] Catalog "Fire safety". 2003; 240-241 (In Russ)
2. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning / S. D'Amico - InTech. Janeza Trdine. 2012; 460.

3. Robert Garotta. Shear waves: from registration to interpretation. Short course of lectures for higher educational institutions. 2000 Series No. 3
4. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory. University of Utah, 2007; 154 .
5. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara - Cambridge University Press, 1981; 272.
6. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media. Australian National University Press. 2009; 298.
7. Yanovskaya T.B. Fundamentals of seismology: textbook . St. Petersburg. 2008; 222 (In Russ)
8. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013; 300 .
9. Aslanov T.G., Davudova D.D., Mirzakhanova L.S. Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter using the combined method of spheres and hyperboloid . Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017616673 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017611151; declared 02/13/17; publ. 09.06.17. (In Russ)
10. Aslanov T.G., Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter using the combined method of the sphere, hyperboloid and ellipsoid. Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017660545 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017615709; declared 06/13/17; publ. 09/22/17. (In Russ)
11. 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. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye 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)
12. Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source using the combined method. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye 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)
13. 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. [Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii] *Automation. Modern technologies*. 2018; 11 (72): 503-509 (In Russ)
14. Aslanov T.G. Development of an algorithm for determining the coordinates of the earthquake source, with the simultaneous determination of the velocities of seismic waves. Scientific works of young researchers of the "Step into the future" program. Volume 8. "Professional". Moscow. 2005; 32-34 (In Russ)
15. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kudaev D.A. Determination of the velocities of seismic waves from the occurred earthquake // XXXVI final scientific and technical conference of DSTU: abstracts. Makhachkala, RIO DSTU, 2005; 72-73 (In Russ)
16. Aslanov G.K., Daniyalov M.G., Aslanov T.G., Magomedov Kh. D. On one method for determining the source of an earthquake with simultaneous determination of the velocities of seismic waves. [Trudy Instituta geologii DNTS RAN] *Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010; 56: 54-59. (In Russ)
17. Aslanov T.G., Tagirov H.Yu., Magomedov G.B. Determination of coordinates of an earthquake source with simultaneous determination of seismic wave velocities using data from four or more seismic sensors. Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2016662097 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUYu (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2016619293; declared 09/02/16; publ. 10/31/16. (In Russ)
18. Ayvazyan S.A. Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Applied statistics. Basics of modeling and primary data processing. [Finansy i statistika] *Finance and statistics*. 1983. (In Russ)
19. Van der Waerden B.L. Math statistics. M.: IL, 1960. (In Russ)
20. Analytical geometry and linear algebra: textbook. allowance / A. E. Umnov. 3rd ed., Rev. and add. M.: MFTI, 2011; 544. ISBN 978-5-7417-0378 (In Russ)
21. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Tagirov H.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 and practical conference, November 19-20, 2014 - Makhachkala: DSTU. 2014; 242-246 (In Russ)
22. Aslanov T.G., Tagirov H.Yu. Determination of the coordinates of the earthquake focal point with the simultaneous determination of the velocities of seismic waves . Materials of the International Youth Scientific Forum "LOMONOSOV-2015" / Otv. ed. A.I. Andreev, A.V. Andriyanov, E.A. Antipov. [Electronic resource] M.: MAKSS Press, 2015; 1 electron. wholesale disc (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-04946-1 (In Russ)
23. Aslanov T.G., Alimerdenov V.Sh. Determination of the structure of the earth according to the statistical data of the times of arrival of seismic waves of the occurred earthquakes. Start to the future - 2013. Proceedings of the III scientific and technical conference of young scientists and specialists. Saint Petersburg (In Russ)
24. 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)
25. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Dependence of errors in determining the coordinates of the earthquake source on calculation methods (spheres and hyperbooids). [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. No. 4 (44), 2017. Makhachkala: DSTU. 2017; 87-98 (In Russ)
26. 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. Tekhnicheskiye 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)
27. T. G. Aslanov, Kh. A. 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. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2016; 4 (43), Makhachkala: DSTU. 2016; 73-84 (In Russ)
28. 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 "LOMONO-

SOV-2017" / Ed. ed. I.A. Aleshkovsky, A.V. Andriyanov, E.A. Antipov. [Electronic resource] M.: MAK Press, 2017 - 1 electron. opt. disc (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-05504-2 (In Russ)

29. 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. Science Week - 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; 35-39. (In Russ)

Сведения об авторах:

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, докторант, старший преподаватель кафедры управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; tabasik@gmail.com; Orcid: 0000-0002-5594-3554

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

Information about the authors:

Tagirbek G.Aslanov, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Cand., Senior Lecturer, Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: tabasik@gmail.com

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

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.10.2021.

Одобрена после рецензирования / Revidced 10.11.2021.

Принята в печать /Accepted for publication 10.11.2021.