

**Для цитирования:** Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Аномальные ошибки в определении координат очага землетрясений и предложения по их устранению. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(4): 78-88. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88

**For citation:** Aslanov G.K., Aslanov T.G., Musaeva U.A. Anomalous errors in determining focus coordinates earthquakes and suggestions for their elimination. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (4): 78-88. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.016

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88

### АНОМАЛЬНЫЕ ОШИБКИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИХ УСТРАНЕНИЮ

Асланов Г.К.<sup>1</sup>, Асланов Т.Г.<sup>2</sup>, Мусаева У.А.<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1-3</sup> 367026, г. Махачкала, пр.И.Шамиля, 70, Россия,

<sup>1</sup> e-mail: uits@dstu.ru, <sup>2</sup> e-mail: tabasik@gmail.com, <sup>3</sup> e-mail: uma9@list.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка метода оценки скоростей сейсмических волн по различным направлениям их распространения, а также уменьшение ошибки в определении координат очага землетрясения за счет учета габаритов очага. **Метод.** В работе приводится метод, позволяющий оценить скорости сейсмических волн по различным направлениям распространения и/или габариты очага землетрясения и за счет учета габаритов очага уменьшить ошибку в определении координат гипоцентра. Для нахождения гипоцентра землетрясения используются данные разности времен прихода сейсмических волн на сейсмодатчики и ошибка в определении разности времен. По данным сейсмодатчика определяются координаты гипоцентра с учетом ошибок и использованием комбинаций с различных комбинаций сейсмодатчиков. Обработкой полученного массива координат производится оценка скоростей сейсмической волн/или определяется пространственная форма очага землетрясения и координаты гипоцентра. По координатам киноцентра корректируются разности времен пробега сейсмических волн и уточняются расстояния до сейсмодатчиков. **Результат.** После предварительного определения координат и формы очага землетрясения при наличии большого количества сейсмодатчиков имеется возможность уточнить координаты гипоцентра землетрясения с учетом рекомендаций приведенных в работе. **Вывод.** Использование предложенного метода подразумевает наличие большого количества датчиков для определения сложной формы, очага землетрясения.

**Ключевые слова:** землетрясение, сейсмодатчик, сфера, уравнение, ошибка.

## ANOMALOUS ERRORS IN DETERMINING FOCUS COORDINATES EARTHQUAKES AND SUGGESTIONS FOR THEIR ELIMINATION

Gaidarbek K.Aslanov<sup>1</sup>, Tagirbek G. Aslanov<sup>2</sup>, Uma A.Musaeva<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>1-3</sup>70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: uits@dstu.ru, <sup>2</sup>e-mail: tabasik@gmail.com, <sup>3</sup>e-mail: uma9@list.ru

**Abstract Objectives** The aim of the study is to develop a method for estimating the speed of seismic waves in different directions of propagation and by taking into account the dimensions of the focus, reducing the error in determining the coordinates of the hypocenter. **Method** To find the hypocenter of the earthquake, the data of the seismic wave velocities, the differences in the times of arrival of seismic waves on seismic sensors and the error in determining the time difference are used. The data with an error determine the coordinates of the hypocenter using information from various combinations of seismic sensors. Processing the resulting array of coordinates, estimates the seismic wave velocities / or determines the spatial shape of the earthquake source and the coordinates of the hypocenter. According to the coordinates of the cinema center, the differences in the travel time of seismic waves are corrected and the distances to the seismic sensors are refined. **Results** After preliminary determination of the coordinates and shape of the earthquake source, if there are a large number of seismic sensors, it is possible to clarify the coordinates of the earthquake hypocenter taking into account the recommendations given in the works. **Conclusion** Using the proposed method implies the presence of a large number of sensors to determine the complex shape, the earthquake source.

**Keywords:** earthquake, seismic sensor, sphere, equation, error.

**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.

В частности, потери во время Иранского землетрясения (с эпицентром в районе г. Бам 2004 году) Федеральным центром науки МЧС России были оценены как без потерь, хотя потери были. Ошибка возникла в связи с тем, что геофизическими службами Ирана глубина очага была определена неверно (сначала считалось, что глубина равна 33 км, а в последующем - 15,13 км). После корректировки величины глубины очага землетрясения в исходных данных в программе, расчетные потери были оценены в количестве 30 000 человек. При этом фактические потери были равны 35 000 человек, поэтому возникла необходимость выполнения этой работы, позволяющей определить координаты гипоцентра, с точностью, превосходящей существующие аналоги.

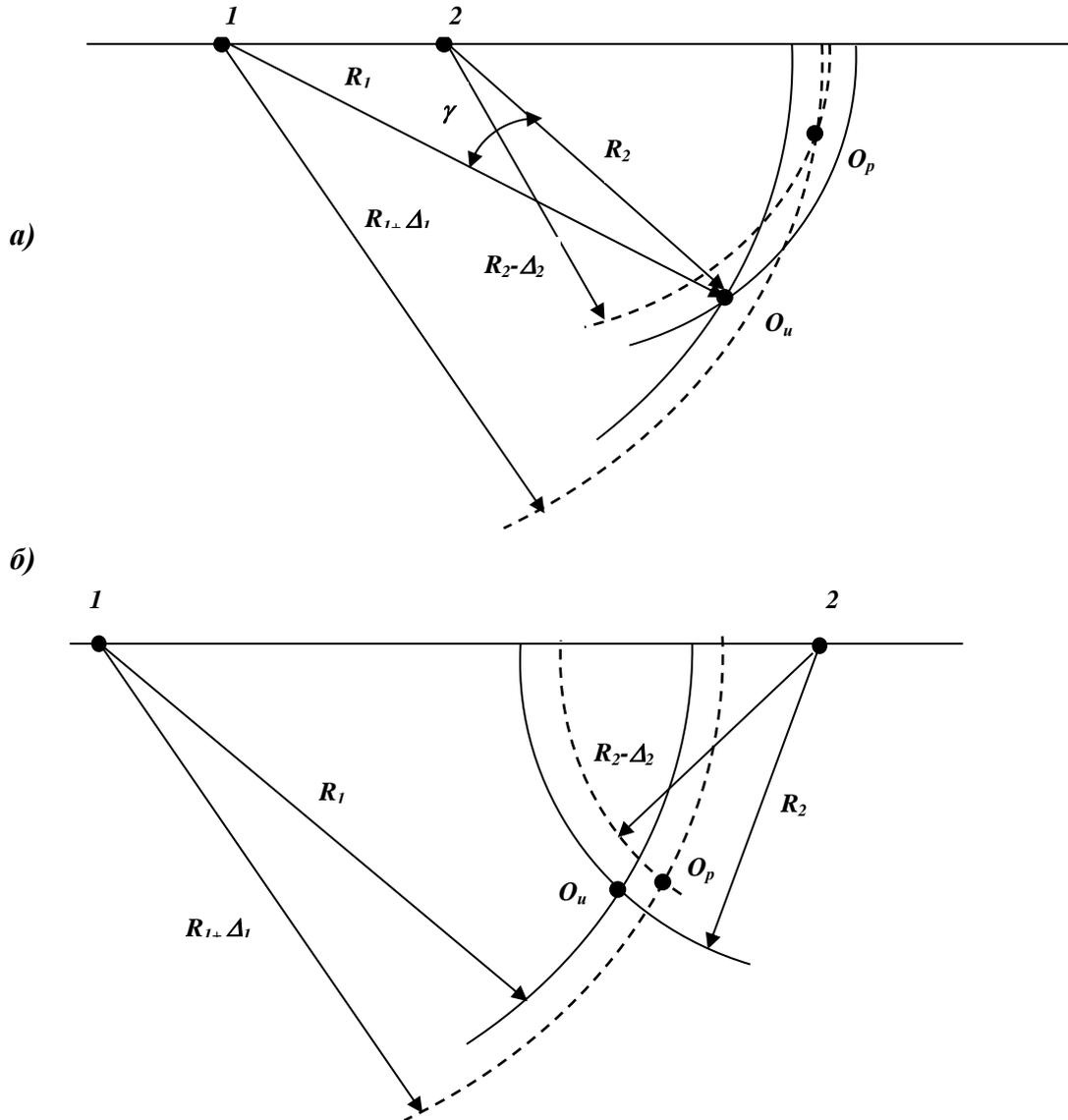
**Постановка задачи.** Определение координат очага землетрясения, в основном, производится по разности времен пробега поперечной и продольной сейсмических волн к сейсмодатчикам.

Основными причинами возникновения ошибок в определении координат очага землетрясения являются влияние на точность определения глубины очага землетрясения взаимного расположения сейсмодатчиков и очага.

Рис. 1 поясняет влияние на точность определения глубины очага землетрясения от взаимного расположения сейсмодатчиков и очага.

Здесь, для удобства анализа сказанного, рассмотрен случай, когда очаг землетрясения и два сейсмодатчика лежат на одной плоскости, например  $XZ$ .

На рис.1 через  $R_1$  и  $R_2$  обозначены соответственно, расстояния от сейсмодатчиков 1 и 2 до очага землетрясения,  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – погрешности определения расстояний  $R_1$  и  $R_2$ , возникающие при их расчете по временам задержки сейсмических волн;  $O_u$  и  $O_p$  - соответственно, истинное и расчетное местоположения очага землетрясения;  $\gamma$  - угол между направлениями на очаг землетрясения от сейсмодатчиков 1 и 2.



**Рис.1. К пояснению причин возникновения ошибок в определении глубины очага землетрясения**  
**Fig.1. To clarify the causes of errors in determining the depth of the earthquake source**

Анализ рис. 1 показывает, что погрешность в определении глубины очага землетрясения тем выше, чем меньше угол  $\gamma$ . А это происходит, когда все сейсмодатчики находятся по одну сторону от очага землетрясения.

На рис. 1 а) приведен пример, когда оба сейсмодатчика находятся по одну сторону от очага землетрясения, а на рис. 1 б) по разные стороны.

Другой причиной возникновения аномальных ошибок является неверный выбор по сейсмограмме начала отсчета возникновения сейсмической волны.

По используемым сейсмологами методикам, при расчете координат очага землетрясения гипоцентр принимается за материальную точку, структура земли считается однородной, а скорости сейсмических волн считаются известными.

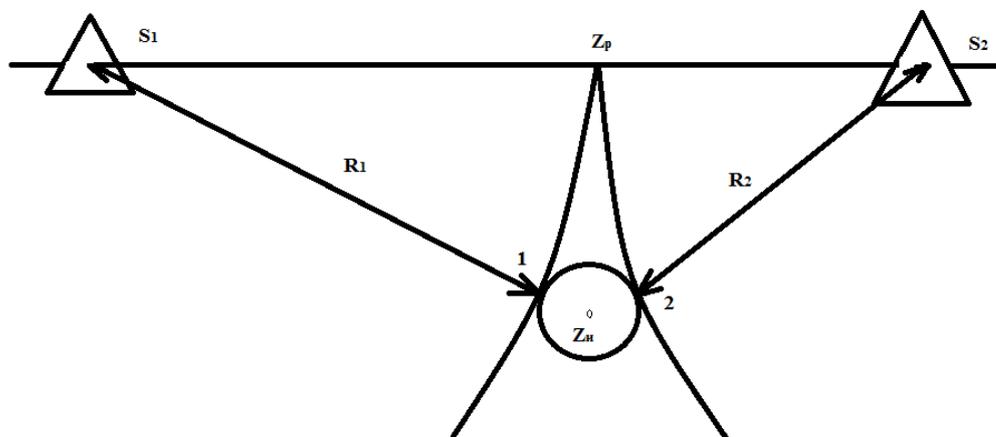
В работе приводится метод, позволяющий оценить скорости сейсмических волн по различным направлениям распространения и/или габариты очага землетрясения и за счет учета габаритов очага уменьшить ошибку в определении координат гипоцентра.

Для нахождения гипоцентра землетрясения используются данные скоростей сейсмических волн, разности времен прихода сейсмических волн на сейсмодатчики и ошибка в определении разности времен. По данным с ошибкой определяются координаты гипоцентра с использованием информации с различных комбинаций сейсмодатчиков. Обработкой полученного массива координат производится оценка скоростей сейсмической волн/или определяется пространственная форма очага землетрясения и координаты гипоцентра. По координатам гипоцентра корректируются разности времен пробега сейсмических волн и уточняются расстояния до сейсмодатчиков.

**Методы исследования.** При определении координат очага землетрясения время прихода волны определяется по сейсмограмме по фронту волны. Но данный метод приводит к ошибкам, связанным с определением глубины очага землетрясения.

Рассмотрим пример, когда два сейсмодатчика  $S_1$  и  $S_2$ , а также очаг землетрясения  $Z_H$  располагаются на вертикальной плоскости.

На рис. 2 приведен случай, когда форма очага землетрясения представляет собой шар. Очевидно, в этом случае волна до первого сейсмодатчика сначала дойдет до точки 1, в то же время как на второй сейсмодатчик из точки 2. Это приводит к тому, что расстояния  $R_1$  и  $R_2$  до очага землетрясения  $Z_H$  вычислены с ошибкой, и глубина очага определяется с погрешностью в точке  $Z_p$



**Рис. 2. Влияние размеров очага землетрясения на точность определения гипоцентра землетрясения**

**Fig. 2. The influence of the size of the earthquake focus on the accuracy of determining the hypocenter of the earthquake**

Другой причиной неверного определения координат гипоцентра может быть неверное задание в исходных данных скоростей сейсмических волн для данного региона.

Тогда длина отрезка от точки 1 до  $Z_H$  будет являться образованной из-за неверно заданных скоростей для определения расстояния до сейсмодатчика  $S_1$ , а отрезок от точки 2 до  $Z_H$  будет являться невязкой до сейсмодатчика  $S_2$ .

Поэтому целесообразнее использование центра масс шара в качестве точки, от которой следует определять расстояние до сейсмодатчиков.

Для удобства рассуждений рассмотрим задачу на горизонтальной плоскости. В связи с тем, что методика решения задач невязки скоростей и формы очага идентичны, рассмотрим только задачу с определением формы очага.

Так как очаг землетрясения имеет размеры, то к каждому сейсмодатчику, фронт сейсмической волны приходит от ближайшей к нему точки очага, которая является локальным или глобальным максимумом кривой разрывов земной поверхности. При этом возможны два варианта пересечения двух окружностей (определяемых расстояниями от сейсмодатчиков до вышеупомянутых точек). В первом случае оба сейсмодатчика фиксируют сейсмическую волну от одного и того же максимума (от одной и той же точки), во втором случае – сейсмическая волна от двух различных максимумов(точек).

Во втором случае координаты пересечения двух окружностей будут располагаться на удалении от обоих локальных максимумов.

Для определения координат локальных максимумов необходимо ввести третий сейсмодатчик. Если третий сейсмодатчик расположен между первыми двумя, то в идеальном случае три окружности могут пересекаться в одной точке, что означает, что во все три сейсмодатчика сейсмическая волна пришла от одного и того же локального максимума (в реальности вместо точки будем иметь треугольник).

Если же образуются две точки пересечения, это означает, что обнаружены два локальных максимума. При этом одно из пересечений находится на одном из локальных максимумов. При расположении третьего сейсмодатчика слева или справа от двух других сейсмодатчиков будут фиксироваться соответственно левый и правый локальные максимумы, а также иные локальные максимумы, локализация которых возможна при большом количестве сейсмодатчиков.

Для перехода из плоскости в объем следует сделать несколько замечаний. Во-первых, идентифицировать сейсмические волны из нижней части очага землетрясения невозможно, т.к. первоначально фиксируются колебания с верхней или боковых участков очага землетрясения. Во-вторых, при больших расстояниях от очага землетрясения до сейсмодатчика задачу определения формы очага можно свести к решению задачи на плоскости, т.к. ошибки из-за радиуса не существенны. В-третьих, для получения информации о локальных максимумах гипоцентра, расположенных на вертикальной плоскости, целесообразно использовать удаленные от очага сейсмодатчики.

При определении координат очага в пространстве необходима информация от трех сейсмодатчиков. Принимая один из сейсмодатчиков за опорный, используя теорему пространственную Пифагора, можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} X^2 + Y^2 + Z^2 = R_1^2; \\ (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + Z^2 = R_2^2; \\ (X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + Z^2 = R_3^2. \end{cases} \quad (1)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты очага землетрясения;  $X_2, Y_2, X_3, Y_3$  – координаты сейсмодатчиков;  $R_1, R_2, R_3$  - расстояния от сейсмодатчиков до ближайшего локального максимума очага землетрясения.

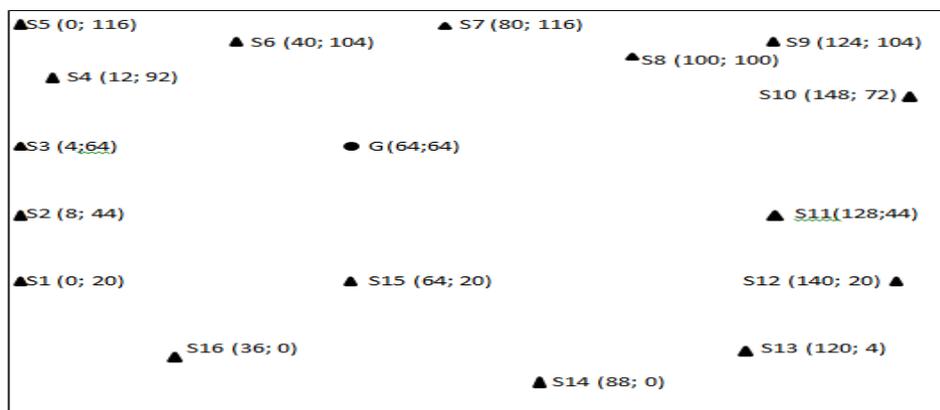
После некоторых преобразований (1) можно записать в виде:

$$\begin{cases} X = \frac{R_2^2 Y_3 - Y_3 X_2^2 - Y_2^2 Y_3 + Y_2 X_3^2 + Y_3^2 Y_2 + R_1^2 Y_2 - R_3^2 Y_2 - R_1^2 Y_3}{2(Y_2 X_3 - X_2 Y_3)}; \\ Y = \frac{X_3 Y_2^2 - R_2^2 X_3 + X_2^2 X_3 - X_2 Y_3^2 - X_3^2 X_2 - R_1^2 X_2 + R_3^2 X_2 + R_1^2 X_3}{2(Y_2 X_3 - X_2 Y_3)}; \\ Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2}. \end{cases} \quad (2)$$

где:  $R_i = t_i V_1 V_2 / (V_1 - V_2)$

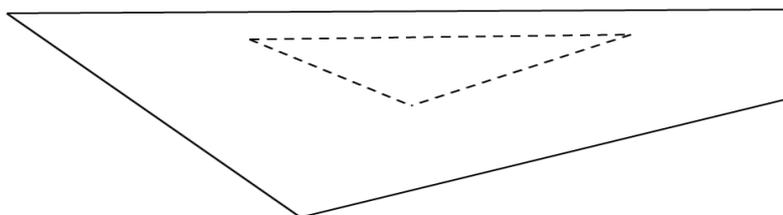
$t_i$  - разность времени регистрации сейсмических волн на  $i$ -ом сейсмодатчике;  $V_1$  и  $V_2$  – скорости продольной и поперечной сейсмических волн.

Для примера зададим форму очага землетрясения, координаты гипоцентра и сейсмодатчиков. Глубину очага землетрясения примем равным 10 км. На рис. 3 показаны расположение эпицентра землетрясения и сейсмодатчиков (в скобках приведены координаты в километрах).



**Рис. 3. Расположение эпицентра землетрясения и сейсмодатчиков**  
**Fig.3. The location of the epicenter of earthquakes and seismic sensors**

При этом форма и координаты землетрясения в горизонтальной плоскости приведены на рис. 4.



**Рис. 4. Координаты и форма очага землетрясения**  
**Fig. 4. The coordinates and shape of the earthquake source**

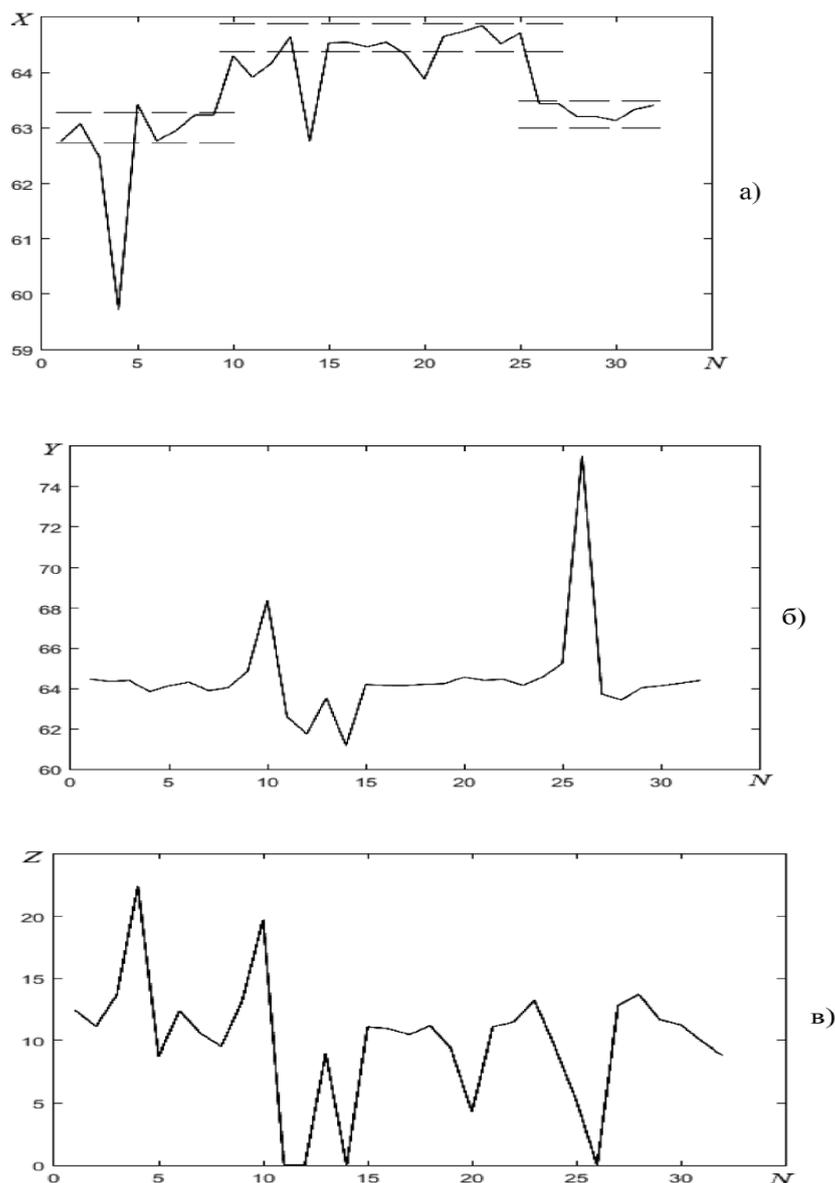
Зададимся значениями ошибок в определении разностей времен прихода сейсмических волн и в соответствии работами [2-3] и по значениям разностей времен прихода сейсмических волн, используя данных трех ближайших, друг относительно друга, сейсмодатчиков, определим координаты очага землетрясения.

На рис. 5 приведены расчетные координаты X, Y и Z для различных комбинаций сейсмодатчиков. При этом ошибка в определении разностей времен пробега сейсмических волн принята равной 0.5 с. На рис. 5а приведены координаты проекций эпицентра землетрясения на ось абсцисс, полученные для различных комбинаций сейсмодатчиков.

На рис.5 выделены три участка, в которых вариации изменения координат очага не превышают значения 0,5 км (выделены пунктирной линией), эти три отрезка определяют границы очага землетрясения. Выделим эти промежутки на оси ординат (рис.5б) и на вертикальной оси (рис.5в).

Найдем средние арифметические значения координат точек, входящих в эти отрезки. Причем в случае выхода координаты какой-либо точки за выделенные пределы они исключаются из рассмотрения (например, отрицательный выброс четвертой комбинации сейсмодатчиков на одной из осей, необходимо исключать из рассмотрения эту комбинацию и на других осях системы координат).

На рис. 5 приведена форма очага землетрясения, в горизонтальной плоскости вычисленная по предложенному методу. Расчетные координаты очага крайних точек очага землетрясения (на рис.5 имеет вид треугольника) G1p (63.056;64.3228), G2p (64.5962;64.3056), G3(63.3070;63.9999)



**Рис.5. Координаты очага землетрясения, вычисленные для различных комбинаций сейсмодатчиков**

**Fig.5. The coordinates of the earthquake source calculated for various combinations of seismic sensors**

Центр масс очага землетрясения рассчитанный по теореме Паппа-Гульдина —  $X = 63,8225$  км,  $Y = 64,6455$  км. Расчетная глубина очага землетрясения —  $11,2041$  км.

**Обсуждение результатов.** В результате выполненной работы предложен метод, позволяющий оценить значения скоростей сейсмических волн по различным направлениям от очага землетрясения, оценить формы и координаты очага землетрясения.

Применение предложенного метода позволяет определять координаты очага землетрясения при отсутствии возможности определять их обычными методами, возникшей из-за специфического расположения очага и сейсмодатчика друг относительно друга (в случаях отсутствия пересечения сфер). Следует отметить, что после предварительного определения координат и формы очага землетрясения при наличии большого количества сейсмодатчиков имеется возможность уточнить координаты гипоцентра землетрясения с учетом рекомендаций приведенных в работах [2, 3].

Использование предложенного метода подразумевает наличие большого количества датчиков для определения сложной формы, очага землетрясения.

При решении задачи оптимального выбора сейсмодатчиков, для определения координат гипоцентра, скоростей сейсмических волн или формы очага землетрясения, задача решается методом итераций, что может потребовать больших затрат времени.

**Вывод.** Результаты исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Во избежание влияния формы очага землетрясения на определении его глубины на рис. 2 сейсмодатчики выбраны на значительном удалении от эпицентра землетрясения, (в данной статье в качестве формы очага рассмотрен плоский горизонтальный четырехугольник).
2. При расчете использован наихудший из вариантов расположения сейсмодатчиков [2] - по одну сторону от эпицентра и в непосредственной близости друг от друга.
3. На рис. 5 а), б) и в) большие всплески обусловлены захватом одним из сейсмодатчиков информации сейсмической волны от другого локального минимума.
4. На рис. 5 в) возникновение нулевых значений глубин очага землетрясения связаны с появлением комплексных корней при расчете.
5. Расстояние между заданными координатами эпицентра землетрясения (центра масс), и расчетными составляет 557,4 м, а разность глубин равна 1204,1 м.
6. Слияние локальных максимумов G2 и G3 на рис. 3, объясняется их относительно близким расположением, и большим разбросом ошибки в определении времен пробега сейсмических волн.

#### **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. 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. N.4 (43), 2016 Махачкала: ДГТУ, 2016. С. 73-84.
3. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. N.2 (44), 2017 — Махачкала: ДГТУ, 2017. С. 118-125.
4. Асланов Г.К., Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г.. Ошибки в определении координат очага аномальных землетрясений. Системные технологии. 2018. № 28. С. 58—64.
5. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А. Сейсмогенная ширина разломной зоны // ДАН. 2011. Т. 437, № 2. С. 254-257.
6. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и области триггерного механизма возникновения землетрясений // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10, № 1 С. 25-37.
7. Садовский М.А., Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О механика блочного горного массива // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 2. С. 306-307.
8. Соболев Г.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // Докл. АН СССР. 1980. Т. 252, № 1. С. 69-71.
9. Grunthal G., Stromeyer D. The recent crustal stress field in Central Europe: Trajectories and finite element modeling // J. Geoph. Res. 1996. V. 80, № 8. P. 11805–11820.v.
10. Iinuma T., et al. Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0)
11. Refined by means of seafloor geodetic data // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. 0740.
12. Ikari M.J., Marone C., Saffer D.M., Kopf A.J. Slip weakening as a mechanism for slow earthquakes // Nature Geosci. 2013. V. 6. P. 468-472.
13. Jafari M.A. Spatial distribution of seismicity parameters in the Persian Plateau // EPS. 2013. V. 65. P. 863-869.
14. Kanamori H, Brodsky E. The physics of earthquakes // Rep.Prog.Phys. 2004. V. 67. P. 1429-1496.
15. Keylis-Borok V.I. On the estimation of the displacement in an earthquake source and source dimensions // Annals of Geophysics. 1959. V. 12, №2. P. 205–214.
16. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismic Picture of a Fault Zone. What Can Be Gained From the Analysis of Fine Patterns of Spatial Distribution of Weak Earthquake Centers? // Geodynam. Tectonophys. 2010. V. 1, № 4. P. 419–440.
17. Kocharyan G.G., Kulyukin A.A., Pavlov D.V. Specific dynamics of interblock deformation in the Earth's crust // Russian Geology and Geophysics. 2006. V. 47, №5. P. 669-683.

18. Kocharyan G.G., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Markov V.K., Markov D.V., Pernik L.M. Hydrological Response of Underground Reservoirs to seismic Vibrations // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2011. V. 47, № 12. P. 1071-1082
19. Powers P.M., Jordan T.H. Distribution of seismicity across strike-slip faults in California // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. 05-305.
20. Shapiro S.A., Dinske C., Rothert E. Hydraulic-fracturing controlled dynamics of microseismic clouds // *Geophysical Research letters*. 2006. V. 33. L14312.
21. Reid H.F. The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906 // Report of the State Investigation Commission (2), Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. 1910.
22. Rousset B., Barbot S., Avouac J.-P., Hsu Y.-J. Postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan: Implication for lower-crust rheology // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B12405.
23. Waldhauser F., Schaff D.P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B08311.
24. Касимова А.Г., Завойская И.Н. Ионосферный эффект вранчского землетрясения в Киеве, Геофизический журнал, 1989, т. II, N 1, с.76-80.
25. Мильнис М. Р. Метеорологические предвестники землетрясений, Известия АН СССР, Физика Земли, 1986, N 3, с.36-37.
26. Инструкция по составлению карт ожидаемых землетрясений, ИФЗ АН СССР, ИГ АН ГССР, М., 1987.
27. Развитие исследований в области современной геодинамики и прогноза землетрясений на территории УССР [Текст] : научное издание / А. В. Чекунов [и др.] // Сейсмопрогност. исслед. на территории УССР. - Киев, 1988. - С. 3-8
28. Распределение интенсивности сотрясений на территории Украины от Карпатского землетрясения 30 августа 1986 г. [Текст] : научное издание / Б. Г. Пустовитенко [и др.] // Сейсмол. бюл. Зап. террит. зоны Един. системы сейсм. наблюдений СССР, 1986 г. - Киев, 1989. - С. 132-135
29. Пулинец С.А., Лью Й.Я. Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью наземно-космических методов. Доклады конференции. Москва, 2-3 октября 1997. С.27-44.
30. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений // М.:Наука, 1992. 304 с.
31. Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере // Физика Земли, 1983. Т.10. С.17-21.
32. Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М., Хегай В.В., Лю Й.Я. Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ данных критических частот foF2 наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (о. Тайвань). // Геомагнетизм и аэрономия, 2002. Т.42. №4. С.435-447.
33. Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагнетизм и аэрономия, 1998. Т.38. С.178-183.
34. Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем //Электронный журнал "Исследовано в России", 2001. № 153. С.1759-1767.
35. Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук, 2005. Т.402. №5. С.675-679.

#### References:

1. Shakhriyan M.L., Nigmatov G.M., Sosunov I. V. Matematicheskoye modelirovaniye kak sposob podderzhki pri-nyatiya resheniy v sluchaye vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy // Katalog «Pozharnaya bezopasnost» — 2003. - S. 240-241. [Shakhriyan M.L., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a way to support decision-making in case of emergency situations // Fire Safety Catalog - 2003. - P. 240-241. (In Russ.)]
2. Aslanov T.G., Magomedov K.H.D., Musayeva U.A., Tagirov K.H.YU. Vliyaniye prostranstvennogo raspolozheniya seysmodat-chikov na tochnost' opredeleniya gipotsentra zemletryaseniya // Vestnik Dagestansko-go gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. N«4 (43), 2016 Makhachkala: DGTU, 2016. S. 73-84. [Aslanov T. G., Magomedov Kh. D., Musayeva U. A., Tagirov Kh. Yu. The influence of the spatial location of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter // Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical science. N «4 (43), 2016 Makhachkala: DGTU, 2016. P. 73-84. (In Russ.)]
3. Aslanov T.G. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem kombiniro-vannogo metoda // Vestnik Dagestansko-go gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. N>2 (44), 2017 — Makhachkala: DGTU, 2017. — S. 118-125. [Aslanov T.G. Determining the coordinates of the earthquake source using the combined method // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. N2 (44), 2017 - Makhachkala: DGTU, 2017. - p. 118-125. (In Russ.)]
4. Aslanov G.K., Shakhtarin B.I., Aslanov T.G.. Oshibki v opredelenii koordinat ochaga ano-mal'nykh zemletryaseniya. — Sistemnyye tekhnologii. 2018. № 28. S. 58- 64. [Aslanov G.K., Shakhtarin B.I., Aslanov T.G. Errors in determining the coordinates of the source of anomalous earthquakes. - System technology. - 2018. - № 28. - p. 58-64. (In Russ.)]

5. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismogennaya shirina razlomnoy zony // DAN. 2011. T. 437, № 2. S. 254-257. [Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismogenic width of the fault zone // DAN. 2011. T. 437, No. 2. P. 254-257. (In Russ.)]
6. Rebetskiy YU.L. Tektonicheskiye napryazheniya i oblasti trigger'nogo mekhanizma vozniknoveniya zemletryaseniy // Fizicheskaya mezomekhanika. 2007. T. 10, № 1 S. 25-37. [Rebetsky Yu.L. Tectonic stresses and areas of the trigger mechanism for the occurrence of earthquakes // Physical mezomechanika. 2007. V. 10, No. 1, pp. 25-37. (In Russ.)]
7. Sadovskiy M.A., Kocharyan G.G., Rodionov V.N. O mekhanika blochnogo gornogo massiva // Dokl. AN SSSR. 1988. T. 302, № 2. S. 306-307. [Sadovsky MA, Kocharyan GG, Rodionov V.N. On the mechanics of block rock mass, Dokl. Academy of Sciences of the USSR. 1988. T. 302, No. 2. S. 306-307. (In Russ.)]
8. Sobolev G.A., Zav'yalov A.D. O kontsentratsionnom kriterii seismogennykh razryvov // Dokl. AN SSSR. 1980. T. 252, № 1. S. 69-71. [Sobolev G.A., Zavyalov A.D. On the concentration criterion of seismogenic discontinuities, Dokl. Academy of Sciences of the USSR. 1980. T. 252, No. 1. S. 69-71. (In Russ.)]
9. Grunthal G., Stromeyer D. The recent crustal stress field in Central Europe: Trajectories and finite element modeling // J. Geoph. Res. 1996. V. 80, № 8. P. 11805–11820.v. (In Russ.)]
10. Iinuma T., et al. Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) (In Russ.)]
11. Refined by means of seafloor geodetic data // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. 0740.
12. Ikari M.J., Marone C., Saffer D.M., Kopf A.J. Slip weakening as a mechanism for slow earthquakes // Nature Geosci. 2013. V. 6. P. 468-472.
13. Jafari M.A. Spatial distribution of seismicity parameters in the Persian Plateau // EPS. 2013. V. 65. P. 863-869.
14. Kanamori H., Brodsky E. The physics of earthquakes // Rep.Prog.Phys. 2004. V. 67. P. 1429-1496.
15. Keylis-Borok V.I. On the estimation of the displacement in an earthquake source and source dimensions // Annals of Geophysics. 1959. V. 12, №2. P. 205–214.
16. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismic Picture of a Fault Zone. What Can Be Gained From the Analysis of Fine Patterns of Spatial Distribution of Weak Earthquake Centers? // Geodynam. Tectonophys. 2010. V. 1, № 4. P. 419–440.
17. Kocharyan G.G., Kulyukin A.A., Pavlov D.V. Specific dynamics of interblock deformation in the Earth's crust // Russian Geology and Geophysics. 2006. V. 47, №5. P. 669-683.
18. Kocharyan G.G., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Markov V.K., Markov D.V., Pernik L.M. Hydrological Response of Underground Reservoirs to seismic Vibrations // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2011. V. 47, № 12. P. 1071-1082
19. Powers P.M., Jordan T.H. Distribution of seismicity across strike-slip faults in California // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. 05-305.
20. Shapiro S.A., Dinske C., Rothert E. Hydraulic-fracturing controlled dynamics of microseismic clouds // Geophysical Research letters. 2006. V. 33. L14312.
21. Reid H.F. The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906 // Report of the State Investigation Commission (2), Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. 1910.
22. Rousset B., Barbot S., Avouac J.-P., Hsu Y.-J. Postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan: Implication for lower-crust rheology // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. B12405.
23. Waldhauser F., Schaff D.P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. B08311.
24. A.G.Kasymova, I.N.Zavoyskaya. Ionosfernyy effekt vranchesnogo zemletryaseniya v Kiyeve, Geofizicheskiy zhurnal, 1989, t. II, N 1, s.76-80. [Kasymova A.G., Zavoyskaya I.N. The ionospheric effect of a vranic earthquake, Geophysical Journal, 1989, Vol. II, N 1, pp.76-80. (In Russ.)]
25. M. R.Mil'nis. Metereologicheskoye predvestniki zemletryaseniy, Izvestiya AN SSSR, Fi-zika Zemli, 1986, N 3, s.36-37. [Milnys M.R. Meteorological precursors of earthquakes, News of the Academy of Sciences of the USSR, Earth Science, 1986, no. 3, pp.36-37. (In Russ.)]
26. Instruksiya po sostavleniyu kart ozhidayemykh zemletryaseniy, IFZ AN SSSR, IG AN GSSR, M., 1987. [Instructions for mapping the expected earthquakes, IPE USSR Academy of Sciences, IG AN GSSR, M., 1987. (In Russ.)]
27. Razvitiye issledovaniy v oblasti sovremennoy geodinamiki i prognoza zemletryaseniy na territorii USSR [Tekst] : nauchnoye izdaniye / A. V. Chekunov [i dr.] // Seismoprognoz. issled. na territorii USSR. - Kiyev, 1988. - S. 3-8 [Development of research in the field of modern geodynamics and earthquake prediction in the territory of the Ukrainian SSR [Text]: scientific publication / A.V. Chekunov [and others] // Seismoprognoz. researches on the territory of the USSR. - Kiev, 1988. - p. 3-8(In Russ.)]
28. Raspredeleniye intensivnosti sotryaseniy na territorii Ukrainy ot Karpatskogo zemle-tryaseniya 30 avgusta 1986 g. [Tekst] : nauchnoye izdaniye / B. G. Pustovitenko [i dr.] // Seysmol. byul. Zap. ter-rit. zony Yedin. sistemy seysm. nablyudeniy SSSR, 1986 g. - Kiyev, 1989. - S. 132-135 [ Distribution of intensity of tremors on the territory of Ukraine from the Carpathian earthquake on August 30, 1986 [Text]: scientific publication / B. G. Pustov-

- itenko [and others] // Seismol. bullet Zap ter rit zone one seismic systems Observations of the USSR, 1986 - Kiev, 1989. pp. 132-135 (In Russ.)]
29. Pulinets S.A., Lyu Y.YA. Kratkosrochnyy prognoz katastroficheskikh zemletryaseny s pomo-shch'yu nazemno-kosmicheskikh metodov. Doklady konferentsii. Moskva, 2-3 oktyabrya 1997. S.27-44. [[Pulinets S.A., Lew Y.Ya. Short-term forecast of catastrophic earthquakes using ground-space methods. Conference reports. Moscow, October 2-3, 1997. P.27-44. (In Russ.)]
30. Liperovskiy V.A., Pokhotelov O.A., Shalimov S.L. Ionosfernyye predvestniki zemletryase-niy // M.:Nauka, 1992. 304 s. [Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Shalimov S.L. Ionospheric precursors of earthquakes // Moscow: Nauka, 1992. 304 p. (In Russ.)]
31. Gokhberg M.B., Pilipenko V.A., Pokhotelov O.A. O seysmicheskikh predvestnikakh v ionosfere // Fizika Zemli, 1983. T.10. S.17-21. [Gokhberg, MB, Pilipenko, V.A., Pokhotelov, O.A. On seismic precursors in the ionosphere // Physics of the Earth, 1983. T.10. P.17-21. (In Russ.)]
32. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Lomonosov A.M., Kheday V.V., Lyu Y.YA. Ionosfernyye predvest-niki zemletryaseny: predvaritel'nyy analiz dannykh kriticheskikh chastot foF2 nazemnoy stantsii verti-kal'nogo zondirovaniya ionosfery Chung-Li (o. Tayvan'). // Geomagnetizm i aeronomiya, 2002. T.42. №4. S.435-447. [S. Pulinets, A. Boyarchuk, A. Lomonosov, V. Kheday, V.Yu. Liu Ionospheric precursors of earthquakes: a preliminary analysis of the data on the foF2 critical frequencies of a ground station of a vertical probe sounding of the Chung-Li ionosphere (island of Taiwan). // Geomagnetism and Aeronomy, 2002. V.42. №4. P.435-447. (In Russ.)]
33. Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Zelenova T.I. Zavisimost' seysmo-ionosfernykh variatsiy v maksimume sloya F ot mestnogo vremeni // Geomagnetizm i aeronomiya, 1998. T.38. S.178-183. [Pulinets SA, Legenka A.D., Zelenova T.I. Dependence of seismic-ionospheric variations at the maximum of the F layer on local time // Geomagnetism and Aeronomy, 1998. V.38. P.178-183. (In Russ.)]
34. Smirnov V.M. Variatsii ionosfery v period zemletryaseny po dannym navigatsionnykh si-stem //Elektronnyy zhurnal "Issledovano v Rossii", 2001. № 153. S.1759-1767. [Smirnov V.M. Variations of the ionosphere in the period of earthquakes according to the navigation systems // Electronic Journal "Researched in Russia", 2001. No. 153. P.1759-1767. (In Russ.)]
- Bondur V.G., Smirnov V.M. Metod monitoringa seysmoopasnykh territoriy po ionosfer-nym variatsiyam, registriruyemym sputnikovymi navigatsionnymi sistemami // Doklady Akademii nauk, 2005. T.402. №5. S.675-679.
35. [Bondur V.G., Smirnov V.M. The method of monitoring seismically dangerous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // Doklady Akademii nauk, 2005. T.402. №5. P.675-679. (In Russ.)]

**Сведения об авторах:**

**Асланов Гайдарбек Тагирбекович** – доктор технических наук, профессор, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

**Асланов Тагирбек Гайдарбекович** – кандидат технических наук, докторант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

**Мусаева Ума Алиевна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

**Information about the authors.**

**Gaidarbek K.Aslanov** – Dr.Sci. (Technical), Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

**Tagirbek G.Aslanov** – Cand. Sci. (Technical), Doctoral cand., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

**Uma A.Musaeva** - Cand. Sci. (Technical), Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 26.11.2018.

**Принята в печать** 19.12.2018.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 26.11.2018.

**Accepted for publication** 19.12.2018.