Для цитирования: Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов. Определение среднего значения ошибки в вычислении координат эпицентра землетрясения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(2): 20-28. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-20-28

For citation: G.K. Aslanov, T.G. Aslanov. Average error determination in the calculation of earthquake epicenter coordinates. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (2): 20-28. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-20-28

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-20-28

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ОШИБКИ В ВЫЧИСЛЕНИИ КООРДИНАТ ЭПИЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является определение зависимости среднего значения ошибки в вычислении координат эпицентра землетрясения от ошибок измерения скоростей сейсмических волн для различных методов локализации сейсмических событий, а также определение распределения ошибок для метода определения координат гипоцентра землетрясения с использованием овала Кассини. **Метод.** Задача решена с использованием статистических методов: частотного и регрессионного анализов, метода сравнения средних, а также перебора по сетке. **Результат.** Установлена связь между точностью измерения скоростей сейсмических волн при определении координат эпицентра землетрясения для четырех различных методов вычисления координат гипоцентра землетрясения. Предложен метод определения координат гипоцентра землетрясения с использованием фигуры четвертого порядка овала Кассини. Осуществлено сравнение плотности распределения ошибок метода овала Кассини по сравнению с другими методами. **Вывод.** Полученные результаты позволяют осуществить выбор того или иного метода вычисления координат гипоцентра исходя в зависимости от конкретной местности, в которой произошло сейсмическое событие и мест размещения сейсмических датчиков.

Ключевые слова: сейсмология, сейсмодатчик, сейсмическая волна, скорость, распределение ошибок, структура земли

AVERAGE ERROR DETERMINATION IN THE CALCULATION OF EARTHQUAKE EPICENTER COORDINATES

G.K. Aslanov, T.G. Aslanov

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

Abstract. Objective. The study is aimed at determining the dependence of the average error in calculating the epicenter coordinates of an earthquake on errors in measuring the velocities of seismic waves for various methods of seismic event localization. Error distribution investigation for the method for determining the earthquake hypocenter coordinates using the Cassinian oval. **Methods.** The problem was solved using statistical methods: methods of frequency and regression analyzes, means comparison method, and uniform search method. **Results.** A relationship between the accuracy of measuring the velocities of seismic waves when determining the coordinates of an earthquake epicenter were established for four different earthquake hypocenter coordinates calculation methods. A method for determining the earthquake hypocenter coordinates using the fourth-order figure of the Cassinian oval was proposed. The error distribution density of the Cassinian oval method was compared with the ones of other methods. **Conclusion.** The results obtained make it possible to choose one

or another method for calculating the hypocenter coordinates depending on the specific area in which a seismic event occurred and the locations of seismic sensors.

Keywords: seismology, seismic sensor, seismic wave, velocity, error distribution, earth structure

Введение. В настоящее время определение координат очага землетрясения производится с использованием усредненных значений скоростей сейсмических волн для исследуемого региона [1-5]. Причем, эти значения применяются для больших участков земли [6], что приводит к ошибкам в определении координат гипоцентра землетрясения, что в свою очередь приводит к значительным ошибкам в оценке человеческих жертв.

Существует много методов определения координат гипоцентра землетрясения [7-12], и перед сейсмологом стоит нелегкая задача, в выборе конкретных сейсмических датчиков на местности, [13-16], так как при использовании одних и тех же сейсмодатчиков различные методы дают различные ошибки. Приведены графики, зависимости ошибки в определении координат эпицентра землетрясения от средних ошибок определения скоростей сейсмических волн.

Постановка задачи. Для моделирования задавался участок земли в виде куба, с ребром длиной 160 километров, который в свою очередь был разделен на 125 кубиков с ребрами, равными 32 км. Координаты гипоцентра землетрясения и мест расположения трех сейсмодатчиков задавались случайным образом. На каждом из участков также задавались разные значения скоростей сейсмических волн из допустимых пределов.

По этим исходным данным для четырех различных методов определения координат гипоцентра землетрясения решалась задача на выявление зависимости ошибки определения координат эпицентра землетрясения от разниц между используемыми в расчетах скоростей сейсмических волн и их фактическими значениями (ошибок скоростей сейсмических волн)

Методы исследования. Для проведения исследований была задана область объемом 4096000 кубических километра ($160 \times 160 \times 160 \text{ км}^3$), которая разбита на 125 равных участков ($5 \times 5 \times 5$), с ребрами, равными 32 км.

Скорости распространения сейсмических волн в каждом из этих участков отличаются друг от друга. Координаты гипоцентра землетрясения: $X = 80$; $Y = 80$; $Z = 30$. При этом, по принятой в настоящее время методике, для определения координат очага скорость продольной сейсмической волны при расчетах принималась равной 6 км/с, а отношение скорости продольной сейсмической волны к поперечной равно 1,7.

Сейсмодатчики могут располагаться в одних из заранее выбранных ста различных точках, определяемых формулой:

$$\begin{aligned} X_s &= \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}; \\ Y_s &= \frac{R}{2MS} + \frac{R(k-1)}{MS}, \end{aligned} \quad (1)$$

где X_s, Y_s – абсцисса и ордината сейсмодатчиков соответственно;

R – длина исследуемой области;

M – число участков, на которые разбит исследуемый участок с одинаковой скоростью;

S – число шагов внутри участка с одинаковой скоростью для размещения сейсмодатчиков и гипоцентров землетрясений;

n, k – переменные, изменяющиеся в интервале от 1 до 10.

Определим координаты точек пересечения линий, соединяющих очаг с сейсмодатчиками, с границами каждого из 125 участков, по оси абсцисс:

$$XP_i = \frac{Rk}{M}; \quad YP_i = \left(\frac{Rk}{M} - X_0 \right) \frac{Y_s - Y_0}{X_s - X_0} + Y_0; \quad ZP_i = \left(\frac{Rk}{M} - X_0 \right) \frac{Y_s}{X_s - X_0}, \quad (2)$$

по оси ординат:

$$XP_i = \left(\frac{Rk}{M} - Y_0\right) \frac{X_s - X_0}{Y_s - Y_0} + X_0; \quad YP_i = \frac{Rk}{M}; \quad ZP_i = \left(\frac{Rk}{M} - Y_0\right) \frac{X_s}{Y_s - Y_0}, \quad (3)$$

по оси Z (глубина):

$$XP_i = \left(\frac{Rk}{M} - Y_0\right) \frac{X_s - X_0}{Z_s} + X_0; \quad YP_i = \left(\frac{Rk}{M} - X_0\right) \frac{Y_s - Y_0}{Z_s} + Y_0; \quad ZP_i = \frac{Rk}{M}. \quad (4)$$

где k – номер границы пересечений;

i – переменная, изменяющаяся в интервале от 2 до $n-1$.

Зная точки пересечения сейсмической волны с ячейкой и скорость распространения сейсмической волны в каждой ячейке, можно вычислить время прохождения сейсмической волны через эту ячейку.

Суммарное время прохождения сейсмической волны от очага землетрясения до сейсмодатчика t_i может быть определено как сумма времен прохождения сейсмической волны через соответствующие ячейки.

По известному расстоянию от гипоцентра землетрясения до i -ого сейсмодатчика R_i и суммарного времени t_i может быть определена средняя скорость распространения продольной сейсмической волны от очага землетрясения до сейсмодатчика V_{pi} и скорость поперечной волны V_{si} через коэффициент пропорциональности $k = 1.7$.

Разность времен прихода продольной сейсмической волны к двум разнесенным на местности сейсмодатчикам t_r могут быть вычислены как соответствующая разность суммарных времен прохождения сейсмической волны от очага землетрясения до первого t_1 и второго сейсмодатчиков t_2 .

Разность времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн к i -ому сейсмодатчику может быть определена с помощью уравнения [17]:

$$\Delta t_i = 0.7R_i/V_{pi}.$$

Расчеты проводились для четырех методов определения координат гипоцентра землетрясения на основе использования различных фигур второго и четвертого порядков.

1. По методу сфер координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по следующим выражениям [17-18]:

$$\begin{cases} X_0 = \frac{Y_3(R_2^2 - X_2^2 - Y_2^2) - Y_2(R_3^2 - X_3^2 - Y_3^2) + R_1^2(Y_2 - Y_3)}{2(Y_2X_3 - Y_3X_2)} \\ Y_0 = \frac{X_3(R_2^2 - Y_2^2 - X_2^2) - X_2(R_3^2 - Y_3^2 - X_3^2) + R_1^2(X_2 - X_3)}{2(X_2Y_3 - X_3Y_2)} \\ Z_0 = \sqrt{R_1^2 - X_0^2 - Y_0^2} \end{cases} \quad (5)$$

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

2. По методу сфер и гиперboloида координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по следующим выражениям [19]:

$$\begin{cases} X_0 = \frac{X_2^2(V_p - V_s) - t_r^2 V_p^3 + t_r^2 V_p^2 V_s - 2t_r V_p^2 V_s \Delta t_1}{2X_2(V_p - V_s)} \\ Y_0 = \frac{(X_3 - X_0)^2 + Y_3^2 + R_1^2 - X_0^2 - R_3^2}{2Y_3} \\ Z_0 = \sqrt{R_1^2 - X_0^2 - Y_0^2} \end{cases} \quad (6)$$

3. По методу сферы гиперboloида и эллипсоида координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по следующим выражениям [20]:

$$\begin{cases} X_0 = \frac{C_u(X_2^2 - t_r^2 V_p^2)}{2(t_r V_p + X_2 C_u)}; \\ Y_0 = \frac{(X_3 - X_0)^2 + Y_3^2 + R_e^2 - X_0^2 - R_3^2}{2Y_3}; \\ Z_0 = \sqrt{R_1^2 - X_0^2 - Y_0^2}, \end{cases} \quad (7)$$

где $R_e = \frac{X_2^2 - t_r^2 V_p^2}{2(t_r V_p + X_2 C_u)};$
 $C_u = \frac{k((\Delta t_1 + \Delta t_2)(X_2^2 - t_r^2 V_p^2)(1-k) - t_r k V_p^2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)^2) + t_r X_2^2 (1-k)^2}{V_p X_2 (k^2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)^2 - t_r^2 (1-k)^2)}.$

4. По методу овала Кассини координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по следующим выражениям [13]:

$$\begin{cases} X = \frac{A_c^2 C_c^2 - A_c^4}{\sqrt{C_c^2 \cos^2 \alpha - A_c^2}} \cos \alpha + C_c; \\ Y = \frac{X_3^2 + Y_3^2 + R_1^2 - X^2 - R_3^2}{2Y_3}; \\ Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2}, \end{cases} \quad (8)$$

где $A_c = t_r V_1 / 2; C_c = X_2 / 2; D_c = \sqrt{R_1 R_2};$
 $\alpha = \arccos\left(\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right) / 2;$
 $a = C_c^4 (2A_c^2 - C_c^2)^2 - D_c^4;$
 $b = 2C_c^2 (D_c^4 - 2A_c^4 + C_c^2 (2A_c^2 - C_c^2))^2 (2A_c^2 - C_c^2);$
 $c = 4A_c^4 (A_c^2 - C_c^2)^2 + (C_c^4 - D_c^4) (2A_c^2 - C_c^2)^2.$

При этом для упрощения расчетов первый сейсмодатчик всегда находится в начале координат и во всех методах, использующих для определения координат очага землетрясения фигуру второго порядка – гиперboloид, система координат развернута таким образом, что второй сейсмодатчик лежит на оси абсцисс.

Результаты моделирования приведены на рис.1. Здесь, по оси абсцисс откладываются разности между используемыми в расчетах и истинными значениями (погрешности) скоростей сейсмических волн, определяемых выражением:

$$\Delta V = 6 - (V_{p1} + V_{p2} + V_{p3}) / 3$$

По оси ординат откладывается среднее значение ошибки в определении эпицентра землетрясения, определяемой выражением:

$$\Delta R = \sum_{i=1}^N \left| \sqrt{2} * 80 - \sqrt{X_0^2 + Y_0^2} \right| / N$$

где N число сейсмических событий с заданной погрешностью в измерении скорости.

На рис.1. кривая 1 соответствует методу сфер, кривая 2 – методу сфер и гиперboloида, кривая 3 – методу овала Кассини, кривая 4 – методу сферы гиперboloида и эллипсоида.

Моделирование проведено более чем для 100 различных значений скоростей сейсмических волн. Для овала Кассини была рассчитана плотность распределения ошибки в определении координат очага землетрясения для области с размерами 150 на 150 км, на которой менялось расположение сейсмодатчиков. За координаты гипоцентра землетрясения были приняты $X = 75$ км, $Y = 75$ км, $Z = 10$ км.

Рис. 1. Среднее значение эпицентрального рассогласования

Fig. 1. Average value of epicentral misalignment

На рис. 2 и 3 приведены нормированные плотности распределения ошибки в определении гипоцентра землетрясения. При этом координаты сейсмодатчиков менялись с шагом 18,75 км. Расчеты проводились как с учетом ошибок в измерении времен, так и без него.

Рис. 2. Плотность распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения тремя методами

Fig. 2. Density of distribution of errors in determining the earthquake hypocenter by three methods

На рис. 2, кривой 1 соответствует метод сфер, кривой 2 – комбинированный метод сферы, овала Кассини и гиперboloида. В расчетах ошибки в определении разностей времен прихода сейсмических волн менялись в интервале от - 0.5 до 0.5 с., с шагом 0.25 с.

На рис. 3 приведена нормированная плотность распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения в зависимости от интервалов ошибок в определении разности времен прихода сейсмических волн. Кривая 1 получена при изменении ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн в интервале от - 0.5 до 0.5 с шагом 0.25 с., кривая 2 – для интервала от - 1 до 1 с шагом 0.5 с, кривой 3 – для интервала от - 1.5 до 1.5 с шагом 0.75 с. и кривой 4 – для интервала от - 2 до 2 с шагом 1 с.

Рис. 3. Зависимость плотности распределения ошибок от интервалов ошибок в определении разности времен прихода сейсмических волн

Fig. 3. Dependence of the error distribution density on the error intervals in determining the difference in the arrival times of seismic waves

Обсуждение результатов. Как видно из рис.1, метод сфер имеет лучшие показатели при определении координат гипоцентра землетрясения при некачественном выборе скорости сейсмической волны. Это связано с тем, что при расположении сейсмодатчиков на больших удалениях от эпицентра землетрясения поверхности сфер пересекаются под острыми углами, что приводит к более точному определению координат эпицентра землетрясения, и в то же время возникают большие ошибки в определении глубины гипоцентра землетрясения.

Метод сфер и гиперboloида имеет худшие характеристики, чем метод сферы, гиперboloида и эллипсоида, это связано, как и в первом случае, с углами пересечения поверхностей второго порядка. Сфера, гиперboloид и эллипсоид всегда пересекаются под прямым углом.

Овал Кассини по сравнению с двумя предыдущими методами, показывает лучшие результаты при больших разностях, принятых в расчетах, и истинными значениями сейсмических волн, нежели при маленьких. Это связано с тем, что корень квадратный от произведения расстояний от гипоцентра землетрясения до сейсмодатчиков (характеризующий овал Кассини) является постоянной величиной.

Большие значения ошибок в измерении средних значений эпицентрального рассогласования обусловлены неудачным расположением сейсмодатчиков. Анализ зависимости плотности распределения ошибок определения координат от ошибок в значениях скоростей показывает, что овал Кассини имеет по сравнению с другими методами меньшие ошибки.

Все полученные распределения ошибок имеют вид, близкий к распределению Коши. Всплеск в районе нуля у всех распределений вызван отсутствием ошибок в определении разности времен.

Вывод. При одинаковом удалении сейсмодатчиков от гипоцентра землетрясения, желательно применять метод сфер, с использованием нижнего допустимого значения скорости сейсмической волны для конкретного региона.

При проведении исследования структуры земной коры желательно использовать методы на основе фигуры второго порядка - гиперboloида, т.к. на большом интервале ошибок в значениях скоростей, координаты очага землетрясения определяются с меньшими ошибками. При отклонениях скоростей сейсмических волн в сторону увеличения желательно применение метода овала Кассини.

Библиографический список:

1. Айвазян С.А. Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983.
2. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. М.: ИЛ, 1960.

3. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966.
4. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1991.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Асланов Т.Г., Давудова Д.Д., Мирзаханова Л.С. Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сфер и гиперboloида // 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.
9. Асланов Т.Г., Шахтарин Б.И., Сеферов А.К. Определение координат очага землетрясения методом гиперboloидов // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017617744 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017615713; заявл. 13.06.17; опубл. 11.07.17.
10. Асланов Т.Г., Определение координат очага землетрясения методом эллипсов // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017617620 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017615712; заявл. 13.06.17; опубл. 11.07.17.
11. Асланов Т.Г. Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сферы, гиперboloида 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.
12. Асланов Т.Г., Шахтарин Б.И., Тетакаев У.Р. Определение координат гипоцентра землетрясения методом окружностей // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2020612122 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ДГТУ. № 2019665254; заявл. 26.11.2019; опубл. 18.02.2020.
13. 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>
14. 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>
15. 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 гиперboloидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>
16. 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
17. 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
18. 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.
19. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Зависимость ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперboloидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №4 (44), 2017. С. 87-98
20. 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. Ayvazyan S.A. Yenyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika. Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh. M.: Finansy i statistika, 1983. [Ayvazyan S.A. Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Applied statistics. Basics of modeling and primary data processing. - M.: Finance and Statistics, 1983. [(In Russ)]

2. Van der Varden B.L. Matematicheskaya statistika. M.: IL, 1960. [Van der Waerden B.L. Mathematical statistics. - M.: IL, 1960. [(In Russ)]]
3. Kendall M., St'yuart A. Teoriya raspredeleniy. M.: Nauka, 1966. [Kendall M., Stewart A. Distribution theory. - M.: Nauka, 1966. [(In Russ)]]
4. Kolemeyev V.A., Staroverov O.V., Turundayevskiy V.B. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. – M.: Vysshaya shkola, 1991. [Kolemaev VA, Staroverov OV, Turundaevsky VB. Theory of Probability and Mathematical Statistics. M.: Higher school, 1991. [(In Russ)]]
5. Blyas E. A., Sereda A.-V. I. Opredeleniye koeffitsiyentov otrazheniya prodol'nykh i poperechnykh voln po seysmogrammam prodol'nykh voln // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. T. 9. № 3. С. 389-402. [Blas E. A., Sereda A.-V. I. Determination of P-and S-wave reflection coefficients from P-wave seismograms // Bulletin of the Murmansk State Technical University. 2006. Vol. 9. No. 3. pp. 389-402. [(In Russ)]]
6. Yetirmishli G. D., Kazymova S. E., Kazymov I. E. Izucheniye izmeneniya skorostey prodol'nykh voln s glubiny po tsifrovym seysmologicheskim dannym // Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy III Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly. Obninsk: GS RAN, 2008. s. 54-57. [Etirmishli GD, Kazymova SE, Kazymov IE Study of changes in the velocities of longitudinal waves with depth from digital seismological data // Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the III International Seismological School. Obninsk: GS RAS, 2008. pp. 54-57. [(In Russ)]]
7. [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. [(In Russ)]]
8. Aslanov T.G., Tagirov KH.YU., Magomedov G.B. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s odnovremennym opredeleniyem skorostey seysmicheskikh voln s ispol'zovaniyem dannykh chetyrekh i boleye seysmодatchikov [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)]]
9. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Seferov A.K. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya metodom giperboloidov [Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Seferov A.K. Determination of the coordinates of the earthquake source by the method of hyperboloids // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017617744 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017615713; declared 06/13/17; publ. 07/11/17. [(In Russ)]]
10. Aslanov T.G., Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya metodom ellipsov [Aslanov TG, Determination of the coordinates of the earthquake source by the method of ellipses // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017617620 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017615712; declared 06/13/17; publ. 07/11/17. [(In Russ)]]
11. Aslanov T.G., Opredeleniye koordinat gipotsentra zemletryaseniya pri ispol'zovanii kombinirovannogo metoda sfery, giperboloida i ellipsoida [Aslanov TG, 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)]]
12. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Tetakayev U.R. Opredeleniye koordinat gipotsentra zemletryaseniya metodom okruzhnostey [Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Tetakaev U.R. Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter by the method of circles // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2020612122 Ros. Federation / applicant and copyright holder of DSTU. No. 2019665254; declared 11/26/2019; publ. 02/18/2020. [(In Russ)]]
13. Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakayev U.R. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur chetvertogo i vtorogo poryadka – ovala Kassini i giperboly. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2019;46(4):134-142. [Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola. Herald of 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)]]
14. Aslanov T.G. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem kombinirovannogo metoda. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2017;44(2):118-125. [Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source using the combined method. Herald of 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)]]
15. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Issledovaniye zavisimosti oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya ot metodov rascheta (sfer i giperboloidov). Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2017;44(4):87-98. [Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Investigation of the dependence of errors in determining the coor-

- dinates of an earthquake source on calculation methods (spheres and hyperboloids). Herald of 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)]
16. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur vtorogo poryadka - ellipsa i giperboly // Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii. 2018; №11 (72) – S. 503-509 [Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the second order - an ellipse and a hyperbola // Automation. Modern technologies. 2018; No. 11 (72) pp. 503-509[(In Russ)]
 17. Aslanov T.G. Razrabotka algoritma opredeleniya koordinat ochaga zemletryaseniya, s odnovremennym opredeleniyem skorostey seysmicheskikh voln [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 pp. 32-34[(In Russ)]
 18. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kudayev D.A. Opredeleniye skorostey seysmicheskikh voln po proizoshedshemu zemletryasenyu // XXXVI itogovaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya DGTU: tezisy dokladov. Makhachkala, RIO DGTU, 2005. – S. 72-73 [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. pp. 72-73[(In Russ)]
 19. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Zavisimost' oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya ot metodov rascheta (sfer i giperboloidov). Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. №4 (44), 2017 S. 87-98 [Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Dependence of errors in determining the coordinates of the earthquake source on the calculation methods (spheres and hyperboloids). Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. No. 4 (44), 2017 - Makhachkala: DSTU, 2017. pp. 87-98 (In Russ)]
 20. Aslanov T.G., Musayeva U.A. Analiz plotnosti raspredeleniya oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya po metodam sfer i ellipsoidov. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2019;46(2):61-70 [Aslanov T.G., Musayeva U.A. Analysis of the distribution density of errors in determining the coordinates of the earthquake source by the methods of spheres and ellipsoids. Herald of 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:

Асланов Гайдарбек Кадырбекович, доктор технических наук, профессор, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: uits@dstu.ru

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

Information about the authors:

Gaydarbek K. Aslanov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: uits@dstu.ru.

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

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.03.2021.

Принята в печать 22.04.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.03.2021.

Accepted for publication 22.04.2021.