

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

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-52-58

Оригинальная статья / Original Paper

Определение координат гипоцентра землетрясения методом окружностей

Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка метода определения координат гипоцентра землетрясения с использованием в качестве геометрического места точек положения гипоцентра различных комбинаций фигур второго и четвертого порядка. **Метод.** Известно, что линией пересечения фигур второго и четвертого порядков, в случае совпадения фокусов, является окружность. Для определения координат очага землетрясения используются данные сейсмографов, по которым строятся фигуры второго и четвертого порядка, точка пересечения которых, является гипоцентром. При использовании данных с двух сейсмодатчиков имеют место две фигуры, линией пересечения которых является окружность. Через центр этой окружности строится сфера с радиусом равным радиусу окружности. Для других двух пар сейсмодатчиков также формируются еще две сферы, Точка пересечения полученных трех сфер и является искомым гипоцентром землетрясения. **Результат.** Разработан метод определения координат очага землетрясения с использованием для различных пар сейсмодатчиков разных фигуры второго и четвертого порядков. **Вывод.** Метод позволяет обеспечить выбор одной из фигур второго или четвертого порядка для разных пар сейсмодатчиков, что позволяет уменьшить ошибку в определении координат очага.

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

Для цитирования: Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов. Определение координат гипоцентра землетрясения методом окружностей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 52-58. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-52-58

Determination of coordinates of the earthquake hypocenter by the method of circles

G.K. Aslanov, T.G. Aslanov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a method for determining the coordinates of the earthquake hypocenter using various combinations of second and fourth order figures as a geo-locus of the hypocenter position points. **Method.** It is known that the line of intersection of figures of the second and fourth orders, in the case of coincidence of focuses, is a circle. To determine the coordinates of the earthquake source, data from seismographs are used, which are used to construct figures of the second and fourth order, the intersection point of which is the hypocenter. When using data from two seismic sensors, there are two figures, the intersection line of which is a circle. A sphere with a radius equal to the radius of the circle is constructed through the center of this circle. For the other two pairs of seismic sensors, two more spheres are also formed, The intersection point of the three spheres obtained is the sought-for hypocenter of the earthquake. **Result.** A method has been developed for determining the coordinates of an earthquake source using different shapes of the second and fourth orders for different pairs of seismic sensors. **Conclusion.** The method allows one to select one of the

second or fourth order figures for different pairs of seismic sensors, which makes it possible to reduce the error in determining the source coordinates.

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

For citation: G.K. Aslanov, T.G. Aslanov. Determination of coordinates of the earthquake hypocenter by the method of circles. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 52-58. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-52-58

Введение. В настоящее время существуют множество методов определения координат гипоцентра землетрясения, которые для этого используют фигуры второго и четвертого порядка. При этом в качестве фигуры второго порядка, в большинстве своем, в них по данным одного из сейсмодатчиков строится сфера [1-11]. При этом использование сферы накладывает известные ограничения на выбор сейсмодатчиков на местности [3-7].

В работе предложен метод определения координат гипоцентра землетрясения, позволяющая использовать при определении координат гипоцентра землетрясения для различных пар сейсмодатчиков разные комбинации фигур второго и четвертого порядков: метод сфер, метод сферы и гиперboloида, гиперboloида и эллипсоида, а также гиперboloида и овала Кассини.

Постановка задачи. В предложенном методе в качестве исходных данных при известных координатах сейсмодатчиков используются разности времен прихода продольной и поперечной сейсмической волны на каждый сейсмодатчик и (или), разность времен прихода сейсмической (продольной или поперечной) волны для каждой пары сейсмодатчиков. Используя для различных пар сейсмодатчиков разные комбинации фигур второго и четвертого порядков, определяются линии пересечения этих фигур – окружности. Строится сфера с фокусом в центре окружности и радиусом равном радиусу окружности. Координаты гипоцентра землетрясения определяются как точка пересечения сфер построенных для разных пар сейсмодатчиков.

Методы исследования. Для определения координат гипоцентра землетрясения были использованы четыре известных метода локализации сейсмических событий:

– метод сфер; радиус от сейсмодатчика до очага землетрясения можно вычислить по следующей формуле [8-11]:

$$R_{si} = \frac{V_p V_s \Delta t_i}{V_p - V_s}, \quad (1)$$

где: V_p – скорость продольной волны;

V_s – скорость поперечной волны;

Δt_i – разность времен прихода продольной и поперечной сейсмической волны к i -ому сейсмодатчику;

– метод сферы и гиперboloида; расстояние от сейсмодатчика до очага землетрясения можно вычислить по следующей формуле [1,4,6]:

$$R_{gi} = \frac{L_i - t_{ri}^2 V_p^2}{2(t_{ri} V_p - L_i m_i)}, \quad (2)$$

где: t_{ri} – разность времен прихода продольной сейсмической волны к i -ому и $i + 1$ сейсмодатчику;

L_i – расстояние между i -м и $i + 1$ сейсмодатчиком;

$$m_i = \frac{(V_p - V_s)(L_i - t_{ri}^2 V_p^2) - 2t_{ri} \Delta t_i V_p^2 V_s}{2L_i V_p V_s \Delta t_i}, \quad (3)$$

– метод эллипсоида и гиперboloида; расстояние от сейсмодатчика до очага землетрясения можно вычислить по следующей формуле [2,7]:

$$R_{ei} = \frac{L_i^2 - t_{r(i-1)}^2 V_p^2}{2(t_{r(i-1)} V_p - L_i b_i)}, \quad (4)$$

где: $k = V_p / V_s$;

$$b_i = \frac{k((\Delta t_{i-1} + \Delta t_i)(L_i^2 - t_{r(i-1)}^2 V_p^2)(1-k) - t_{r(i-1)} k V_p^2 (\Delta t_{i-1} + \Delta t_i)^2) + t_{r(i-1)} L_i^2 (1-k)^2}{V_p L_i (k^2 (\Delta t_{i-1} + \Delta t_i)^2 - t_{r(i-1)}^2 (1-k)^2)},$$

– метод овала Кассини и гиперboloида; расстояние от сейсмодатчика до очага землетрясения можно вычислить по следующей формуле [3]:

$$R_{ki} = \sqrt{F^2 + L_i^2/4 - F((X_i - X_{i+1}) \cos \alpha + (Y_i - Y_{i+1}) \sin \alpha)}, \quad (5)$$

где: $F = \frac{1}{2} \sqrt{L_i^2 \cos 2\alpha \pm \sqrt{L_i^4 \cos^2 2\alpha + 16 \frac{V_p^4 V_s^4 t_i^2 t_{i+1}^2}{(V_p - V_s)^4} - L_i^4}}$;

$$\alpha = \arccos \left(\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right) / 2;$$

$$a = 4(t_{ri} V_p)^4 L_i^4 - 4(t_{ri} V_p)^2 L_i^6 - 16 \frac{V_p^4 V_s^4 \Delta t_i^2 \Delta t_{i+1}^2}{(V_p - V_s)^4} L_i^4 + L_i^8;$$

$$b = 12(t_{ri} V_p)^4 L_i^4 - 8(t_{ri} V_p)^6 L_i^2 + \frac{V_p^4 V_s^4 \Delta t_i^2 \Delta t_{i+1}^2}{(V_p - V_s)^4} (64 L_i^2 (t_{ri} V_p)^2 - 32 L_i^4) - 8(t_{ri} V_p)^2 L_i^6 + 2 L_i^8;$$

$$c = 4(t_{ri} V_p)^8 - 8(t_{ri} V_p)^6 L_i^2 + \frac{V_p^4 V_s^4 \Delta t_i^2 \Delta t_{i+1}^2}{(V_p - V_s)^4} (64 L_i^2 (t_{ri} V_p)^2 - 64 (t_{ri} V_p)^4 - 16 L_i^4) +$$

$$8(t_{ri} V_p)^4 L_i^4 - 4(t_{ri} V_p)^2 L_i^6 - L_i^8;$$

X_i, Y_i – координаты i -ого сейсмодатчика.

Геометрические соотношения для метода, где для определения координат гипоцентра используются овал Кассини и гиперboloид, приведены на рис.1.

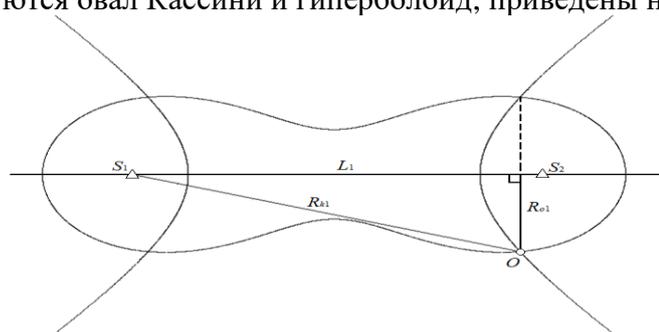


Рис. 1. Геометрические соотношения, возникающие при использовании для определения координат очага землетрясения овала Кассини и гиперboloида

Fig. 1. Geometric relations arising when using the Cassini oval and the hyperboloid to determine the coordinates of the earthquake source

Здесь, S_i – i -ый сейсмодатчик, O – очаг землетрясения, R_{oi} – радиус окружности – результат пересечения гиперboloида и овала Кассини.

Следует отметить, что линией пересечения любых фигур вращения, полученных вращением кривых n -ого порядка [12, 13], при условии прохождения оси вращения через два фокуса, является окружность с радиусом R_{oi} . Для пояснения метода окружностей, рассмотрим систему, состоящую из трех сейсмодатчиков и очага землетрясения (рис. 2).

Пусть, с использованием известных методов получены расстояния до гипоцентра землетрясения R_{o1} , R_{o2} , R_{o3} . Тогда получим три треугольника $R_{k1}R_{e3}L_3$, $R_{g2}R_{e3}L_2$ и $R_{k1}R_{g2}L_1$.

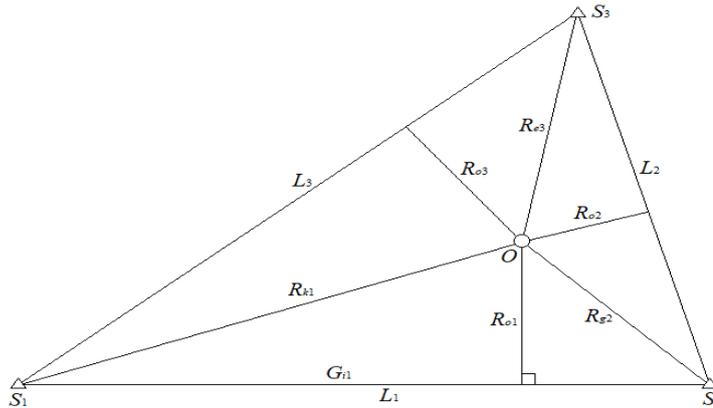


Рис. 2. Пояснение метода окружностей
Fig. 2. Explanation of the method of circles

Высота, опущенная с очага землетрясения на отрезок между двумя сейсмодатчиками, определяет радиус окружности, полученной в результате пересечения фигур (используемых для определения координат очага), полученных вращением кривых n -ого порядка, может быть определена по следующим выражениям.

$$G_i = \frac{L_i^2 - R_{j(i+1)}^2 + R_{ji}^2}{2L_i}; \quad (6)$$

$$R_{oi} = \sqrt{R_{ji}^2 - G_i^2}, \quad (7)$$

где: R_{ji} – расстояние от i -ого сейсмодатчика, а j – метод определения координат гипоцентра землетрясения (прим. R_{k1}).

Точка пересечения трех окружностей с радиусами R_{o1} , R_{o2} , R_{o3} является гипоцентром землетрясения.

Для упрощения задачи нахождения этой точки пересечения, построим сферы с центрами в центрах соответствующих окружностей и радиусами равными радиусам окружностей. Координаты центра окружности могут быть вычислены по выражениям:

$$\begin{aligned} X_{0i} &= X_{i+1} G_i/L_i + X_i(1 - G_i/L_i); \\ Y_{0i} &= Y_{i+1} G_i/L_i + Y_i(1 - G_i/L_i). \end{aligned} \quad (8)$$

Координаты гипоцентра могут быть найдены по выражениям:

$$\begin{aligned} X &= \frac{R_{o2}^2 Y_{o3} - Y_{o3} X_{o2}^2 - Y_{o3} Y_{o2}^2 + Y_{o2} X_{o3}^2 + Y_{o3}^2 Y_{o2} + R_{o1}^2 Y_{o2} - R_{o3}^2 Y_{o2} - R_{o1}^2 Y_{o3}}{2(Y_{o2} X_{o3} - X_{o2} Y_{o3})} + X_{o1}; \\ Y &= \frac{R_{o2}^2 X_{o3} - X_{o3} Y_{o2}^2 - X_{o3} X_{o2}^2 + X_{o2} Y_{o3}^2 + X_{o3}^2 X_{o2} + R_{o1}^2 X_{o2} - R_{o3}^2 X_{o2} - R_{o1}^2 X_{o3}}{2(X_{o2} Y_{o3} - Y_{o2} X_{o3})} + Y_{o1}; \\ Z &= \sqrt{R_{ji}^2 - X^2 - Y^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для проверки адекватности работы предлагаемой модели был проведен машинный эксперимент, где были заданы координаты сейсмодатчиков: $X_1 = 10$ км; $Y_1 = 10$ км; $X_2 = 110$ км; $Y_2 = 10$ км; $X_3 = 60$ км; $Y_3 = 96$ км и гипоцентра землетрясения $X = 60$ км; $Y = 53$ км; $Z = 30$ км.

При моделировании к значениям разностей времен прихода сейсмической волны к двум сейсмодатчикам и разностям времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн к сейсмодатчикам были добавлены преднамеренные ошибки, равные 0,5 секундам, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Результаты моделирования показали, что среднее значение ошибки определения координат гипоцентра землетрясения с использованием различных методов равно 2,17 км.

Обсуждение результатов. Большая ошибка в измерении координат гипоцентра землетрясения (2,17 км.) вызвана с использованием в окончательном расчете метода сфер [8-10], что из-за относительно малой глубины очага приводит к значительным ошибкам.

Ошибка может быть уменьшена заменой в окончательном расчете сферы другими фигурами вращения с использованием центров окружностей как новых фокусов.

Таким образом, используя по обстоятельствам различные кривые можно использовать многократно метод окружностей. Основные точностные характеристики метода окружностей соответствуют характеристикам пар кривых n -ого порядка, которые используются для двух сейсмодатчиков.

Вывод. Необходимость дополнительного построения сфер с центрами в центрах окружностей, вместо непосредственного нахождения точки пересечения окружностей, вызвана тем, что из-за ошибок в измерении времени прихода сейсмических волн, такой точки, на практике, может не оказаться.

При использовании метода окружностей, формирование сфер через центр окружности необходимо в связи с наличием ошибок при измерении разности времен прихода сейсмических волн к сейсмодатчику и разности времен прихода сейсмической волны к разнесенным сейсмодатчикам. Это приводит к тому, что окружности не пересекаются, для чего и формируются сферы.

Одним из положительных эффектов, которое позволяет реализовать предлагаемый метод, это возможность оценки точности определения расстояния от сейсмодатчика до гипоцентра землетрясения с использованием разных фигур вращения для одной и той же пары сейсмодатчиков.

Предлагаемый метод дает возможность определить координаты очага землетрясения позволяет в случае, когда отсутствует информация об одном из двух типов волн [14-20] на более чем одном сейсмодатчике. В этом случае используется расстояние, определенное при помощи сейсмодатчика, на котором есть информация о двух типах волн, с добавлением разности времен прихода сейсмической волны на разнесенные в пространстве сейсмодатчики помноженное на известные скорости сейсмических волн.

Предлагаемый метод позволяет осуществить оптимальный выбор сейсмодатчиков при использовании для нахождения координат гипоцентра землетрясения фигур второго и четвертого порядков.

Библиографический список:

1. 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; опубли. 09.06.17.
2. Асланов Т.Г., Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сферы, гиперболоида и эллипсоида // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017660545 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017615709; заявл. 13.06.17; опубли. 22.09.17.
3. 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>
4. 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>
5. 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
 6. 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
 7. 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>
 8. 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
 9. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., Кудаев Д.А. Определение скоростей сейсмических волн по произошедшему землетрясению // XXXVI итоговая научно-техническая конференция ДГТУ: тезисы докладов. Махачкала, РИО ДГТУ, 2005. – С. 72-73
 10. 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.
 11. 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.
 12. Конев В.В. Линейная алгебра. Учебное пособие. – Томск. Изд. ТПУ. 2008 – 65 стр.
 13. 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
 14. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3.
 15. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. – 154 p.
 16. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. –272 p.
 17. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. — 298 p.
 18. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.
 19. 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.
 20. 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.

References:

1. 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; app. 02/13/17; publ. 09.06.17. (In Russ)
2. Aslanov T.G., Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter using the combined method of a 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; app. 06/13/17; publ. 09/22/17. (In Russ)
3. Shakhhtar 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. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2019; 46 (4): 134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142> (In Russ)
4. Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source using the combined method. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2017; 44 (2): 118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125> (In Russ)

5. 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; 11(72): 503-509 (In Russ)
6. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Dependence of errors in determining the coordinates of an earthquake source on calculation methods (spheres and hyperboids). [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2017; 4 (44): 87-98 (In Russ)
7. 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. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46 (2): 61-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70> (In Russ)
8. 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)
9. 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)
10. 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. [Trudy Instituta geologii DNTS RAN] *Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010. No. 56. C. 54-59. (In Russ)
11. 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 VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2016619293; app. 09/02/16; publ. 10/31/16.
12. Konev V.V. Linear algebra. Tutorial. Tomsk. Ed. TPU. 2008; 65 (In Russ)
13. Analytical geometry and linear algebra: textbook. allowance / A. E. Umnov. - 3rd ed., Rev. and add. -. M.: MIPT, 2011; 544. ISBN 978-5-7417-0378 (In Russ)
14. Robert Garotta. Shear waves: from registration to interpretation. Short course of lectures for higher educational institutions, 2000 Series No. 3
15. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster - University of Utah, 2007; 154.
16. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara - Cambridge University Press, 1981; 272.
17. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett. Australian National University Press, 2009; 298.
18. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013; 300.
19. Blas E. A., Sereda A.-V. I. Determination of P-and S-wave reflection coefficients from P-wave seismograms. [Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta] *Bulletin of the Murmansk State Technical University*. 2006; 9(3): 389-402. (In Russ)
20. Yetirmishli G.D., Kazymova S.E., Kazymov I.E. Studying the change 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 RAS, 2008; 54-57. (In Russ)

Сведения об авторах:

Асланов Гайдарбек Кадырбекович, доктор технических наук, профессор; e-mail: uits@dstu.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, докторант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: tabasik@gmail.com

Information about the authors:

Gaydarbek K. Aslanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., e-mail: uits@dstu.ru.

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

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.08.2021.

Одобрена после рецензирования / Revised 30.08.2021.

Принята в печать / Accepted for publication 02.09.2021.